



**Paula Mauricio Nunes**

**Projeto da Cadeia de Suprimentos de Hidrogênio:  
Uma Metodologia para o Planejamento sob Incerteza**

**Dissertação de Mestrado**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção do Departamento de Engenharia Industrial da PUC-Rio como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Produção.

Orientador: Prof. Silvio Hamacher

Co-orientador: Prof. Fabrício Carlos Pinheiro de Oliveira

Rio de Janeiro  
Março de 2013



**Paula Mauricio Nunes**

**Projeto da Cadeia de Suprimentos de Hidrogênio:  
Uma Metodologia para o Planejamento sob Incerteza**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção do Departamento de Engenharia Industrial da PUC-Rio como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Produção.

**Prof. Silvio Hamacher**

Orientador

Departamento de Engenharia Industrial - PUC-Rio

**Prof. Fabricio Carlos Pinheiro de Oliveira**

Co-orientador

Departamento de Engenharia Industrial - PUC-Rio

**Prof. Adriana Leiras**

Departamento de Engenharia Industrial - PUC-Rio

**Prof. Alexandre Street**

Departamento de Engenharia Elétrica - PUC-Rio

**Prof. José Eugênio Leal**

Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 15 de março de 2013

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização do autor, do orientador e da universidade.

### **Paula Mauricio Nunes**

Paula Mauricio Nunes graduada em Engenharia Elétrica e Engenharia de Produção pela PUC-Rio em 2010. Trabalhou no Núcleo de Excelência em Otimização (NExO) de 2008 à 2012 onde participou e coordenou projetos de pesquisa e consultoria na área de planejamento estratégico, tático e operacional da cadeia de suprimentos utilizando modelos de otimização. Hoje atua como Analista de Pesquisa Operacional na Petróleo Brasileiro S.A. (Petrobras).

### Ficha Catalográfica

Nunes, Paula Mauricio

Projeto da cadeia de suprimentos de hidrogênio: uma metodologia para o planejamento sob incerteza / Paula Mauricio Nunes ; orientador: Silvio Hamacher ; co-orientador: Fabrício Carlos Pinheiro de Oliveira. – 2013.  
88 f. : il. (color.) ; 30 cm

Dissertação (mestrado)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Industrial, 2013.

Inclui bibliografia

1. Engenharia Industrial – Teses. 2. Gestão da cadeia de suprimentos. 3. Hidrogênio líquido. 4. Planejamento estratégico. 5. Otimização sob incerteza. 6. Programação estocástica. 7. SAA. I. Hamacher, Silvio. II. Oliveira, Fabrício Carlos Pinheiro de. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Industrial. IV. Título.

CDD: 658,5

À minha família e amigos pelo apoio, incentivo, companheirismo e amizade.

## Agradecimentos

Ao orientador Silvio Hamacher, pela excelente orientação e pelos ensinamentos e aprimoramentos acadêmicos. Agradeço ainda por todas as oportunidades concedidas durante minha vida acadêmica e profissional.

Ao meu co-orientador Fabricio Oliveira, pela excelente co-orientação e pelos aprimoramentos acadêmicos. Agradeço ainda por toda dedicação, paciência e tempo dedicados durante minha vida acadêmica e profissional.

Aos colegas do Núcleo de Excelência em Otimização (NExO), em especial a Gabriela Ribas e Jorge Montechiari, pelas discussões e contribuições sobre os mais diversos temas relacionados a esta tese.

À minha família pelo apoio e incentivo em todas as etapas da minha vida. A minha mãe um agradecimento especial pelo tempo dedicado em revisões ortográficas e estruturação da dissertação. Ao meu pai, um agradecimento especial pelas contribuições sobre as mais novas tecnologias ecologicamente corretas. E a minha irmã, por estar sempre presente me apoiando quando necessário.

Aos meus amigos que sem os quais não seria a pessoa que sou hoje.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio), pelos auxílios concedidos e pelo ótimo ambiente de estudo.

## Resumo

Nunes, Paula Mauricio; Hamacher, Silvio. **Projeto da Cadeia de Suprimentos de Hidrogênio: Uma Metodologia para o Planejamento sob Incerteza**. Rio de Janeiro, 2013. 88 p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Industrial, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Os combustíveis de baixo impacto ambiental estão em destaque na mídia e na sociedade, atualmente. Neste contexto, o hidrogênio, fonte de energia limpa, tem um grande potencial. Entretanto, ainda não existe uma infraestrutura adequada para sua comercialização. O crescimento da demanda por hidrogênio é de difícil previsão, gerando um alto grau de incerteza na definição das necessidades de capacidades futuras de sua rede logística. Esta dissertação propõe uma metodologia para o planejamento do projeto da cadeia de suprimentos de hidrogênio para uso em transporte. Para representar o problema e avaliar diferentes alternativas de investimentos em infraestrutura logística foi desenvolvido um modelo matemático estocástico de dois estágios utilizando programação linear inteira mista (PLIM). O elevado nível de incerteza desta cadeia aumenta a complexidade do modelo, requerendo uma grande quantidade de cenários, inviabilizando sua otimização. Para contornar esta dificuldade, foi utilizada a técnica de aproximação por média amostral (SAA). Esta abordagem gera soluções, cuja qualidade pode ser estatisticamente avaliada utilizando-se um número reduzido de cenários. A metodologia proposta foi aplicada em um estudo de caso com dados reais da cadeia de suprimentos de hidrogênio líquido da Grã-Bretanha. Os gaps de otimalidade gerados nestes testes foram inferiores a 1%, demonstrando a adequação do método desenvolvido. Mesmo com o alto nível de incerteza do problema, o SAA possibilitou definir como, quando, e onde investir. Os resultados obtidos devem contribuir para proporcionar avanços na criação de uma infraestrutura apropriada para a comercialização do hidrogênio.

## Palavras-chave

Gestão da cadeia de suprimentos; Hidrogênio líquido; Planejamento estratégico; Otimização sob incerteza; Programação estocástica; SAA.

## Abstract

Nunes, Paula Mauricio; Hamacher, Silvio (Advisor). **Design of the Hydrogen Supply Chain: A Methodology for Planning under Uncertainty**. Rio de Janeiro, 2013. 88 p. MSc. Dissertation – Departamento de Engenharia Industrial, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Nowadays, fuels with low environmental impact are highlighted in media and society. In this context, hydrogen, as a clean energy source, has a great potential. However, there is still no appropriate infrastructure for its commercialization. The prediction of demand for hydrogen is difficult, generating a high degree of uncertainty in the definition of capacity needs in the future for its logistics network. This work proposes a methodology for the design of the hydrogen supply chain for use in transportation. To represent the problem and evaluate alternatives to invest in logistics infrastructure, a two-stage stochastic mixed-integer programming was developed. The high degree of uncertainty in this chain increases the complexity of the mathematical model, requiring a huge number of scenarios which makes its optimization impossible. To overcome this difficulty, the technique of sample average approximation (SAA) is used. This approach generates solutions, whose quality can be statistically evaluated using a reduced number of scenarios. The proposed methodology was tested in a study case with real data from Great Britain's liquid hydrogen supply chain. The optimal gaps generated in these tests were below 1%, demonstrating the adequacy of the developed methodology. Even with the high level of uncertainty of the problem, the propose methodology using SAA technique can define how, when, and where to invest. The results should be helpful in advancing the creation of an appropriate infrastructure for hydrogen commercialization.

## Keywords

Supply Chain Management; Liquid Hydrogen; Strategic Planning; Optimization under uncertainty; Stochastic Optimization; SAA.

# Sumário

1	Introdução	12
2	Modelos de Cadeia de Suprimento	15
	2.1 Cadeia de Suprimentos	15
	2.2 Incertezas na Cadeia	17
	2.3 Modelagem Matemática	18
	2.4 Modelos de Otimização para Projeto da Cadeia	20
	2.5 Modelo Estocástico de Dois Estágios	22
	2.6 Medidas de Comparação	24
	2.7 SAA - Aproximação por Média Amostral	25
3	O Hidrogênio	31
	3.1 O Surgimento do Hidrogênio como Forma de Energia	32
	3.2 Projetos do Hidrogênio	32
	3.3 Cadeia de Hidrogênio	34
	3.4 Vantagens e Desvantagens do Hidrogênio	40
	3.5 Modelos Matemáticos para Cadeias de Hidrogênio	43
4	Modelo PLIM Estocástico	46
	4.1 Função Objetivo	49
	4.2 Limites de Capacidade	52
	4.3 Ampliação da Cadeia de Suprimentos	53
	4.4 Matéria Prima	54
	4.5 Restrições de Transporte	55
	4.6 Diferenças Modelo Almansoori & Shah (2012)	55
5	Estudo de Caso – Grã-Bretanha	57
	5.1 Apresentação dos Dados	57
	5.2 Resultados - Modelo Completo	63
	5.3 Refinando o Resultado – Modelo Reduzido	66
6	Aplicação do SAA	71
	6.1 Apresentação dos Dados	71
	6.2 Resultados	73
7	Conclusão	79
8	Referências	81



## Lista de Figuras

Figura 2.1: Esquema de uma cadeia de suprimento .....	16
Figura 3.1: Esquema da cadeia de hidrogênio .....	35
Figura 3.2: Evolução dos pilares dos veículos movidos a hidrogênio .....	41
Figura 3.3: Possibilidades tecnológicas de evolução da cadeia .....	43
Figura 5.1: Mapa da Grã Bretanha dividido em grids .....	58
Figura 5.2: Árvore de cenários .....	58
Figura 5.3: Custo de obtenção do hidrogênio.....	61
Figura 5.4: Custo armazenagem do hidrogênio.....	62
Figura 5.5: Participação de cada uma das parcelas da função objetivo.....	65
Figura 5.6: Movimentação nos cenários.....	70
Figura 6.1: Exemplo de cenários de demanda.....	72

## Lista de Tabelas

Tabela 2.1: Resumo de fórmulas do SAA .....	30
Tabela 4.1: Conjuntos e Variáveis.....	48
Tabela 4.2: Parâmetros .....	49
Tabela 5.1: Matéria prima .....	59
Tabela 5.2: Planta de produção .....	60
Tabela 5.3: Armazéns de hidrogênio líquido .....	61
Tabela 5.4: Custos relacionados ao transporte .....	62
Tabela 5.5: Custo total de transporte .....	63
Tabela 5.6: Gap x Tempo computacional.....	64
Tabela 5.7: Plantas instaladas .....	64
Tabela 5.8: Gap x Tempo computacional (Reduzido).....	67
Tabela 5.9: Comparação entre modelagens .....	67
Tabela 5.10: Custo unitário modelo reduzido .....	68
Tabela 5.11: Plantas instaladas .....	68
Tabela 5.12: Parcelas da função objetivo .....	69
Tabela 6.1: Cenários para diferentes níveis de confiança e gap (MM US\$) .....	73
Tabela 6.2: Cenários para diferentes níveis de confiança e gap (%) .....	73
Tabela 6.3: Porte dos experimentos do SAA.....	74
Tabela 6.4: Valores do limite inferior, superior e gap do SAA.....	74
Tabela 6.5: Intervalos de confiança para o gap .....	75
Tabela 6.6: EVPI .....	76
Tabela 6.7: Plantas e armazéns instalados.....	77
Tabela 6.8: Custo unitário .....	78

*“Não somos nós que devemos esperar o futuro, mas o futuro que deve esperar por nós.” (Tobias Barreto de Menezes)*

# 1

## Introdução

Atualmente as energias limpas e renováveis têm recebido grande atenção da mídia e da sociedade e vêm sendo feitos grandes investimentos nessa área. Segundo a Agência Internacional de Energia (AIE, 2013a), a capacidade de geração eólica mundial subiu de 18 gigawatts (GW), em 2000, para 238 GW em 2011, com uma taxa de crescimento anual maior que 25% nos últimos cinco anos. A oferta de energia solar fotovoltaica mundial subiu mais de 50% ao ano, entre 2006 e 2011, fechando 2011 com 67 GW produzidos. O biocombustível, como um todo, atingiu o montante de 100 bilhões de litros produzidos em 2010 e já responde por 3% do combustível para transporte no mundo e 23% no Brasil.

Apesar dos esforços, mais de 80% da energia utilizada no mundo em 2009 ainda provinha de combustíveis fósseis. Esse número é ainda mais alarmante se for considerado que 85% do aumento da demanda mundial nos últimos dez anos foi suprida por esse tipo de combustível, mostrando que os investimentos realizados em fontes renováveis ainda não conseguiram alterar o padrão (AIE, 2013b). No Reino Unido, o transporte corresponde a 1/4 da energia consumida e da emissão de carbono, sendo os veículos rodoviários responsáveis por 93% dessas emissões (DTI, 2007).

A preocupação com a poluição produzida pelos automóveis convencionais vem tendo cada vez mais destaque e é crescente a busca por novas tecnologias. Nesse contexto, surge o interesse pelos carros verdes, ecologicamente corretos, sejam eles de biocombustíveis, elétricos, híbridos (dois motores, um elétrico e um de combustão interna) ou de células de combustível (célula eletroquímica que combina o hidrogênio com o oxigênio do ar produzindo energia elétrica e vapor de água). Os lançamentos mais recentes deste segmento podem ser vistos no site Green Car Report (Voelcker, 2013).

Os carros elétricos e de células de combustível, além de não emitirem gases poluentes ao serem utilizados, são bastante silenciosos e por isto ganham destaque em grandes centros urbanos, aonde o barulho e a poluição vêm sendo prejudiciais

à saúde da população (OMS, 2013a). Segundo a Organização Mundial de Saúde (OMS, 2013b), a poluição sonora pode causar distúrbios no sono, problemas cardiovasculares e problemas psicológicos, como estresse e desvio de atenção.

Novas tecnologias vêm sendo pensadas e o hidrogênio, como forma de combustível, vem ganhando destaque em meio às publicações científicas. O hidrogênio está presente em abundância no meio ambiente, podendo ser produzido praticamente a partir de qualquer material, sejam estas fontes renováveis, como água e biomassa, ou fontes não renováveis, como carvão e hidrocarbonetos.

O hidrogênio é um dos combustíveis mais eficientes na conversão de energia em movimento, sendo aproximadamente 2,5 vezes mais eficiente que a gasolina (Santos & Santos, 2005). Além de uma alternativa eficiente para solução de redução das mudanças climáticas, o hidrogênio é uma forma sustentável de diversificação da matriz energética, garantindo segurança no abastecimento e evitando crises, uma vez que o mesmo pode facilmente ser transformado em eletricidade quando necessário.

No entanto, não adiantam apenas investimentos em tecnologias. Para que um novo combustível seja disseminado, é preciso investimentos em infraestrutura de forma a comercializar o hidrogênio em diversos pontos, atendendo a demanda dos veículos. Em 2012, na World Hydrogen Energy Conference (WHEC, 2012), as montadoras automobilísticas Daimler AG, Honda, Hyundai e Toyota confirmaram os planos de produção de carros de células de combustível para venda a partir de 2015. Dessa forma, é preciso instalar toda a infraestrutura para que esses carros possam ser utilizados pela população quando forem disponibilizados no mercado.

O hidrogênio, por ser uma forma de combustível ainda incipiente, não fixada no mercado, possui uma demanda de difícil previsão, gerando um alto grau de incerteza na definição das necessidades de capacidades futuras de sua rede logística. O elevado nível de incerteza, sobre o que irá acontecer no futuro desta cadeia, aumenta a complexidade dos modelos matemáticos utilizados para sua análise, uma vez que tais modelos requerem uma grande quantidade de cenários para representar as incertezas reais do problema.

Este trabalho tem como objetivo principal desenvolver uma metodologia para o planejamento do projeto da cadeia de suprimentos de hidrogênio para uso

em transporte considerando incerteza na previsão da demanda. Para atingir este objetivo, utilizou-se programação linear inteira mista (PLIM) para desenvolver um modelo matemático estocástico de dois estágios. As decisões de primeiro estado são as relacionadas com a infraestrutura logística, avaliando diferentes alternativas de investimento em plantas de produção e locais de armazenagem. As decisões de segundo estado estão relacionadas com a operação da rede logística, definindo a alocação dos fluxos de matéria prima e de hidrogênio.

Para a boa utilização de um modelo estocástico, é fundamental a utilização de um método de geração e/ou redução de cenários uma vez que os parâmetros incertos em geral possuem distribuições de probabilidade contínua que precisam ser discretizadas, sem comprometer a qualidade da solução e o tempo computacional de resolução. Dessa forma, a metodologia foi complementada utilizando a técnica de aproximação por média amostral (SAA - *Sample Average Approximation*) que possibilita avaliar estatisticamente as soluções encontradas quanto à otimalidade do problema. Isto é possível, pois as soluções encontradas, utilizando-se uma quantidade reduzida de cenários, são avaliadas em novos cenários, de forma a permitir o cálculo de suas propriedades estatísticas.

Por último, foram aplicados métodos para redução do tempo de solução do modelo e dos gaps de otimalidade que envolvem tanto técnicas de modelagem matemática como de análise dos dados do problema. A metodologia proposta foi testada em um estudo de caso com dados reais da cadeia de suprimentos de hidrogênio líquido da Grã-Bretanha.

Este trabalho está estruturado em sete capítulos, iniciando por uma introdução e finalizando com a conclusão e sugestões de trabalhos futuros. O Capítulo 2 traz uma revisão de literatura, apresentando a cadeia de suprimentos, seu desenho, ferramentas de programação matemática e a técnica do SAA. No Capítulo 3 é apresentado o estado da arte do hidrogênio como forma de combustível, sua cadeia, modelos e métodos que podem ser aplicados neste estudo. O Capítulo 4 descreve o modelo matemático estocástico de dois estágios desenvolvido, seus parâmetros, variáveis e restrições. Em seguida, no Capítulo 5, são apresentados os resultados de um estudo de caso baseado em dados reais da Grã-Bretanha, que demonstra a eficiência do modelo. Por último, no Capítulo 6, a técnica de SAA é aplicada ao mesmo estudo de caso.

## 2

# Modelos de Cadeia de Suprimento

Este capítulo é dedicado a apresentar o estado da arte dos modelos existentes para o desenho e operação de uma cadeia de suprimentos. Ele está estruturado em cinco seções. A Seção 2.1 apresenta o conceito de cadeia de suprimentos, enquanto a Seção 2.2 define o que é incerteza e como ela afeta os elos (nós) da cadeia. A Seção 2.3 apresenta os tipos de modelo existentes que são exemplificados na Seção 2.4. Na Seção 2.5 é destacado o modelo de otimização estocástico de dois estágios, que será a base para construção do modelo apresentado no Capítulo 4. A Seção 2.6 traz algumas medidas de comparação entre modelos determinísticos e estocásticos e, por último, a Seção 2.7 apresenta a técnica de Aproximação por Média Amostral (*Sample Average Approximation - SAA*).

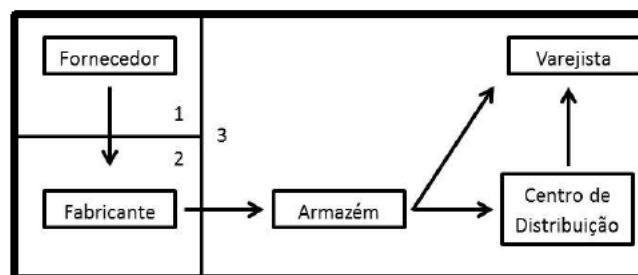
### 2.1 Cadeia de Suprimentos

No mundo globalizado, não existem firmas independentes no mercado, mas sim grandes quantidades de empresas que estão unidas dentro de uma única cadeia. Como a competição no mercado cresce cada vez mais, estas empresas são obrigadas a se juntar para integrar e coordenar suas atividades de forma a garantir seu sucesso (Drucker, 1998; Lambert & Cooper, 2000).

A cadeia de suprimentos (SC - *Supply Chain*), também chamada de rede logística, engloba todas as etapas e agentes (*stakeholders*) do processo de produção e comercialização do produto ou serviço a ser entregue ao cliente final (Lee & Billington, 1995). Neste processo integrado, todos os *stakeholders* (fornecedores, fabricantes, atacadistas e varejistas) se unem trocando informações de forma a adicionar valor ao produto final (Min & Zhou, 2002; Bowersox & Closs, 1996).

Segundo Beamon (1998), são três as etapas da SC: (1) obtenção de matéria prima, (2) transformação da matéria prima em produto final e (3) entrega do

produto para o varejista. Tal processo é caracterizado por um fluxo de materiais para frente (do fornecedor para o varejista), através de diferentes modais de transporte, e um fluxo de informações para trás (do varejista para o fornecedor). A Figura 1.1 apresenta o esquema de uma cadeia onde os arcos dos modais de transporte são representados por setas que podem ser compostas por diferentes modais de transporte.



**Figura 2.1: Esquema de uma cadeia de suprimento (Fonte: Autora)**

Existem diversos tópicos que podem ser abordados em estudos relacionados à cadeia de suprimentos. Um deles é o seu desenho ou projeto (SCD - *Supply Chain Design*), que está relacionado ao número e quantidade de ligações existentes entre os nós da cadeia, fornecimento, produção e distribuição (Person & Olhager, 2002). O objetivo do projeto é minimizar o custo total do sistema composto por investimento, produção, armazenagem e transporte, garantindo um nível de serviço satisfatório ao consumidor.

A definição do desenho da rede é uma decisão estratégica, pois os investimentos têm impacto duradouro na operação da empresa, uma vez que seus imobilizados costumam ser de alto valor (Santoso et al., 2005). Assim o desenho da cadeia será baseado na escolha ótima da configuração da rede, determinando o número de nós necessários, localização, capacidade e tecnologia dos elos e o nível de integração vertical da cadeia.

O desenho e estratégia da cadeia devem ser baseados no nível de serviço requerido. A partir desta definição, a gestão e a operação da rede podem ser planejadas. Goetschalckx et al. (1994) descreveram as quatro etapas tradicionais para o desenho do sistema logístico estratégico: (1) definição do nível de serviço requerido; (2) alocação da produção, isto é, quanto deve ser produzido e/ou comprado; (3) projeto da rede, definindo o número e localização dos elos; e (4) estratégia de transporte, definindo a forma como os produtos serão entregues aos clientes e os arcos de transporte que deverão ser utilizados.



Os autores ressaltam que focar exclusivamente em apenas uma das etapas de decisão acima leva a soluções sub-ótimas do desenho geral do sistema. Eles sugerem integrar as etapas 2, 3 e 4 na decisão para obter soluções melhores.

## 2.2 Incertezas na Cadeia

Incerteza é a falta de conhecimento *a priori* do resultado de ações ou eventos futuros. Na cadeia de suprimentos, esta incerteza possui um alto impacto, já que a variabilidade em um elo repercute por toda a cadeia, formando o chamado efeito chicote (Forrester, 1958). Desta forma, ignorar as incertezas pode levar a decisões erradas para eficiência da cadeia (Davis, 1993).

O efeito chicote é o resultado de uma expectativa de demanda por produto ou oferta de matéria prima que não se realiza em um dos elos da cadeia, por diversos motivos, e que se propaga por toda a cadeia, influenciando os níveis de estoques, os tamanhos dos pedidos e a produtividade. Observa-se que este fenômeno se amplia à medida que avança ao longo da cadeia (Chen et al., 2000).

As incertezas podem ser classificadas em de curto e de longo prazo (Subrahmanyam et al., 1994). As de curto prazo são aquelas variações que acontecem no dia-a-dia, como: cancelamentos de pedidos, falha de equipamentos e pedidos de última hora. Já as de longo prazo são as flutuações sazonais e flutuações dos preços do produto final e da matéria prima.

Os fatores que geram as incertezas podem ser classificados como exógenos e endógenos, do ponto de vista do processo (Jonsbraten, 1998; Goel & Grossmann, 2004). As incertezas exógenas são aquelas onde somente fatores externos impactam o processo, como, por exemplo: disponibilidade e preço da matéria prima, preço do produto final, preços de produção, armazenagem e estocagem, orçamento, investimentos e questões políticas. Já as incertezas endógenas representam deficiência de conhecimento de processos internos, como: disponibilidade de equipamentos, opções de processamento e variáveis operacionais.

Existe uma grande diversidade de métodos para lidar com a incerteza. Entre eles podem ser destacados: a teoria da probabilidade (Li et al., 2008), a geração de cenários (Bollerslev, 1986) e a lógica Fuzzy (Zimmermann, 1991). Nenhum

método é suficiente para lidar com todas as incertezas, sendo necessário escolher o melhor de acordo com o contexto. (Zimmermann, 2000)

Os parâmetros usualmente considerados como incertos são: fornecimento (preço e oferta da matéria prima), fabricação (custo), controle e demanda (Geary et al., 2002). Uma das fontes de incertezas mais estudada no planejamento da cadeia de suprimentos é a demanda (Gupta & Maranas, 2003; Ierapetritou & Pistikopoulos, 1996; Liu & Sahinidis, 1998). Isso porque, quanto mais próxima a demanda real for da prevista, mais fácil será o planejamento desta, e menor será o efeito chicote em toda cadeia, possibilitando a obtenção de lucros maiores.

## 2.3 Modelagem Matemática

A dificuldade ao se criar um modelo matemático é que ele precisa refletir a realidade para gerar soluções confiáveis. Por outro lado, ele tem que ser o mais simplificado possível para que o mesmo possa encontrar boas soluções em tempo computacional razoável. Como forma de entender um pouco melhor os tipos de modelo existentes, serão apresentadas algumas de suas classificações.

Chopra & Meindl (2007) e Stevens (1989) propuseram uma classificação quanto ao nível de planejamento. Nesta divisão existem três categorias:

- (1) modelos estratégicos, que incluem decisões de reestruturação da cadeia através de expansão de locais e canais de distribuição, planejamento da demanda e do preço e decisões de pesquisa e desenvolvimento;
- (2) modelos táticos, que envolvem decisões de nível de estoque e coordenação da produção e distribuição; e
- (3) modelos operacionais, que tratam de decisões como roteamento de veículos, escala de pessoal e empacotamento.

Os modelos podem ainda ser classificados quanto à técnica de modelagem, onde otimização através de análise econômica, simulação e programação matemática, ganham destaque. Os de análise econômica são modelos causais, que procuram prever e/ou explicar um fenômeno econômico através de inter-relacionamento entre fatores previamente selecionados (Zhang, 2006). Os de simulação procuram imitar, testar e comparar alternativas de projetos. Em geral,

eles irão comparar o desempenho de cadeias já definidas, identificando os pontos fortes e fracos de cada uma das opções (D'este, 2001).

Os modelos de programação matemática podem ainda ser subdivididos em quatro categorias. Da mais simples até a mais complexa, em termos de solução, são elas:

- (1) linear (LP – Linear Programming), onde todas as equações utilizadas são lineares e as variáveis são contínuas;
- (2) inteiro (LIP – Linear Integer Programming), onde as equações continuam sendo lineares, mas as variáveis agora são inteiras;
- (3) não linear (NLP – Nonlinear Programming), onde pelo menos uma das equações ou a função objetivo são definidas usando a multiplicação de uma variável por outra. Neste modelo todas as variáveis são contínuas; e
- (4) não linear inteira (NLIP – Nonlinear Integer Programming), que é o modelo não linear com variáveis inteiras.

Podem ainda existir modelos mistos lineares e não lineares, onde há a mistura de variáveis contínuas e inteiras.

Nos últimos cinquenta anos, o uso da programação matemática em estudos de sistemas industriais vem se intensificando devido ao desenvolvimento de novas técnicas e à evolução de recursos computacionais. Segundo Shapiro (2001), os modelos de otimização fornecem uma análise profunda das opções de decisão, dos objetivos e das restrições de recursos sendo, portanto, uma das ferramentas mais utilizadas nesses estudos.

Outra classificação, feita por Dantzig (1955), utiliza uma divisão baseada no tratamento dado à incerteza dos parâmetros. Desta forma, os modelos podem ser classificados como determinísticos ou estocásticos. Os determinísticos são aqueles em que todos os seus parâmetros são tidos como conhecidos, isto é, possuem um valor mais provável assumido como sendo verdadeiro. Já os estocásticos possuem termos aleatórios que seguem uma curva de probabilidade. Isto é, para estes parâmetros não existem somente um valor para defini-los e sim toda uma distribuição discreta ou contínua de probabilidade.

Os modelos estocásticos podem ainda ser divididos em modelos de recurso (*recourse models*), onde ações corretivas são utilizadas para compensar a violação de restrições que surgiram após a realização de incertezas (Beale, 1955), e

modelos probabilísticos (*chance-constrained programming*), onde é permitido que algumas restrições sejam expressas em termos de declarações probabilísticas sobre outras (Charnes & Cooper, 1959). Os estocásticos probabilísticos são particularmente úteis quando os custos e benefícios associados a essas restrições são difíceis de serem avaliados.

Todos os modelos e técnicas apresentados podem ser utilizados para o desenho, operação e planejamento da cadeia de suprimentos. Entretanto, a escolha deve ser feita com cuidado, avaliando-se a real necessidade de detalhamento, para que a obtenção de resultados não se torne muito custosa em termos de processamento computacional.

O crescimento da complexidade e do escopo dos temas ligados à logística foi um dos motores da evolução na utilização de otimização em sistemas de planejamento estratégico e desenho da rede de distribuição (Geoffrion & Powers, 1995). Outro fator importante foi a formalização dos profissionais que se dedicam a esta área, fazendo com que estes reconhecessem a necessidade da utilização de modelagem matemática e otimização dos processos logísticos.

Os modelos de otimização para projeto da rede comumente estão no nível estratégico, mas também podem incluir decisões de nível tático. Eles tendem a utilizar programação linear inteira mista (PLIM), pois possuem decisões de investimento que são do tipo sim ou não e, por isto, necessitam de variáveis binárias. No entanto, deve-se ao máximo tentar minimizar o número de variáveis inteiras e, sempre que possível, utilizar apenas equações lineares de forma a facilitar a obtenção da solução.

Esses modelos também tendem a ser estocásticos, uma vez que se almeja o planejamento do projeto de uma cadeia que irá funcionar no futuro, onde os parâmetros são previstos, mas possuem determinado grau de incertezas. A Seção 2.4 apresenta alguns exemplos de trabalhos que utilizaram PLIM aplicada ao desenho e operação de cadeias de suprimentos.

## **2.4 Modelos de Otimização para Projeto da Cadeia**

Combinando a atividade de gerenciamento com a distribuição física, é possível observar que a cadeia de suprimentos não é uma cadeia linear e sim uma

rede de relações entre os diversos agentes e engloba diversos tipos de atividades. Desta forma, os modelos que a descrevem precisam ser simplificados de alguma forma, pois não podem abranger todos os detalhes da rede. Abaixo são apresentados alguns modelos PLIM que representam a evolução dos modelos utilizados para desenho e operação de uma cadeia de suprimentos.

Geoffrion & Graves (1974) apresentaram um dos primeiros trabalhos utilizando um modelo PLIM para seleção de possíveis centros de distribuição (CD) em uma cadeia de suprimentos com diferentes produtos (multiproduto). A cadeia modelada possuía três elos: fábricas, centros de distribuição e zonas de consumo, e suas restrições baseavam-se em atendimento da demanda e limites de capacidade.

Em 1987, Brown et al. (1987) desenvolveram um modelo PLIM para a fabricante de biscoitos NABISCO, de maneira a minimizar seus custos de produção e de transporte. O objetivo era otimizar o desenho do sistema de produção e de distribuição, alocando os equipamentos de produção em cada uma das fábricas. Além das restrições clássicas de atendimento a demanda e de limites de capacidade, este modelo restringiu o número de equipamentos de produção que poderiam existir em cada fábrica.

Já em 1995, Arntzen et al. (1995) desenvolveram 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 trouxe uma renovação na forma de se pensar a cadeia de suprimentos. Além disto, a função objetivo passou a considerar minimização dos tempos de produção e distribuição, deixando de lado o aspecto financeiro de custos e receitas.

Sabri & Beamon (2000) apresentaram um modelo estocástico multiobjectivo que integra os planejamentos: estratégico (ex: seleção dos fornecedores), tático (ex: fluxo de material) e operacional (ex: tamanho do lote) da cadeia de suprimentos. O uso de uma função multiobjectivo visa combinar os seguintes indicadores de desempenho: custo, nível de serviço e flexibilidade. As incertezas consideradas estão nos dados de demanda e *lead-time* de produção e fornecimento.

Tsiakis et al. (2001) desenvolveram um modelo estocástico de dois estágios com programação linear inteira mista para projeto da cadeia de suprimentos com incerteza na demanda. O modelo decide o número, localização e capacidade dos centros de distribuição e armazéns bem como as conexões de transporte que precisam ser estabelecidos. Para ilustrar a utilidade do modelo foi realizado um estudo da cadeia de suprimentos da Europa considerando 14 produtos com demanda incerta.

## 2.5 Modelo Estocástico de Dois Estágios

Embora muitas abordagens tenham sido propostas para modelar incertezas, os modelos de programação estocástica provaram a sua flexibilidade e utilidade em diversas áreas da ciência (Shapiro et al., 2009). O mais aplicado e estudado deles é o de dois estágios (Shapiro & Philpott, 2013). Como o próprio nome sugere, tais modelos dividem as variáveis de decisão em dois níveis. Neste caso, parte das decisões precisa ser tomada antecipadamente, sem se basear em uma realização particular de incerteza, enquanto as demais decisões são tomadas somente após a realização das incertezas.

Para lidar com incertezas futuras usualmente é criada uma árvore de eventos ou cenários, que se ramifica a cada possibilidade de realização de uma incerteza. Os nós desta árvore representam estados da natureza em instantes particulares do tempo (etapas) e neles as decisões são tomadas. Um caminho nessa árvore é chamado cenário e consiste de realizações de todas as variáveis aleatórias em todas as etapas (Sen & Hingle, 1999). Uma árvore pode ser entendida como a aproximação de um processo estocástico contínuo por um processo estocástico discreto (Heitsch & Romisch, 2009).

Cada realização da incerteza compõe um evento, e vários eventos compõem um cenário futuro que possui certa probabilidade de ocorrência. No caso das decisões de primeiro estágio, devem ser tomadas decisões do tipo “aqui e agora” (*here-and-now*), dependendo apenas da informação disponível até aquele momento, sem saber o cenário futuro que irá realizar-se, princípio este chamado de não antecipatividade (*nonanticipativity*). Desta forma, a decisão do primeiro estágio será sempre a mesma, independente dos eventos que ocorram no segundo

estágio (Birge & Louveaux, 1997). No segundo estágio, onde as informações de quais eventos ocorreram já estão disponíveis, é tomada a decisão referente às variáveis deste estágio. A decisão tomada no problema de segundo estágio reflete o comportamento ótimo no momento em que a incerteza é revelada.

Matematicamente, o modelo estocástico de dois estágios pode ser formulado segundo as Equações 2.1 (primeiro estágio) e 2.2 (segundo estágio):

$$v^* = \min_{x \in X} \{f(x) = E_{\xi} [F(x, \xi)] = c^T x + Q(x) \mid Ax \geq b, x \geq 0\} \quad (6.1)$$

$$Q(x, \xi) = \min_{y \in Y} \{q(\xi)^T y_{\xi} \mid W(\xi)y_{\xi} \geq h(\xi) - T(\xi)x, y_{\xi} \geq 0\} \quad (6.2)$$

onde  $Q(x) = E_{\xi}[Q(x, \xi)]$  é o valor esperado do problema de segundo estágio, para cada um dos  $\xi$  cenários, que assumisse como finito,  $\xi_1 \dots \xi_c$ , mas que têm seus parâmetros representados por variáveis aleatórias com distribuição de probabilidade conhecida.

Cada um dos cenários possui uma probabilidade que pode ser representada por  $p$ ,  $p_1 \dots p_{sc}$ . Assim o valor esperado  $E_{\xi} [Q(x, \xi)]$  pode ser calculado pela Equação 2.3.

$$E_{\xi} [Q(x, \xi)] = \sum_c p_c Q_c(x, \xi_c) \quad (6.3)$$

Nesta formulação,  $x \in \mathbb{R}^n$  é o vetor das variáveis de decisão de primeiro estágio,  $c$ ,  $A$  e  $b$  são os dados das restrições associados ao problema de primeiro estágio,  $y \in \mathbb{R}^m$  é o vetor das variáveis de decisão de segundo estágio e  $\xi = (q, T, W, h)$  contém os dados de custo,  $q$ , e matrizes,  $T, W, h$ , para o problema de segundo estágio. Desta forma, assumindo que o modelo possui cenários discretos, ele pode ser reescrito de forma que a Equação 2.4 represente o primeiro estágio de modelo e a Equação 2.5 o segundo estágio:

$$\hat{v}_N = \min_{x \in X} \left\{ \bar{f}_c(x) = c^T x + \sum_c p_c Q_c(x, \xi_c) \mid Ax \geq b, x \geq 0 \right\} \quad (6.4)$$

$$Q_c(x, \xi_c) = \min_{y \in Y} \{q_c^T y_c \mid W_c y_c \geq h_c - T_c x, y_c \geq 0\} \quad (6.5)$$

onde  $Q_c(x, \xi_c)$  é o valor ótimo do problema de segundo estágio para cada realização  $c = 1, \dots, C$ .

## 2.6 Medidas de Comparação

Segundo Birge e Louveaux (1997), o modelo estocástico muitas vezes é de difícil solução e opta-se pela solução de um modelo determinístico, onde os valores das variáveis aleatórias são fixados como a média das possíveis realizações futuras. De forma a comparar as soluções determinística e estocástica, eles apresentam duas medidas: o valor esperado da informação perfeita e o valor da solução estocástica.

O valor esperado da informação perfeita (*Expected Value of Perfect Information* - EVPI) mede quanto o tomador de decisão pagaria pela previsão perfeita das realizações futuras. Dessa forma o valor do EVPI é a diferença entre o valor da solução espere-e-veja (Wait and See – WS), valor ótimo do problema quando os eventos futuros são conhecidos, e a solução aqui-e-agora (*here-and-now*), dada pelo modelo estocástico de dois estágios apresentado na Seção 2.5, onde apenas a distribuição de probabilidade do evento é conhecida. A Equação 2.6 apresenta o cálculo do WS e a Equação 2.7 o cálculo do EVPI, onde  $\xi$  representa o cenário,  $x^*(\xi)$  a solução ótima do cenário e RP a solução do modelo estocástico.

$$WS = E_{\xi} \left[ \min_{x \in X} z(x, \xi) \right] = E_{\xi} [z(x^*(\xi), \xi)] \quad (6.6)$$

$$EVPI = |WS - RP| \quad (6.7)$$

Precificar o valor da informação perfeita pode não ser a medida mais adequada para comparação, uma vez que a solução espere-e-veja (WS) é impossível de ser realizada na prática. Outra opção de medida é calcular o valor da solução estocástica (*Value of the Stochastic Solution* - VSS) que é o benefício esperado pela consideração da incerteza no problema ou a perda do agente que opta pelo modelo determinístico.

O VSS pode ser calculado pela diferença entre o valor esperado do resultado (*Expected Result of Expected Value Solution* - EEEV), solução utilizando a solução



do problema para o cenário esperado, e a solução do modelo estocástico. A Equação 2.8 apresenta o cálculo do EVV e a Equação 2.9 o cálculo do VSS, onde  $\bar{\xi} = E[\xi]$  e  $x^*(\bar{\xi})$  a solução ótima para o cenário esperado.

$$EVV = E_{\xi} [z(x^*(\bar{\xi}), \xi)] \quad (6.8)$$

$$VSS = |EEV - RP| \quad (6.9)$$

## 2.7 SAA - Aproximação por Média Amostral

Quando um planejamento de longo prazo é realizado, existe uma grande incerteza sobre o que irá acontecer no futuro, sendo possível, apenas, construir algumas suposições. Na programação estocástica de dois estágios esta dificuldade de previsão é traduzida na indefinição das realizações dos parâmetros de segundo estágio. Para representar corretamente estes valores é necessário definir cenários discretos, baseados nas distribuições de probabilidade dos parâmetros incertos. Como essas distribuições em geral são contínuas, um importante passo para garantir que o modelo obtenha soluções de qualidade será a geração da árvore de cenários.

Segundo Mitra (2006), se forem gerados poucos cenários, os modelos estocásticos não conseguirão representar de forma relevante as incertezas inerentes ao problema. Por outro lado, incorporar arbitrariamente qualquer incerteza, gerando uma grande quantidade de cenários, pode levar a dificuldades de processamento, ou mesmo a soluções irreais e/ou irrelevantes. Desta forma, para a boa utilização de um modelo estocástico, é fundamental a utilização de um bom método de geração de cenários para que a árvore gerada represente adequadamente as incertezas existentes. Os métodos para geração de cenários podem ser classificados em quatro: estatísticos, amostragem, simulação e redução de cenário (Mitra, 2006).

Os métodos estatísticos são utilizados de forma a obter a distribuição discreta que mais se ajuste aos dados reais/teóricos do problema. Esse ajuste é feito através de propriedades estatísticas como momentos centrais e correlação. Os principais métodos estatísticos para geração de cenários são: correspondência de momentos e propriedades estatísticas (Keefer, 1994; Høyland & Wallace, 2001),

análise das principais componentes (PCA) (Smith, 2002), regressão e suas variantes (Draper & Smit. 1998).

Os métodos de amostragem têm como princípio tomar amostras de uma dada função de densidade de probabilidade, de forma a representar os cenários e suas probabilidades. Nesse tipo de método é preciso pensar o menor número de amostras necessárias para que as propriedades estatísticas sejam mantidas. Alguns exemplos desse tipo de método são: Monte Carlo (Doucet et al., 2000), Bootstrap (Efron & Tibshirani, 1997), Monte Carlo baseada em cadeia de Markov (Jerrum & Sinclair, 1996), *Importance Sampling* (Dempster & Thompson, 1999) e *Internal Sampling* (Dantzig & Infanger, 1992).

Os métodos de simulação envolvem um processo matemático com utilização de números aleatórios (exemplo, movimento Browniano). Como resultado, as variáveis aleatórias geram uma árvore de cenário onde cada cenário tem igual probabilidade de ocorrência. Alguns métodos em destaque são: simulação de processos estocásticos, movimento Browniano geométrico (Freedman, 1983; Bollerslev, 1986), Vetor Auto-regressivo (VAR) (Fair e Shiller, 1990), ARMA (Box & Jenkins, 1976) e GARCH (Bollerslev, 1986; Engle, 1982).

Existem alguns outros métodos para lidar com as incertezas que têm tido bastante destaque no mundo acadêmico, são eles as redes Neurais (Bollerslev, 1986), *clustering* (Gulpinar & Settergren, 2004), métodos híbridos e redução de cenários.

A técnica de aproximação por média amostral (SAA) é um método para calcular o valor esperado da função objetivo, em otimizações estocásticas, utilizando simulação de Monte Carlo e garantindo soluções com qualidades estatisticamente certificadas. A técnica consiste em otimizar, repetidas vezes, um conjunto de amostras aleatórias de cenários, gerando diferentes candidatos para a solução do problema. Em seguida, estes candidatos serão avaliados utilizando-se novos cenários de forma a permitir o cálculo de suas propriedades estatísticas, avaliando sua qualidade quanto à otimalidade do problema.

Esta técnica tem sido utilizada na literatura como técnica de solução para dificuldade em se lidar com uma grande quantidade de cenários nos modelos estocásticos. Uma vantagem dessa técnica é a possibilidade de utilização da paralelização computacional, uma vez que cada conjunto de cenários pode ser

otimizado de forma independente. Dessa forma é possível acelerar bastante o tempo de obtenção de solução, o que, dependendo do problema abordado, pode ser de suma importância.

Linderot & Wright (2003) aplicaram a técnica de SAA a diferentes modelos de programação linear utilizando paralelização computacional para acelerar a obtenção de soluções. Kleywegt et al. (2002) apresentaram algumas considerações importantes para o método quando aplicado em problemas combinatórios e fornecem alguns exemplos numéricos. Em Verweij et al. (2003), o SAA foi aplicado em problemas de roteamento de veículos e permitiu a obtenção de soluções com gap de 1% em média, mesmo utilizando-se um número grande de cenários.

No tema de projeto da cadeia de suprimento, um dos primeiros trabalhos publicados foi de Santoso et al. (2005) que propôs um método de utilização dessa técnica para problemas específicos em desenho de cadeia de suprimentos, aplicando-o a um estudo real na indústria de bebidas. Recentemente, Schütz et al. (2009) aplicaram a metodologia para o desenho da cadeia de produtos alimentares e Oliveira (2012), para o planejamento da cadeia de petróleo.

O SAA pode ser definido como um problema de dois estágios onde todos os cenários possuem igual probabilidade. Desta forma as Equações 2.1 e 2.4 podem ser reescritas da forma como mostrado nas Equações 2.10 e 2.11, respectivamente, onde  $\mathbf{p}_{sc} = \frac{1}{N}$  e  $\mathbf{SC} = \mathbf{N}$ .

$$\mathbf{v}^* = \min_{\mathbf{x} \in X} \{f(\mathbf{x}) = \mathbf{c}^T \mathbf{x} + Q(\mathbf{x}) = E_{\Omega} [F(\mathbf{x}, \xi)]\} \quad (6.10)$$

$$\hat{\mathbf{v}}_N(\hat{\mathbf{x}}) = \min_{\hat{\mathbf{x}} \in X} \left\{ \bar{f}_N(\hat{\mathbf{x}}) = \mathbf{c}^T \hat{\mathbf{x}} + \left[ \sum_{n=1}^N \frac{Q(\hat{\mathbf{x}}, \xi_n)}{N} \right] = \left[ \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N F(\hat{\mathbf{x}}, \xi_n) \right] \right\} \quad (6.11)$$

Se  $\mathbf{N}$  pudesse ter tamanho infinito, então  $\hat{\mathbf{v}}_N = \mathbf{v}^*$ . Como isto não é possível e  $\mathbf{N}$  tem tamanho finito,  $\hat{\mathbf{v}}_N$  é uma aproximação para o problema real  $\mathbf{v}^*$ , podendo ser tratada como uma variável aleatória. É possível provar que, conforme o tamanho de  $\mathbf{N}$  aumenta, a solução de número  $\hat{\mathbf{v}}_N$  converge para o seu valor real de forma exponencial (Kleywegt et al., 2002), possibilitando a utilização de um modesto tamanho de cenários nos experimentos de SAA.

Assumindo que o problema seja resolvido utilizando, para cada instância um critério de parada de gap de otimalidade do simplex  $\delta$ , um gap de otimalidade para o problema de  $\epsilon$  e níveis de confiança com  $(1 - \alpha)$ , o menor número de cenários necessários será de  $N_{min}$ . De forma a calcular esse número, Kleywegt et al. (2002) apresentam uma formulação representada na Equação 2.12, onde  $\sigma_{max}^2$  é a variância máxima e  $Y$  é o número de possibilidades de ocorrências de primeiro estágio.

$$N_{min} \geq \frac{3\sigma_{max}^2}{(\epsilon - \delta)^2} \log\left(\frac{Y}{\alpha}\right) \quad (6.12)$$

Entretanto, muitas vezes este número mínimo de cenários pode ser muito conservador e superestimado. Outra forma para obter esse número mínimo de cenários necessários é utilizando o nível da solução requerida (Shapiro & Homem-de-Mello, 1998; You et al., 2009; Oliveira & Hamacher, 2012), que pode ser calculado utilizando-se o intervalo de confiança do valor esperado da função objetivo (Equação 2.13) e do estimador da variância,  $\hat{\sigma}_N^2$  (Equação 2.14), da amostragem de Monte Carlo.

$$\left[ \hat{f}_N(x) - \frac{z_{\alpha/2} \hat{\sigma}_N}{\sqrt{N}}, \hat{f}_N(x) + \frac{z_{\alpha/2} \hat{\sigma}_N}{\sqrt{N}} \right] \quad (6.13)$$

$$\hat{\sigma}_N^2 = \frac{1}{(N-1)} \sum_{n=1}^N [\hat{f}_N(x) - (c^T x + Q_i(x, \xi_n))]^2 \quad (6.14)$$

Onde  $N$  é o número de cenários e  $z_{\alpha/2}$  é a distribuição normal padrão onde  $P\left(-\frac{\alpha}{2} < Z < \frac{\alpha}{2}\right) = 1 - \alpha$ . Definindo o percentual de desvio da função objetivo e  $\beta \in [0, 1]$ , desvio máximo aceitável para o intervalo de confiança,  $N_{min}$  pode ser calculado pela Equação 2.15.

$$N_{min} \geq \left( \frac{z_{\alpha/2} \hat{S}_N}{(\beta/2) \bar{f}_N(x)} \right)^2 \quad (6.15)$$

Na prática, o experimento do SAA envolve replicações com diferentes amostras de mesmo tamanho. O procedimento pode ser dividido em quatro etapas (Santos et al., 2005).

O primeiro passo do algoritmo SAA consiste em gerar  $M$  amostras aleatórias de cenários de tamanho  $N$ , isto é,  $(\xi_1^j, \dots, \xi_N^j) | j = 1, \dots, M$ . Para cada amostra, um problema de SAA é resolvido resultando em  $M$  valores ótimos da FO,  $\hat{v}_N^j(\hat{x})$ , e variáveis de primeiro estágio,  $\hat{x}^j$ .

O segundo passo é calcular a média desses valores  $(L_{N,M})$ , e sua variância  $(\hat{s}_{N,M}^2)$ , de forma a obter um limite inferior estatístico para o problema. As Equações 2.16 e 2.17 apresentam os cálculos necessários para obtenção desses valores.

$$L_{N,M} = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M \hat{v}_N^j \quad (6.16)$$

$$\hat{s}_{N,M}^2 = \frac{1}{(M-1)} \sum_{j=1}^M (\hat{v}_N^j - L_{N,M})^2 \quad (6.17)$$

O terceiro passo consiste em fixar uma das soluções de primeiro estágio  $(\hat{x}^j)$  encontradas na primeira etapa e aplicá-las a um número  $T$  de cenários, tipicamente maior do que  $N$ , de forma a melhorar sua precisão. Dessa forma, será possível obter o estimador,  $U_T(\hat{x}^j)$ , para a média e o estimador,  $\hat{s}_T^2$ , para a variância do limite inferior do problema, conforme Equações 6.9 e 6.10.

$$U_T(\hat{x}^j) = \frac{1}{T} \sum_{i=1}^T F(\bar{x}^j, \xi_i) \quad (6.18)$$

$$\hat{s}_T^2(\hat{x}^j) = \frac{1}{(T-1)} \sum_{i=1}^T (c^T \bar{x}^j + Q_i(\bar{x}^j, \xi_i) - U_T)^2 \quad (6.19)$$

O quarto e último passo será calcular o com o estimador,  $GAP_{N,M,T}(\bar{x}^j)$ , para a média e o  $\hat{s}_{N,M,T}^2(\bar{x}^j)$ , para a variância do gap de otimalidade da solução  $(\bar{x}^j)$ . As Equações 6.11 e 6.12 descrevem como os cálculos deverão ser feitos.

$$GAP_{N,M,T}(\bar{x}^j) = U_T - L_{N,M} \quad (6.20)$$

$$\hat{s}_{N,M,T}^2(\bar{x}^j) = \hat{s}_T^2 + \hat{s}_{N,M}^2 \quad (6.21)$$

A Tabela 2.1 resume o calculo de média, desvio padrão amostral e intervalo de confiança de nível  $(1 - \alpha)$  para todos os parâmetros do SAA.

**Tabela 2.1: Resumo de fórmulas do SAA**

Parâmetro	Média	Desvio Padrão	Intervalo Confiança
<i>Limite Inferior</i>	$L_{N,M} = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M \hat{v}_N^j$	$\hat{s}_{N,M}^2 = \frac{1}{(M-1)} \sum_{j=1}^M (\hat{v}_N^j - L_{N,M})^2$	$\left[ L_{N,M} - \frac{z_\alpha \hat{s}_{N,M}}{\sqrt{M}}, L_{N,M} + \frac{z_\alpha \hat{s}_{N,M}}{\sqrt{M}} \right]$
<i>Limite Superior</i>	$U_{N,T} = \frac{1}{T} \sum_{n=1}^T F(\bar{x}^j, \xi_n)$	$\hat{s}_{N,T}^2 = \frac{1}{(T-1)} \sum_{i=1}^T (c^T \bar{x}^j + Q_i(\bar{x}^j, \xi_i) - U_T)^2$	$\left[ U_{N,T} - \frac{z_\alpha \hat{s}_T}{\sqrt{T}}, U_{N,T} + \frac{z_\alpha \hat{s}_T}{\sqrt{T}} \right]$
<i>Gap</i>	$GAP_{N,M,T}(\bar{x}^j) = U_T - L_{N,M}$	$\hat{s}_{N,M,T}^2(\bar{x}^j) = \hat{s}_T^2 + \hat{s}_{N,M}^2$	$\left[ GAP_{N,M,T} - \frac{z_\alpha \hat{s}_{N,M,T}}{\sqrt{T}}, GAP_{N,M,T} + \frac{z_\alpha \hat{s}_{N,M,T}}{\sqrt{T}} \right]$
$\hat{f}_{\bar{N}}(x)$	$\bar{f}_{\bar{N}}(x) = \frac{1}{\bar{N}} \sum_{j=1}^{\bar{N}} f_{\bar{N}}^j(x, \xi_j)$	$\hat{s}_{\bar{N}}^2 = \frac{1}{(\bar{N}-1)} \sum_{j=1}^{\bar{N}} (\bar{f}_{\bar{N}}(x) - f_{\bar{N}}^j(x, \xi_j))^2$	$\left[ \bar{f}_{\bar{N}}(x) - \frac{z_\alpha \hat{s}_{\bar{N}}}{\sqrt{\bar{N}}}, \bar{f}_{\bar{N}}(x) + \frac{z_\alpha \hat{s}_{\bar{N}}}{\sqrt{\bar{N}}} \right]$

### 3

## O Hidrogênio

A utilização de energia é cotidiana na vida moderna. Desde o início dos tempos, o homem já utilizava o fogo para cozinhar. Hoje, porém, a humanidade a utiliza em todos os momentos para seu conforto, seja para produção industrial, transporte, ou utilizando eletricidade em lâmpadas, geladeiras e computadores. Todos estão habituados a possuir calefação, refrigeração, iluminação e comunicação em suas casas.

Com o aumento da população e a demanda energética sempre crescente, as fontes de produção de energia foram sendo substituídas por fontes mais eficientes (Ausubel, 2000) e, recentemente, há um grande esforço da humanidade em utilizar energias sustentáveis, isto é, econômicas, eficientes e limpas (Hefner III, 2002). A madeira antes utilizada foi substituída pelo carvão, que foi substituído pelo óleo, pelo petróleo, pelo gás natural e, hoje, o hidrogênio vem vislumbrando um cenário de crescimento.

O recente interesse pelo hidrogênio é justificado pelo seu processo limpo de transformação de energia química em térmica e/ou elétrica onde o resíduo final é água. Além disso, ele é abundante na natureza estando presente em inúmeras fontes como: combustíveis fósseis, biomassas e, claro, na água. Nesse capítulo será discutido o que vêm sendo pesquisado nessa área. A Seção 3.1 apresenta a descoberta e evolução deste combustível, seguida, na Seção 3.2, pela descrição de alguns projetos de hidrogênio desenvolvidos. A Seção 3.3 descreve a cadeia de suprimento do hidrogênio, bem como as tecnologias existentes para produção armazenagem e transporte do mesmo, enquanto a Seção 3.4 apresenta as vantagens da utilização do hidrogênio. Por último, a Seção 3.5 apresenta os modelos desenvolvidos para o projeto da cadeia de hidrogênio.

### 3.1 O Surgimento do Hidrogênio como Forma de Energia

Apesar de ser o mais abundante dos elementos químicos, correspondendo a 75% da massa elementar do universo, o hidrogênio foi descoberto apenas no início do século XVI pelo alquimista Paracelsu (Hampel, 1968), e somente 200 anos depois, recebeu seu nome pelo químico Antoine Laurent Lavoisier (Stwertka, 2012).

Em 1671, Robert Boyle descobriu que a reação entre ferro e ácidos produzia o gás hidrogênio e, em 1781, foi descoberto que a queima desse gás resultava em água. Em 1806, François Isaac de Rivaz inventou o primeiro dispositivo de combustão interna movida por queima de hidrogênio e oxigênio. Em 1783, o primeiro balão com gás hidrogênio voou, provendo a primeira maneira confiável de viagem aérea. Em 1852, o primeiro dirigível decolou e, em 1900, surgiu o Zeppelin. Em 1898, James Deward liquefez o hidrogênio e, no ano seguinte produziu o hidrogênio sólido (Emsley, 2011).

Em 1838, o cientista alemão Christian Friedrich Schönbein descobriu os princípios de funcionamento da célula combustível, que foi demonstrado no ano seguinte por William Robert Grove. Mas, somente em 1950, a primeira célula de combustível foi produzida. Nos anos 70, as primeiras células foram utilizadas pela *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) para produzir eletricidade e água potável nas espaçonaves do Projeto Apollo (Srinivasan et al., 1999).

Durante a segunda guerra mundial, o interesse pelo hidrogênio cresceu muito, mas, com o fim da guerra e a redução do custo do petróleo, seu desenvolvimento foi freado. Somente com o choque do petróleo em 1973, a conscientização ambiental e o desejo de segurança energética fizeram com que os governos dos Estados Unidos, Europa e Japão voltassem a ter interesse no hidrogênio e vários programas foram criados (Hoffmann, 2002a).

### 3.2 Projetos do Hidrogênio

Para que o hidrogênio seja utilizado em larga escala ainda são necessários estudos e investimentos que possibilitem a superação de obstáculos técnicos,



econômicos, ambientais e de infraestrutura. Com o objetivo de realizar estes estudos, vários projetos piloto vêm sendo desenvolvidos em todo o mundo.

A União Europeia criou o projeto *Hyways* (CE, 2013), que teve como objetivo analisar os impactos na indústria, infraestrutura, economia, sociedade e meio ambiente para viabilizar a introdução do hidrogênio como fonte de energia na Europa. Tal projeto funcionou de 2004 a 2007 e foi o ponto de partida para outros projetos.

Entre 2005 e 2008, o projeto *New Methods for Superior Integrated Hydrogen Generation System* (NEMESIS) foi criado como parceria público-privada, apoiada pela União Europeia. Seu objetivo era desenvolver um gerador compacto de hidrogênio que funcionasse tanto com hidrogênio líquido quanto gasoso (Cordis, 2013). O projeto foi um sucesso e por isso o NEMESIS2+ foi criado, agora com o objetivo de facilitar a introdução dos carros movidos a hidrogênio através da descentralização da produção de hidrogênio. Entre 2012 e 2014, deverá ser desenvolvido um método de geração em pequena escala de hidrogênio utilizando diesel e biodiesel, sendo o seu maior objetivo a redução de custos e aumento da eficiência de conversão (DLR, 2013).

O *Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking* (FCH-JU, 2013) foi estabelecido em 30 de maio de 2008 para acelerar o desenvolvimento e a implantação de células combustíveis e de tecnologias para produção do hidrogênio. O projeto surgiu como parceria público-privada entre a União Europeia, indústria e instituições de pesquisa, depois que União Europeia concluiu que o hidrogênio poderia significar uma importante forma de energia nova e limpa para Europa. Porém, para que ela tenha grande penetração no mercado, é preciso uma união dos objetivos e estratégias de todos os *stakeholders* envolvidos no processo.

Na Inglaterra foi criado o *London Hydrogen Partnership* (LHP, 2013), em 2002, para desenvolver uma rede para os *stakeholders* de células combustível de hidrogênio (HFC – *Hydrogen Fuel Cells*) e ajudar na produção de tecnologias de HFC em Londres.

De novembro de 2001 a maio de 2006, Londres fez parte do *Clean Urban Transport for Europe* (CUTE). Esse projeto reuniu nove cidades da Europa, envolvendo universidades, companhias de transporte, fornecedores de hidrogênio e fabricantes de ônibus, e tinha como objetivo realizar um estudo demonstrando a

viabilidade e eficiência de um transporte público limpo (Binder et al., 2006). O estudo acabou, mas dez cidades em três continentes estenderam o projeto por mais três anos, denominando-o *HyFLEET: CUTE* (HyFLEET: CUTE, 2009).

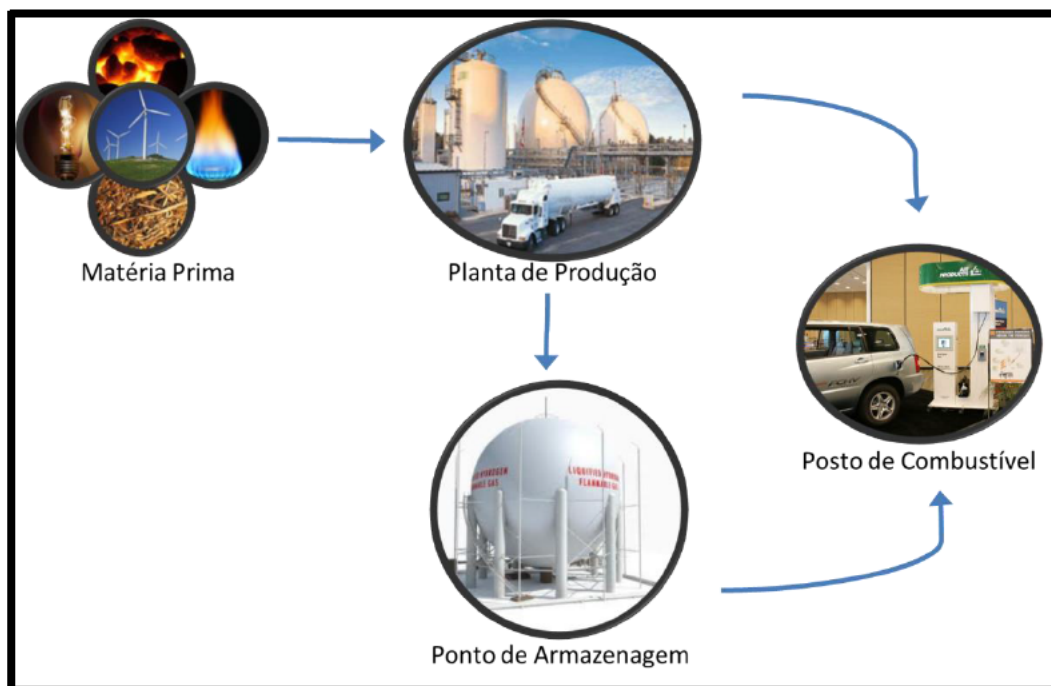
Em 2011, como resultado do CUTE, os ônibus movidos a hidrogênio se juntaram a frota de Londres. Atualmente, eles percorrem a rota RV1 entre o Convent Garden e a Tower Gateway Station. Tal iniciativa faz parte da aposta para redução de emissão de CO<sub>2</sub> (Transport for London, 2013). Essa rota foi escolhida por ser movimentada, de forma a dar visibilidade ao projeto tanto pelos moradores como pelos turistas.

### 3.3 Cadeia de Hidrogênio

A cadeia de hidrogênio é composta por quatro tipos de nós: fornecedores de matéria prima (locais ou internacionais), plantas de produção, pontos de armazenagem e postos de abastecimento. Estes elos podem ser conectados por diferentes arcos de modais de transporte. Alguns trabalhos na literatura avaliam separadamente cada um dos elos da cadeia, alguns pelo aspecto econômico (Padró & Putsche, 1999; Amos, 1998) outros pelo aspecto ambiental (Sabio et al., 2012).

Apesar da cadeia ser composta sempre pelos mesmos tipos de nós (Fornecedor, Planta, Armazém e Posto), seu desenho poderá ser bastante diferente. Pode haver uma produção centralizada, onde apenas uma indústria de grande porte é construída para suprir a demanda de todos os locais, ou serem construídas várias plantas de produção de menor porte de forma a baratear o transporte do produto. A escolha do desenho dependerá de aspectos da demanda: qual é sua proporção, previsão de crescimento, sazonalidade e distribuição geográfica (Ogden, 2004).

O início da cadeia será sempre compreendido pelo fornecedor que enviará a matéria prima para a planta de produção. Na planta, a matéria prima será transformada em produto final que, então, será levado para os pontos de armazenagem ou diretamente para os postos de abastecimento. Do armazém, o produto seguirá até o seu destino final, o posto de abastecimento. A Figura 3.1 mostra uma representação esquemática da cadeia de hidrogênio.



**Figura 3.1: Esquema da cadeia de hidrogênio (Fonte: Autora)**

O hidrogênio pode ser consumido e transportado em diferentes estados físicos: gasoso, líquido ou sólido. O estado do produto determinará qual deverá ser o seu meio de transporte e é fundamental para a determinação dos custos de investimento e operação da rede, impactando diretamente no custo das plantas, meios de transporte e operação destes. A escolha do estado irá depender da necessidade do consumidor e da viabilidade dos custos de transporte e armazenagem.

A seguir, cada um dos nós da rede é descrito de forma mais detalhada.

### **3.3.1. Fornecedores de Matéria Prima**

O hidrogênio, apesar de ser o elemento mais abundante do universo, precisa passar por um processo químico de separação e purificação de contaminantes antes de ser usado como combustível. Isto porque ele não existe na forma natural como o petróleo e carvão, estando sempre combinado com outros elementos, como oxigênio e carbono (Altork & Busby, 2010).

Diversos materiais podem ser utilizados no processo de produção do hidrogênio “puro”. Apesar de quase todo material conter hidrogênio em sua composição, as matérias primas comumente utilizadas são biomassa, gás metano, resíduos sólidos de fonte renováveis, e petróleo, carvão, gás natural e hidrocarbonetos em geral, de fontes não renováveis. Energias solar, eólica,

geotérmica, hidroelétrica e nuclear também podem ser utilizadas no processo de eletrólise da água de forma a produzir o hidrogênio (Conte et al., 2001).

### 3.3.2. Plantas de Produção

Apesar de o hidrogênio poder ser obtido a partir de uma vasta gama de matérias primas, cada uma delas precisa de um tipo diferente de processo de transformação, o que leva a necessidade de desenvolvimento de diferentes tecnologias. Dessa forma, é preciso considerar um tipo de planta diferente para cada tipo de matéria prima.

A produção pode ser de média a grande escala, sendo centralizada em um único local com plantas dedicadas à produção; ou em pequena escala, sendo produzida nos locais de consumo. Segundo EERE (2013) a produção em larga escala tem a vantagem de ser mais barata. Entretanto o transporte e a distribuição do hidrogênio ainda possuem uma série de dificuldades logísticas e tecnológicas, sendo preferível produzir próximo ao ponto de consumo, evitando longas distâncias de transporte do produto final. Por fim, eles concluem que a produção descentralizada deverá ser a mais indicada enquanto o hidrogênio estiver sendo introduzido no mercado, pois o ganho com a economia de escala não compensa o custo de transporte, uma vez que a produção ainda é muito reduzida. Cada tipo de planta possui um limite mínimo de operação e uma capacidade máxima de produção. Além disso, cada planta possui um custo de instalação e de produção diferenciado.

Estudos vêm se intensificando na área de tecnologia para produção de hidrogênio. O primeiro método de produção descoberto foi através da utilização de água como matéria prima. Primeiramente, foi utilizada a técnica de eletrólise e em seguida injeção de calor para craqueamento da molécula. Tanto o calor como a eletricidade podem ser gerados a partir de fontes não renováveis ou renováveis.

Mais tarde foi desenvolvido o processo de gases reformados utilizando como fonte o carvão, gás natural e petróleo e, em seguida, foi utilizada a gaseificação de biomassa e resíduos. Com o barateamento da energia solar e eólica surgiu o interesse na produção do hidrogênio por estas duas fontes (Romm, 2004).

Outra tecnologia que parece promissora é a de sequestro de carbono (*Carbono Capture and Storage – CCS*). Nela, o gás carbônico (CO<sub>2</sub>) gerado na

produção de hidrogênio a partir de origem fóssil seria injetado de volta no solo, deixando o método mais limpo (Service, 2004).

Por último, a produção através da energia nuclear vem ganhando espaço. Existem inúmeros métodos de produzir  $H_2$  utilizando essa fonte (Yildiz & Kazimi, 2006) que produz zero emissão de gases estufas e, por isso, é defendida por muitos.

Atualmente, o método mais barato de produção, e também o mais comum, é através do vapor de metano reformado do gás natural. Metade do hidrogênio produzido no mundo e 95% do hidrogênio produzido nos Estados Unidos provêm desse método (EERE, 2010). Entretanto, os custos de produção ainda precisam ser reduzidos para que o hidrogênio venha a ser competitivo no mercado de combustível.

### **3.3.3. Pontos de Armazenagem**

Uma vez liberado, o hidrogênio se torna uma fonte limpa de energia que pode ser entregue ao usuário. Entretanto, são necessários pontos de armazenagem para compensar flutuações existentes na demanda. O armazenamento do hidrogênio não é simples, e exige equipamentos sofisticados. O hidrogênio pode ser armazenado nos três estados físicos: gasoso, líquido e sólido.

Para o armazenamento em estado gasoso, a melhor tecnologia é a de gás comprimido, onde são utilizados cilindros/vasos pressurizados (pressão entre 100 e 200 bar) (Ogden, 1999a). Caso a quantidade a ser armazenada seja muito grande, podem, também, ser utilizadas cavernas subterrâneas de sal. Apesar da simplicidade do método e de não haver perdas significativas de energia ao longo do tempo (há perda apenas na compressão), o gás de hidrogênio, mesmo comprimido, possui um volume e peso excessivamente elevado (Romm, 2004), sendo utilizado apenas onde há espaço disponível para seu armazenamento ou quando as distâncias a serem percorridas são curtas, por exemplo, automóveis utilizados apenas dentro de estabelecimentos comerciais e industriais.

Devido a dificuldades de armazenagem do hidrogênio na forma gasosa, as atenções foram voltadas para o hidrogênio liquefeito, que precisa de menos espaço para ser armazenado. Entretanto, como o hidrogênio em condições naturais é gasoso, foi preciso um grande avanço no conhecimento das tecnologias de manipulação e utilização para que ele pudesse passar por esse processo de

transformação física. Hoje, as aplicações do hidrogênio líquido são inúmeras e na indústria automotiva são utilizadas pilhas de células de combustível.

Para o armazenamento na forma líquida, é necessário um recipiente a vácuo de materiais não reagentes com o hidrogênio, impedindo que esse se combine antes do esperado, o que tornaria inútil sua utilização como combustível. Além disto, é fundamental que o recipiente seja refrigerado, uma vez que seu estado natural é o gasoso para temperaturas superiores a  $-253^{\circ}\text{C}$ , em condição normal de pressão (Taylor et al., 1986; Carpetis, 1988). Desta forma, o processo torna-se muito custoso tanto no quesito financeiro como na eficiência energética (cerca de 40% da energia é perdida) (Dutton, 2002).

Apesar destas desvantagens, o hidrogênio líquido ainda é a forma mais utilizada para combustível. Isso porque necessita de pequenos espaços para armazenamento de grandes quantidades de energia, sendo ideal para a aplicação em automóveis e aviões, pois os tanques podem ser pequenos e leves.

Outra vantagem em se utilizar o hidrogênio líquido é que os riscos de explosão são menores. No caso de haver fuga, este irá se aquecer de forma que mais lentamente evaporará e será libertado sob forma gasosa na atmosfera, enquanto o hidrogênio gasoso comprimido tem tendência a causar explosões, pois é liberado rapidamente.

Os sistemas de armazenamento em formato sólido (Amos, 1998; Carpetis, 1988; Padró & Putsche, 1999) vêm sendo estudados recentemente e ainda não existe uma opinião conclusiva de qual seja o melhor método para utilização, mas eles são a grande esperança para o futuro. Para o armazenamento na forma sólida, o hidrogênio pode ser combinado com metais, carbono ou outros materiais formando, por exemplo, hidretos metálicos ou alcalinos.

O laboratório nacional Lawrence Livermore (USA) reduziu o volume e peso dos tanques de hidrogênio líquido e gasoso em 1/3 (Smith, 1995). Outros métodos vêm sendo desenvolvidos como a armazenagem em nanotubos de carbono e microesferas de vidro de alta pressão e a utilização de metais híbridos vem sendo aprimorada (Ogden, 1999a).

Assim como as plantas, os armazéns possuem limites mínimos e máximos de armazenagem diferenciados por tipo. Seus custos de instalação e operação também são diferenciados. Além disso, o hidrogênio pode ficar armazenado por

algum tempo de forma a garantir o abastecimento da demanda, mesmo quando há pequenas flutuações desta.

### **3.3.4. Postos de Abastecimento**

Os postos para abastecimento de hidrogênio são muito similares aos postos de gasolina e diesel e, por isso, postos regulares já existentes podem ser adaptados para oferecer também o hidrogênio como opção de combustível. O único investimento necessário são bombas especializadas e armazéns para estocagem de hidrogênio (Simbeck & Chang, 2002).

### **3.3.5. Transporte do Hidrogênio**

Como visto anteriormente, o hidrogênio pode estar em diferentes estados físicos. Desta forma, uma vasta gama de modais pode ser utilizada para seu transporte como dutos, trens, caminhões, etc. (Amos, 1998).

Existe uma grande dificuldade no transporte desse produto e os custos relativos a transporte são altos. Em 2005, 83% do hidrogênio era produzido no próprio local de consumo de forma a evitar as complicações de transporte desse produto (Santos & Santos, 2005).

A forma mais comum de transporte ainda é através de caminhões com cilindros e equipamentos de criogênicos. Dutos também são utilizados, mas apenas para pequenas distâncias, devido ao alto poder de corrosão do hidrogênio. Para grandes distâncias, a forma líquida é mais indicada para o transporte. (Ogden, 1999a)

Os caminhões de hidrogênio líquido suportam de 360 a 4 300 kg enquanto os de gás comprimido suportam tipicamente de 63 a 180 kg, variando de acordo com o número de cilindros. Já os trens possuem capacidade maior de transporte, pois, apesar de utilizarem as mesmas tecnologias, os trens não estão sujeitos a limites de carga das estradas. Um trem consegue carregar de 2 300 a 9 072 kg de hidrogênio líquido e de 180 a 454 kg do gasoso (Amos, 1998).

Cada modal de transporte possui capacidades de operação mínima e máxima e custos de operação e aquisição diferenciados. Segundo Yang & Ogden (2007) e Qadrdan et al. (2008), os principais fatores que irão determinar o melhor meio de transporte são: quantidade a ser transportada, densidade da demanda, aplicação e distância entre planta de produção e consumidor.

### 3.4 Vantagens e Desvantagens do Hidrogênio

O hidrogênio é o elemento químico mais simples do planeta. Com apenas um próton e um elétron, ele é o elemento mais leve e, por isso, possui um alto grau de dispersão. Além de ser uma possível fonte de energia, o hidrogênio também é utilizado em diversos segmentos industriais como petroquímicos, siderúrgicos, farmacêutico, espacial, alimentício, eletrônica e de metais (EERE, 2013). Dentre estes setores, ganham destaques os processos de produção de fertilizantes nitrogenados (amônia), refino de petróleo (hidro-craqueamento) e produção de metanol.

A molécula de hidrogênio ( $H_2$ ) pode ser utilizada para geração de energia tanto utilizando mecanismos de combustão interna como em células combustíveis. Apesar da produção de energia pelo processo de combustão interna ser mais simples, dado que a mecânica já está desenvolvida e difundida no mercado, a célula combustível tem uma maior eficiência e menor custo de manutenção, além de produzir menos barulho e ter grau zero ou quase zero de emissões de poluentes (Hoffmann, 2002b). O gás natural ( $CH_4$ ) ainda é a matéria prima mais utilizada na produção de hidrogênio, mas ele também pode ser obtido através de fontes renováveis contribuindo, assim, para a mitigação dos danos ambientais associados ao aquecimento global.

Na célula combustível, o hidrogênio tem seus próton e elétrons separados, antes de reagirem com o oxigênio ( $O_2$ ) para produzir água ( $H_2O$ ). Neste processo, será gerado calor e corrente elétrica de forma limpa, eficiente e silenciosa, uma vez que o processo não tem queima de combustível (Cho, 2004).

Com o crescimento da demanda por energia e a necessidade de redução de gás carbônico ( $CO_2$ ) e outros poluentes oriundos da queima de combustíveis fósseis, é necessário diversificar a matriz energética. Outra necessidade de diversificação é pela segurança, uma vez que 80% das reservas são controladas pelos países da Organização dos Países Exportadores de Petróleo (OPEP), os quais estão sujeitos a instabilidades políticas (BP, 2005).

Além disso, a eficiência do hidrogênio é maior. Plantas de geração de energia baseadas em combustão apresentam eficiência de 30% a 40%, enquanto as de hidrogênio têm eficiência de 60% e, se as turbinas forem combinadas para



também gerar calor, a eficiência passa a ser de 85%. Nos carros, a eficiência passa de 30%, utilizando gasolina, para 40% a 60%, utilizando hidrogênio.

Apesar de todas as vantagens apresentadas para o hidrogênio, ele ainda precisa alcançar um maior grau de maturidade tecnológica e comercial de forma a se estabelecer no mercado. Para que o hidrogênio possa ser utilizado em grande escala no mercado, o carro movido a hidrogênio precisa alcançar metas de eficiência, preço, durabilidade, autonomia de percurso, funcionamento em baixas temperaturas e tempo de abastecimento. A Figura 3.2 apresenta a evolução de cada um dos quesitos básicos das metas, desde 2002 até a previsão de que todas as metas tenham sido alcançadas em 2015 (BTI, 2011).

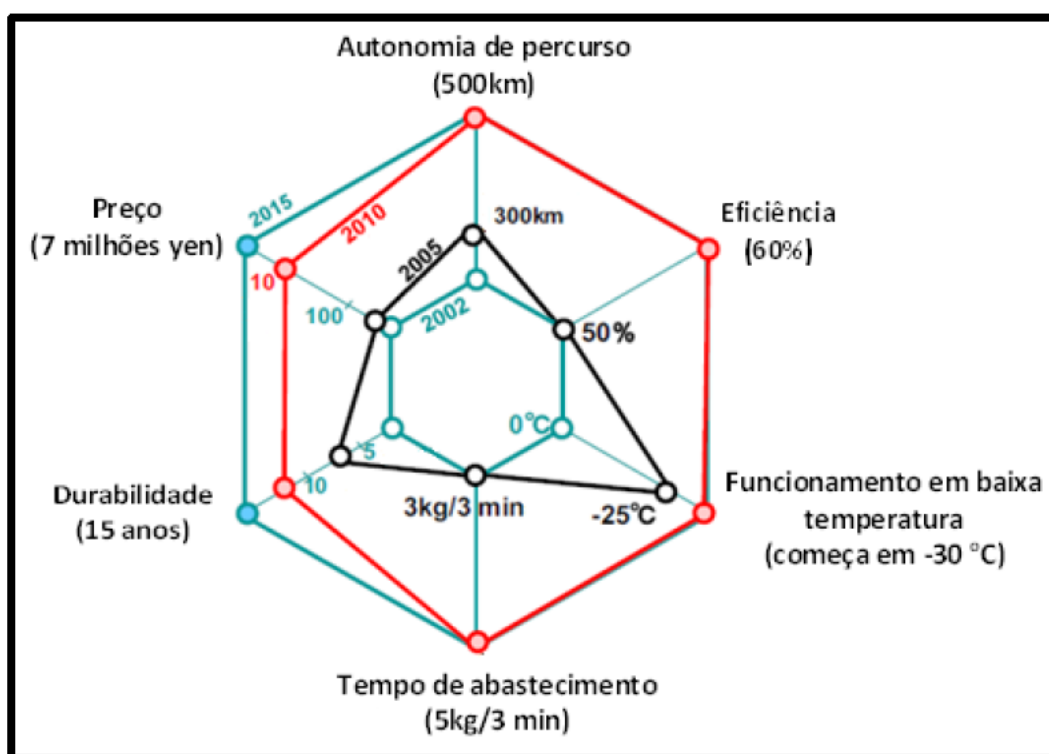


Figura 3.2: Evolução dos pilares dos veículos movidos a hidrogênio (BTI, 2011)

Do ponto de vista da indústria automotiva, já existe um grau de maturidade bastante elevado das tecnologias. Apesar das metas de preço e durabilidade ainda não terem sido alcançadas, sua previsão é para 2015. Entretanto, a utilização do  $H_2$  em grande escala, além de depender da evolução de seus veículos, depende da evolução da cadeia de suprimentos necessitando de diversos avanços em cada um de seus elos.

Em 2001, nos Estados Unidos, foi realizada uma reunião com participação de representantes da indústria de energia, universidades, organizações ambientais,

agências estaduais e federais e laboratórios nacionais com o objetivo de discutir o potencial de sistemas de hidrogênio para o futuro energético daquele país (Combs, 2008; US Department of Energy, 2002). As cinco principais conclusões da reunião foram:

- O hidrogênio teria potencial para resolver os dois maiores desafios energéticos dos EUA que eram: redução da dependência de importação de petróleo e redução de emissão de gases poluentes e do efeito estufa.
- O hidrogênio forneceria uma solução para o futuro, mas a transição completa para uma economia baseada em hidrogênio poderia levar décadas.
- A transição para uma economia baseada em hidrogênio já teria começado, dado que já era possível produzir e transportar hidrogênio de forma limpa, acessível, segura e conveniente.
- O desenvolvimento de tecnologias para sistemas de energia de hidrogênio deveria ser acelerado, principalmente para reduzir custos de produção, diminuir o volume e peso dos dispositivos de armazenagem e reduzir o custo de células combustíveis de forma a torná-las competitivas.
- Existia um problema de procedência no quesito de desenvolvimento de uma infraestrutura para a cadeia do hidrogênio, pois mesmo que a tecnologia do hidrogênio fosse desenvolvida, este combustível não estaria disponível tão facilmente como a gasolina ou gás natural.

Um relatório de 2006 do Departamento de Energia dos Estados Unidos (DOE, 2006) apresenta a evolução que cada um dos segmentos da cadeia precisa passar até chegar à maturidade tecnológica. A Figura 3.3 mostra o cronograma e marcos definidos pelo departamento de energia dos EUA que viabilizariam a transição para uma economia de hidrogênio.

Com os dados anteriormente apresentados, pode-se dizer que todos os quatro segmentos apresentados já se encontram na terceira etapa de evolução, previstas apenas para 2020, mostrando que a evolução na cadeia vem ocorrendo mais rápido do que o previsto.

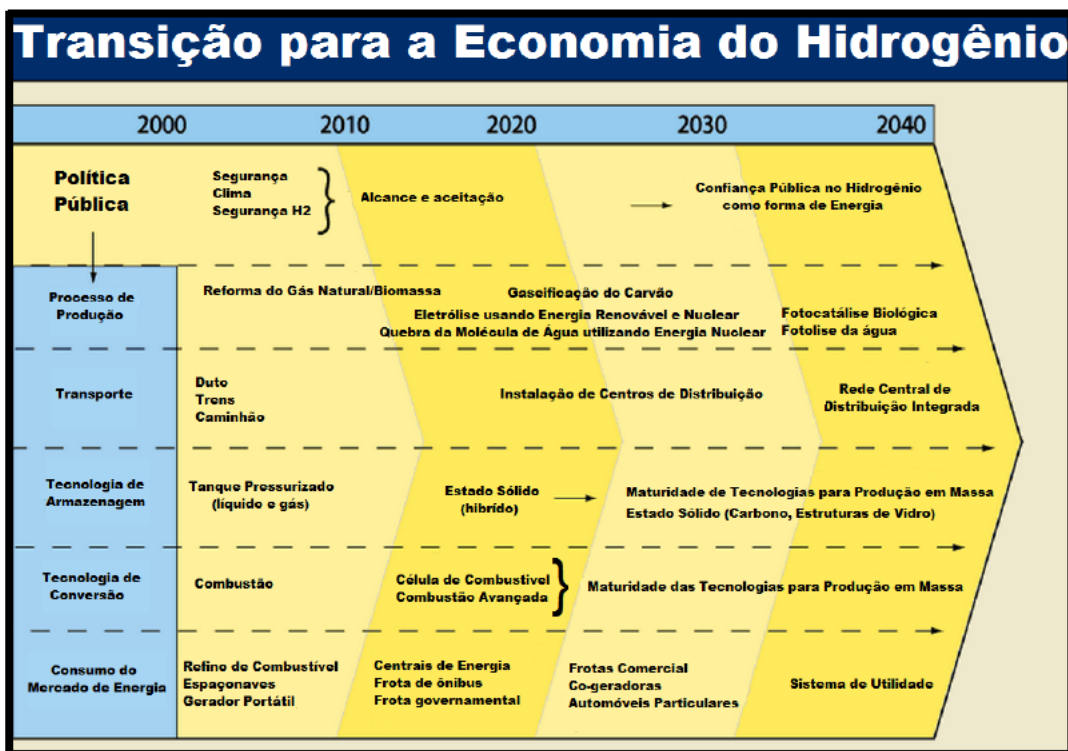


Figura 3.3: Possibilidades tecnológicas de evolução da cadeia (DOE, 2006)

Hoje, já existem plantas de produção instaladas utilizando gás reformado, eletrólise e energia eólica. A geração de hidrogênio através da quebra da molécula de água por energia nuclear e fotovoltaica já é tecnologicamente possível, mas seu processo ainda é muito caro sendo inviável economicamente. Seu armazenamento pode ser feito nos três estados físicos. Para o transporte, existem caminhões criogênicos e cilindros pressurizados, mas ainda não existem redes de duto.

O processo de conversão também já está bem maduro. Isto é comprovado pelas inúmeras aplicações existentes utilizando hidrogênio, células de combustível e motores de combustão. Os projetos apresentados mostram que já existem algumas frotas localizadas de ônibus e carros particulares que utilizam estas tecnologias, mas ainda será preciso cumprir algumas etapas para que o hidrogênio seja disseminado no mercado.

### 3.5 Modelos Matemáticos para Cadeias de Hidrogênio

Definir o melhor projeto para uma cadeia de suprimentos de hidrogênio não é uma tarefa fácil. Primeiro, pela variedade de tecnologias existentes, resultando em diversos processos e atividades. Segundo, por ser um combustível novo no

mercado, a previsão de demanda é muito difícil de ser realizada. Prever a penetração desse novo combustível e o avanço das tecnologias é uma tarefa difícil. Em trabalhos como o de Ogden (2004), Hart et al. (2000) e NRC (2004) são feitas tentativas de projeção da demanda futura do hidrogênio.

Os métodos mais utilizados na engenharia para projeto de cadeia são a simulação e a otimização. Seus objetivos tipicamente são minimização de custos, maximização de receita e/ou redução dos impactos ambientais.

Em Thomas et al. (1998), é feita uma análise considerando a demanda existente e os diferentes projetos de cadeia. Eles concluíram que, para demanda existente na época, o melhor método de produção seria pela eletrólise utilizando gás metano reformado de forma descentralizada. Eles ainda observam que, conforme a demanda cresça, alterações nesta cadeia terão que ser realizadas. Ogden (1999b) concluiu que na fase introdutória do hidrogênio, o excedente, que já está sendo produzido deverá ser utilizado. Baseado nessas conclusões, Lovins & Williams (1999) e Dunn (2002) desenvolveram estratégias de transição para iniciar e desenvolver a cadeia de suprimentos de hidrogênio.

Já Simbeck & Chang (2002) utilizaram simulação para avaliar 19 opções de cadeia, sendo 15 delas com produção centralizada em grande escala. A conclusão foi que o melhor método de produção, considerando apenas custos, seria a produção centralizada utilizando gás natural como matéria prima e caminhões para transporte de hidrogênio líquido. Tal fato pode ser explicado pelo crescimento da demanda esperada e alterações de valores das tecnologias e matérias primas. Esta mesma conclusão foi publicada por NRC (2004) ao considerar 32 opções de projeto.

Um dos primeiros trabalhos de otimização da cadeia de hidrogênio foi realizado por Hugo (2005) e tinha como objetivo encontrar a melhor infraestrutura, tanto no quesito de custo como no ambiental. Apesar de a modelagem ser bem detalhada, ela não trata do quesito de estoque de forma a acomodar variações sazonais de demanda. Outro aspecto deixado de lado é o custo e a disponibilidade da matéria prima. O modelo foi aplicado a um estudo de caso na Alemanha.

Almansoori & Shah (2006) desenvolveram um modelo PLIM determinístico para determinar o desenho da cadeia de suprimentos de hidrogênio que tivesse o menor custo. Os autores realizaram um estudo na Grã-Bretanha e concluíram que

o melhor seria utilizar a produção centralizada em usinas de gás natural reformado com distribuição do hidrogênio líquido através de tanques. Três anos depois, foi incluída no modelo a consideração de incertezas na demanda (Almansoori & Shah, 2009). Em seguida foi feito um estudo com três casos cada um com diferentes configurações da rede (Almansoori & Shah, 2012). Para tomada de decisão o modelo considera como objetivo a minimização do valor esperado médio de cada um dos cenários utilizado. O modelo com nove cenários rodava em três dias com gaps de otimalidade variando entre 3 a 9%.

Li et al. (2008) desenvolveram um modelo para planejamento dinâmico de investimentos utilizando programação linear inteira mista, que considera tanto o aspecto econômico como o financeiro. Ele foi aplicado a um estudo de caso da China.

Kim et al. (2008) desenvolveram um modelo PLIM determinístico e outro estocástico de dois estágios para definir a infraestrutura do hidrogênio considerando a minimização de custos. Em seguida, Kim e Moon (2008) utilizaram o mesmo modelo para avaliar o *trade-off* entre minimização de custos e maximização da segurança. O caso de estudo feito utilizou dados da Coreia do Sul e a incerteza considerada foi na previsão da demanda. Kim et al. (2011) criaram um índice baseado no risco de forma a avaliar as opções de desenho da cadeia. Eles concluíram que o método mais seguro é a produção descentralizada com armazenamento e transporte do hidrogênio líquido.

Sabio et al. (2010) desenvolveram um modelo PLIM multiobjetivo. Utilizando os dados e modelo de Almansoori & Shah (2009), com pequenas alterações, para um estudo de caso na Espanha. Eles analisam incerteza nos custos de operação da cadeia, se protegendo contra o pior caso, além de utilizar um método de decomposição para acelerar a obtenção dos resultados. Dois anos depois, ainda considerando dados da Espanha, Sabio et al. (2012) retiram a incerteza do problema e passam a considerar como critério de decisão os impactos ambientais juntamente com os econômicos.

Um melhor detalhamento sobre os modelos existentes pode ser visto em Dagdougui (2012), onde é apresentado seu estado da arte e métodos existentes para planejamento e desenho da cadeia de suprimento de hidrogênio.

## 4

### Modelo PLIM Estocástico

Mesmo que o desenho e o porte da rede não estejam previamente definidos, dado que a dimensão e localização das plantas e armazéns ainda não são conhecidas, é preciso definir a dimensão e tipos de modais de transporte que serão utilizados para ligar os elos da cadeia de forma a quantificar o valor do transporte. Para contornar esse problema, a metodologia desenvolvida nesse trabalho adotou uma técnica de agrupamento dos locais em regiões denominadas grids.

O grid pode representar cidades, municípios, estados ou países e podem representar divisões de diferentes tamanhos e formas, servindo para discretizar uma região geográfica em um mapa. A única restrição é que todo local deve pertencer exclusivamente a um único grid. Dessa forma plantas, armazéns e postos pertencerão a um grid, mas não terão um posicionamento específico na malha.

O modelo desenvolvido neste trabalho é estocástico de dois estágios e utiliza programação linear inteira mista. Esse modelo foi baseado na modelagem proposta por Almansoori & Shah (2012), apresentada na Seção 3.5. As premissas de negócio utilizadas são as mesmas, porém foram feitas modificações para tornar a modelagem mais genérica podendo ser aplicada em diversos casos reais. As maiores diferenças, no entanto, foram tornar o modelo estocástico, antes de um estágio apenas, em um modelo com dois estágios e simplificar os custos de transporte. A escolha pelo modelo de dois estágios foi baseada na literatura (Shapiro & Philpott, 2013) que mostra uma grande vantagem na utilização deste tipo de modelagem para investimentos de infraestrutura em redes de distribuição, onde os nós possuem demanda e oferta incertas e os arcos que os conectam podem ser de diferentes modais de transporte.

O objetivo do modelo é minimizar o custo total da rede, tanto de investimentos como de operação (produção, estocagem e transporte), garantindo o atendimento total da demanda nos pontos de consumo. Desta forma, será possível

avaliar e apoiar decisões de cunho estratégico e tático da forma mais aderente possível à realidade da indústria.

As decisões de cunho estratégico do modelo desenvolvido estão ligadas ao projeto da cadeia envolvendo decisões como:

- Dimensionamento da capacidade de produção de um grid, definição de quantas plantas deverão ser instaladas e quais tecnologias serão utilizadas;
- Dimensionamento da capacidade de armazenagem de um grid, definição de quantos armazéns deverão ser instalados e quais tecnologias serão utilizadas.

As decisões de cunho tático estão ligadas à movimentação na cadeia envolvendo decisões como:

- Importação de matéria prima;
- Contratação da frota para os canais de transporte;
- Alocação dos fluxos entre os grids para atendimento da demanda;
- Definição da estratégia de transporte dos produtos na rede entre os diferentes modais;
- Definição do nível de produção e armazenagem.

Estas decisões serão guiadas pela minimização dos custos de:

- Investimentos em ampliação da capacidade de produção;
- Investimentos em ampliação de capacidade de armazenagem;
- Comercialização e transporte de matéria prima;
- Produção e armazenagem do produto final;
- Transporte (frete) do produto final.

Respeitando as restrições de:

- Limites de capacidade;
- Ampliação da cadeia;
- Oferta e consumo de matéria prima;
- Atendimento da demanda;
- Transporte.

Como existe uma grande incerteza relativa à previsão de demanda, devido ao fato desse tipo de combustível ainda ser relativamente novo no mercado, esse parâmetro foi adotado como sendo o de estocasticidade no problema. Outras incertezas como preço futuro de produção, armazenagem e transporte não estão no

escopo desse trabalho e não serão consideradas no modelo. Como as decisões de investimento em plantas e armazéns devem ser tomadas sem conhecimento da demanda futura, estas serão as variáveis de primeiro estágio. Estas decisões serão válidas, independente do cenário que ocorra no futuro.

As demais decisões, como dimensionamento de modais e operação da rede, serão tomadas sabendo-se a real demanda ocorrida. Estas variáveis são chamadas de decisões de segundo estágio e serão válidas para um cenário específico.

A função objetivo considera o custo das decisões de primeiro estágio e o valor esperado dos custos associados a decisões de segundo estágio.

Este mesmo modelo pode ser utilizado com o objetivo de maximização de lucro. Como toda demanda deverá ser atendida basta substituir o objetivo para maximização do lucro, substituindo a função objetivo por uma parcela fixa da receita de atendimento da demanda, descontando-se o custo total da rede. O não atendimento de parte da demanda não foi considerado no escopo desse modelo tornando o modelo robusto ao crescimento da demanda. A Tabela 4.1 contém a listagem dos conjuntos e variáveis, a Tabela 4.2 lista os parâmetros.

**Tabela 4.2: Conjuntos e Variáveis**

Conjuntos		Variáveis de segundo estágio	
Cenário ( $c$ )	$C$	Demanda atendida localmente	$dl_{mig}^{ct} \in \mathbb{R}^+$
Grid ( $g$ e $g'$ )	$G$	Estoque de matéria prima	$ar_{rg}^{ct} \in \mathbb{R}^+$
Produto final ( $i$ )	$I$	Importação de matéria prima	$ir_{rg}^{ct} \in \mathbb{R}^+$
Modal de transporte ( $l$ )	$L$	Produção	$p_{pig}^{lct} \in \mathbb{R}^+$
Contador de plantas ( $m$ )	$M$	Fluxo de matéria prima	$qr_{rgg'}^{ct} \in \mathbb{R}^+$
Contador de instalações ( $n$ )	$N$	Fluxo do produto*	$q_{ilgg'}^{ct} \in \mathbb{R}^+$
Tecnologia da planta ( $p$ )	$P$	Estoque do produto	$sl_{sig}^{ct} \in \mathbb{R}^+$
Matéria prima ( $r$ )	$R$	Número de postos	$nf_{ig}^{ct} \in \mathbb{R}^+$
Tecnologia do armazém ( $s$ )	$S$		
Período ( $t$ )	$T$		
Plantas com restrição exportação (rp)	$R_p \in P$		
Variáveis de primeiro estágio		Variáveis auxiliares	
Implantação da planta	$ip_{pig}^t \in \mathbb{Z}^+$	Contador do número de plantas	$u_{mg}^t \in \{0,1\}$
Implantação do armazém	$is_{sig}^t \in \mathbb{Z}^+$	Contador do número de instalações	$w_{ng}^t \in \{0,1\}$
Número de plantas instaladas	$np_{pig}^t \in \mathbb{R}^+$	Auxiliar capacidade de transporte	$y_{ilgg'}^{ct} \in \{0,1\}$
Número de armazéns instalados	$ns_{sig}^t \in \mathbb{R}^+$		

\*Variável semi-contínua, isto é, que possui valor zero ou um valor entre um máximo e um mínimo.



Tabela 4.3: Parâmetros

Parâmetros econômicos		Parâmetros de capacidade	
Custo de instalação da planta	$PCC_{pi}^t$	Capacidade mínima de produção	$PCap_{pi}^{min}$
Custo de produção	$UPC_{pi}$	Capacidade máxima de produção	$PCap_{pi}^{max}$
Custo de instalação do armazém	$SCC_{si}^t$	Capacidade mínima do armazém	$SCap_{si}^{min}$
Custo de armazenagem	$USC_{si}$	Capacidade máxima do armazém	$SCap_{si}^{max}$
Custo contrato do transporte regional	$LCR_{ligg'}$	Capacidade mínima de transporte	$Q_{il}^{min}$
Custo de transporte regional	$CR_{ligg'}$	Capacidade máxima de transporte	$Q_{il}^{max}$
Custo contrato do transporte local	$LCL_{ig}$	Capacidade dos postos de combustível	$FSCap_i$
Custo de transporte local	$CL_{ig}$	Fator de segurança de estoque	$SSF_i$
Custo de entrega	$CE_{ig}$	Fator de segurança de estoque	$SRF_r$
Custo de operação do posto	$UFC_i$	Parâmetros operacionais	
Custo de compra da matéria prima	$URC_r$	Eficiência na produção	$\gamma_{rip}$
Custo de importação da matéria prima	$UIC_r$	Matéria prima disponível	$A0_{rg}^t$
Custo de transporte da matéria prima	$UDC_r$	Número de ciclos contidos em um período	$NT$
Parâmetros estocásticos		Distância entre grids	$RL_{gg'}$
Demanda	$DT_{ig}^{ct}$	Plantas que já existem	$NP0_{pig}^t$
Probabilidade do cenário ocorrer	$\psi^c$	Armazéns que já existem	$NS0_{sig}^t$

A formulação do modelo está descrita com a modelagem da função objetivo do problema e suas restrições de limites de capacidade, ampliação da cadeia de suprimentos, matéria prima e transporte nas Seções 4.1, 4.2, 4.3, 4.4 e 4.5, respectivamente. A Seção 4.6 traz, explicitamente, as diferenças entre a modelagem de Almansoori e Shah (2012) e a nova modelagem.

#### 4.1 Função Objetivo

A função objetivo (FO) do modelo considera a minimização da soma dos custos de ampliação e operação da rede e compra de matéria prima. Ela pode ser descrita na Equação 4.1 abaixo.

Minimizar (4.1)

$$\sum_t \left[ \sum_{gpi} PCC_{pi}^t ip_{pig}^t + \sum_{gsi} SCC_{si}^t is_{sig}^t \right] \quad (4.1.1)$$

$$+ \sum_{ct} \psi^c \left[ \sum_{igm>1} \frac{dl_{mig}^{ct}}{(m-1)} LCL_{ig} \right. \\ \left. + \sum_{ilgg'} q_{ilgg'}^{ct} LCR_{ligg'} \right. \\ \left. + \sum_{ign>1} \frac{DT_{ig}^{ct} w_{ng}^t}{(n-1)} LCL_{ig} \right] \quad (4.1.2)$$

$$+ \sum_{ct} \psi^c NT \left[ \sum_{gpi} UPC_{pi} p_{pig}^{lct} + \sum_{gsi} USC_{si} s_{sig}^{lct} + \sum_{ig} UFC_i n_{ig}^{fct} \right] \quad (4.1.3)$$

$$+ \sum_{ct} \psi^c NT \left[ \begin{aligned} & \sum_{ilgg'} q_{ilgg'}^{tc} RL_{gg'} CR_{ligg'} \\ & + \sum_{igm>1} \frac{dl_{mig}^{lct} RL_{gg}}{(m-1)} CL_{ig} \\ & + \sum_{ign>1} \frac{DT_{ig}^{lct} RL_{gg} w_{ng}^{tc}}{(n-1)} CE_{ig} \end{aligned} \right] \quad (4.1.4)$$

$$+ \sum_{ct} \psi^c NT \left[ \begin{aligned} & \sum_{gr} ir_g^{ct} UIC_r \\ & + \sum_{rgpi} \left( \frac{p_{pig}^{lct}}{\gamma_{rip}} - ir_g^{ct} \right) URC_r + \sum_{rgg'} qr_{rg',g}^{ct} RL_{g',g} UDC_r \end{aligned} \right] \quad (4.1.5)$$

Os custos de ampliação podem ser divididos em dois: plantas e armazéns (Equação 4.1.1), primeiro estágio, e transporte (Equação 4.1.2), segundo estágio. Os investimentos em plantas e armazéns são de primeiro estágio, uma vez que estes demoram a ser construídos. Já os investimentos em transporte são de segundo estágio, uma vez que esses meios são terceirizados e tem disponibilidade imediata no mercado. Estes custos são obtidos através da multiplicação da variável que contabiliza o número de investimentos realizados pelo seu respectivo parâmetro de custo de investimento.

Para investimentos em plantas ou armazéns deve-se levar em consideração a rápida queda nos preços das tecnologias destas instalações e, por isto, estes custos são diferenciados para cada um dos períodos. Já ampliações relativas a transporte são mais simples, pois basta alterar o contrato. Estes custos não possuem variações bruscas nos preços e são considerados constantes ao longo de todo o horizonte de análise. Outro motivo para os investimentos em plantas e armazéns serem diferenciados por período, é que estes investimentos continuarão a existir após o período de análise. Estas instalações ainda continuarão a ter valor, o que deve ser levado em conta. Os modais de transporte, por serem terceirizados, podem ser considerados ativos circulantes, uma vez que o contrato pode ser encerrado a qualquer momento, enquanto as plantas e armazéns são ativos imobilizados.

Os custos de operação incluem custos de produção, armazenagem e abastecimento (Equação 4.1.3) e movimentação de produto (Equação 4.1.4) e são

obtidos através da multiplicação das variáveis de produção e fluxo pelos seus respectivos parâmetros de custos de operação. Além disto, eles costumam ser calculados para ciclos de tempo menores do que o horizonte de tempo analisado e, por isto, todas estas parcelas de operação serão multiplicadas pelo número de ciclos contidos dentro de um período do horizonte de análise do modelo,  $NT$ . Por exemplo, os dados podem estar discretizados anualmente, entretanto, as variáveis de operação estarão com uma unidade mensal, desta forma, o  $NT$  seria 12, pois existem 12 meses dentro de um ano.

Os custos de movimentação são diferenciados para transporte de matéria prima e de produto final. O produto final possui três parcelas de custos diferenciados, o transporte entre grids (regional), transporte da planta de produção para o ponto de armazenagem (local) e transporte do ponto de armazenagem para o posto de abastecimento (entrega).

O custo de transporte regional é diretamente proporcional à quantidade movimentada e à distância entre um grid e outro. Já os custos de transporte local e de entrega são diretamente proporcionais à quantidade movimentada e inversamente proporcional ao número de plantas e de instalações dos grids, respectivamente. Desta forma, para o transporte local e de entrega, à distância média percorrida vezes a quantidade transportada resultaria em um termo não linear na FO.

De forma a contornar esse problema, foram introduzidas duas variáveis binárias,  $u_{mg}^t$  e  $w_{mg}^t$ , e os contadores  $m$  e  $n$ , de forma que a variável  $u_{mg}^t$  assumira valor 1 apenas quando existirem  $(m - 1)$  plantas e a variável  $w_{mg}^t$ , quando existirem  $(n - 1)$  instalações (plantas e armazéns). Assim, a expressão de custo

de transporte de entrega  $\frac{DT_{ig}^{ct} RL_{gg}}{\sum_{pi} np_{pig}^t + \sum_{ski} ns_{sig}^t}$ , antes não linear, é substituída pela

expressão  $\frac{DT_{ig}^{ct} RL_{gg} w_{ng}^{tc}}{(n-1)}$ , que é linear. A mesma análise pode ser feita para a

expressão do custo de transporte local, onde a variável  $dl_{mig}^{ct}$  representa  $DT_{ig}^{ct} u_{mg}^t$ .

Por último, o custo da matéria prima (Equação 4.1.5) é obtido por três parcelas. A primeira contabiliza a importação e tem seu valor obtido através da multiplicação do montante importado,  $ir_r^{ct}$ , pelo custo de importação,  $UIC_r$ . A segunda parcela contabiliza o custo de compra de matéria prima dentro dos grids e tem seu montante calculado pelo produto da quantidade de matéria prima

comprada  $\left(\frac{p_{pig}^{ct}}{\gamma_{rip}} - ir_{rg}^{ct}\right)$  pelo seu valor unitário,  $URC_r$ . A terceira e última parcela calcula o custo da movimentação da matéria prima entre os grids e tem seu valor obtido através da multiplicação do custo de movimentação do montante dessa matéria prima,  $qr_{g'g}^{ct}UDC_r$ , pela distância percorrida,  $RL_{g'g}$ .

## 4.2 Limites de Capacidade

Os modais de transporte, plantas de produção e locais de armazenamento possuem limites mínimos e máximos de operação que devem ser respeitados em todos os períodos e cenários.

A Equação 4.2 garante que se houver fluxo de um grid para o outro, isto é  $y_{ilgg'}^{ct} = 1$ , ele estará dentro dos limites de capacidade do modal. Como  $q_{ilgg'}^{ct}$  é uma variável semi-contínua, seu valor será zero ou estará dentro dos limites de capacidade, dessa forma  $Q_{il}^{Min}$  e  $Q_{il}^{Max}$  podem ser definidos como limite inferior e superior dessa variável, eliminando a necessidade da declaração da variável inteira  $y_{ilgg'}^{ct}$ , e da utilização dessa restrição na modelagem.

$$Q_{il}^{Min}y_{ilgg'}^{ct} \leq q_{ilgg'}^{ct} \leq Q_{il}^{Max}y_{ilgg'}^{ct} \quad \forall i, l, g, g', t, c \quad (4.2)$$

A Equação 4.3 garante que a produção do grid para um tipo específico de planta será limitada pela capacidade individual de cada planta,  $PCap_{pi}^{Max}$  e  $PCap_{pi}^{Min}$ , multiplicada pelo número total de plantas instaladas,  $np_{pig}^t$ , em cada período e cenário.

$$PCap_{pi}^{Min}np_{pig}^t \leq pl_{pig}^{ct} \leq PCap_{pi}^{Max}np_{pig}^t \quad \forall p, i, g, t, c \quad (4.3)$$

Da mesma forma, a Equação 4.4 garante que a quantidade de produtos armazenadas em um grid para um tipo específico de armazém seja limitada pela capacidade individual do mesmo,  $SCap_{si}^{Max}$  e  $SCap_{si}^{Min}$ , multiplicada pelo número total de armazéns instalados,  $ns_{sig}^t$ , em cada período e cenário.

$$SCap_{si}^{Min}ns_{sig}^t \leq sl_{sig}^{ct} \leq SCap_{si}^{Max}ns_{sig}^t \quad \forall s, i, g, t, c \quad (4.4)$$

Além disso, a capacidade de armazenagem de um grid deve ser suficiente para proteção contra variações sazonais da demanda dentro de um mesmo período. A Equação 4.5 obriga que a quantidade estocada em um grid,  $\sum_s sl_{sig}^{ct}$ , seja maior do que um fator de segurança,  $SSF_i$ , multiplicado pela demanda esperada do período,  $DT_{ig}^{ct}$ , para garantir uma margem de segurança no abastecimento.

$$\sum_s sl_{sig}^{ct} \geq SSF_i DT_{ig}^{ct} \quad \forall i, g, t, c \quad (4.5)$$

### 4.3 Ampliação da Cadeia de Suprimentos

Uma vez que um elo da cadeia tenha sido ampliado, sua capacidade não será mais reduzida. Para que isto seja verdade, é preciso supor que a vida útil das instalações é sempre maior ou igual ao horizonte de tempo analisado.

As Equações 4.6, 4.7 e 4.8 contabilizam, respectivamente, o número total de plantas,  $np_{pig}^t$ , armazéns,  $ns_{sig}^t$ , e postos de abastecimento,  $nf_{ig}^{ct}$ , existentes em cada um dos períodos. Como as duas primeiras equações contabilizam variáveis de primeiro estágio, elas são válidas para todos os cenários, enquanto a terceira contabiliza o número de postos necessários em cada um dos cenários.

$$np_{pig}^t = NP0_{pig}^t + np_{pig}^{(t-1)} + ip_{pig}^t \quad \forall p, i, g, t \quad (4.6)$$

$$ns_{sig}^t = NS0_{sig}^t + ns_{sig}^{(t-1)} + is_{sig}^t \quad \forall p, i, g, t \quad (4.7)$$

$$nf_{ig}^{ct} \geq \frac{DT_{ig}^{ct}}{FSCap_i} - \sum_{p \in RP} np_{pig}^t \quad \forall i, g, c, t \quad (4.8)$$

Além das variáveis que contabilizam o número total de plantas e armazéns, existem dois índices,  $m$  e  $n$ , denominados de contadores, que servem para contabilizar, respectivamente, o número de plantas e armazéns existentes. Como explicado na Seção 4.1.

Esses contadores são utilizados para garantir a linearidade do modelo. A parcela da função objetivo de custo de transporte é inversamente proporcional ao

número de instalações do grid e diretamente proporcional à quantidade de produto transportada.

As Equações 4.9 e 4.11 contabilizam o número de plantas,  $\sum_{pi} np_{pig}^t$ , e instalações,  $\sum_{pi} np_{pig}^t + \sum_{ski} ns_{sig}^t$ , respectivamente. As Equações 4.10 e 4.12 garantem que para apenas um valor de  $m$  ou  $n$  as variáveis,  $u_{mg}^t$  e  $w_{ng}^t$ , binárias, terão o valor 1, garantindo o funcionamento das Equações 4.9 e 4.11.

$$\sum_{pi} np_{pig}^t = \sum_m (m-1) u_{mg}^t \quad \forall g, t \quad (4.9)$$

$$\sum_m u_{mg}^t = 1 \quad \forall g, t \quad (4.10)$$

$$\sum_{pi} np_{pig}^t + \sum_{ski} ns_{sig}^t = \sum_n (n-1) w_{ng}^t \quad \forall g, t \quad (4.11)$$

$$\sum_n w_{ng}^t = 1 \quad \forall g, t \quad (4.12)$$

#### 4.4 Matéria Prima

Diferentes tipos de matéria prima podem ser utilizados como fonte de energia para produção do hidrogênio. Para cada grid, toda a matéria prima existente em um período pode ser consumida pela planta, ser movimentada entre os grids ou, ainda, ser guardada para utilização em um período posterior.

A Equação 4.13 mostra o balanço de matéria prima para cada um dos grids.

$$ar_{rg}^{ct} = ar_{rg}^{c(t-1)} + A0_{rg}^t + ir_{rg}^{ct} - \sum_{pi} \gamma_{rip} pl_{pig}^{ct} + \sum_{g'} (qr_{rg'g}^{ct} - qr_{gg'}^{ct}) \quad (4.13)$$

$\forall r, g, c, t$

Assim como existem sazonalidades dentro do horizonte de tempo para demanda de produtos, também existe sazonalidade na oferta de matéria prima. A Equação 4.14 garante proteção contra imprevistos no fornecimento de matéria prima. Desta forma, o fator de segurança,  $SRF_r$ , segue a mesma lógica do fator  $SSF_r$ , sendo agora utilizada uma margem de segurança para a matéria prima e não mais para o produto final.

$$ar_{rg}^{ct} \geq SRF_r \left( \sum_{pi} \gamma_{rip} pl_{pig}^{ct} + \sum_{g'} qr_{gg'}^{ct} \right) \quad \forall r, g, c, t \quad (4.14)$$

#### 4.5 Restrições de Transporte

A demanda de cada *grid* deve ser totalmente atendida, podendo-se optar apenas pela produção local, no próprio *grid*, ou importação de produtos oriundos de grids vizinhos. A Equação 4.15 garante que apenas grids que possuem plantas de produção podem ter sua demanda atendida localmente. Já a Equação 4.16 obriga que toda a produção de plantas que possuam restrições relativas à exportação de produtos seja consumida pelo próprio *grid*. O que é produzido em um *grid* deverá sempre ser utilizado, seja por ele ou por grids vizinhos.

$$dl_{mig}^{ct} \leq DT_{ig}^{ct} u_{mg}^t \quad \forall m, g, i, t, c \quad (4.15)$$

$$\sum_m dl_{mig}^{ct} \geq \sum_{p \in RP} pl_{pig}^{ct} \quad \forall i, g, t, c \quad (4.16)$$

As Equações 4.17 e 4.18 fazem o balanço dos grids garantindo que tudo que for produzido será consumido em algum *grid*. Sendo assim, se a produção local for maior que a demanda, então haverá transporte desta diferença para *grid* vizinhos. Da mesma forma, se a produção for menor do que a demanda, um *grid* vizinho irá suprir essa demanda. Um *grid* que não possui planta não possui estrutura para enviar produto para grids vizinhos.

$$\sum_p pl_{pig}^{ct} - \sum_m dl_{mg}^{ct} = \sum_{LG'} q_{ilgg'}^{ct} \quad \forall i, g, t, c \quad (4.17)$$

$$DT_{ig}^{ct} - \sum_m dl_{mg}^{ct} = \sum_{LG'} q_{ilg'g}^{ct} \quad \forall i, g, t, c \quad (4.18)$$

#### 4.6 Diferenças Modelo Almansoori & Shah (2012)

O novo modelo proposto nesta dissertação foi reformulado com as mesmas premissas do modelo de Almansoori & Shah (2012) A primeira modificação

realizada foi com relação aos custos de transporte, a modelagem original separava os custos em três parcelas, um custo fixo por viagem, e dois custos variáveis, tempo de duração da viagem e quantidade transportada. A nova modelagem propõe unificar esses custos em apenas uma parcela de custo variável por quantidade e distância transportada.

Esta alteração não afeta as decisões do modelo uma vez que os custos de transporte não representam mudanças significativas nas decisões de infraestrutura da rede. Com a simplificação da modelagem dos custos de transporte foi possível diminuir, significativamente, a quantidade de variáveis binárias do modelo.

Analisando as equações foi identificado que a modelagem das restrições de fator de segurança para matéria prima poderia ser aprimorada. O estoque de um período não era contabilizado como existente no período seguinte. Dessa forma, o estoque de segurança não estava garantindo um nível mínimo para o período seguinte, e sim simulando uma perda existente de produtos com o passar do tempo. A Equação 4.14 substituiu a Equação 4.19 utilizada no modelo de Almansoori & Shah (2012).

$$\left( ir_{rg}^{ct} + \sum_{g'} qr_{rg',g}^{ct} \right) SSF = \sum_{g'} qr_{gg'}^{ct} + \sum_{pi} \gamma_{rip} pl_{pig}^{ct} \quad (4.19)$$

Ainda quanto ao quesito de estoque de segurança, o fator de segurança, tanto para a matéria prima como para produto final, foi generalizado. Para isso, foi adicionado um índice de matéria prima e produto final, respectivamente, nos parâmetros de nível de estoque de segurança,  $SRF_r$  e  $SSF_i$ . O sinal de igualdade da restrição também foi substituído por um sinal de desigualdade, haja visto que o estoque deve sempre ser maior ou igual ao estoque de segurança e não necessariamente igual.

Por último, foram aplicadas técnicas de melhoria de eficiência computacional alterando para contínuas as variáveis inteiras, definidas como somatório de outras variáveis inteiras,  $np_{pig}^t$  e  $ns_{sig}^t$ .



## 5

### Estudo de Caso – Grã-Bretanha

De forma a validar o modelo apresentado no Capítulo 4 foi realizado um estudo de caso com dados reais da cadeia de suprimentos de hidrogênio da Grã-Bretanha. Os dados utilizados foram baseados na pesquisa apresentada por Almansoori e Shah (2012), descrita na Seção 3.5.

A Seção 5.1 irá apresentar detalhadamente os dados que serão utilizados neste estudo. Em seguida, a Seção 5.2 irá apresentar os resultados obtidos e a Seção 5.3 apresenta uma simplificação destes dados, sem perda de informação, de forma a melhorar a qualidade de solução, bem como o tempo de resolução do modelo.

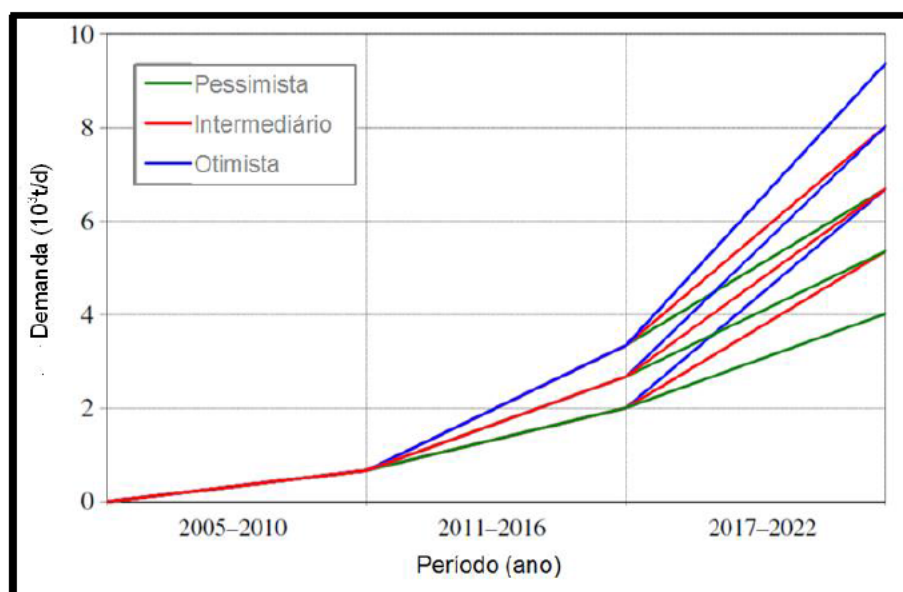
#### 5.1 Apresentação dos Dados

O estudo foi baseado em um horizonte de análise dos anos entre 2005 e 2022, agrupados em três períodos com seis anos cada. Foram utilizados 34 grids quadrados de mesmo tamanho para a divisão do espaço geográfico da Grã Bretanha, como pode ser visto na Figura 5.1. O grid pode representar divisões de diferentes tamanhos e formas (ex: cidades e bairros), servindo para discretizar uma região geográfica, definindo a localização de uma planta ou armazém estabelecido. A única restrição é que todo local deve pertencer a um único grid.



**Figura 5.1: Mapa da Grã Bretanha dividido em grids (Almansoori & Shah, 2012)**

A demanda de cada grid foi baseada em uma previsão da frota de veículos movidos a hidrogênio que existirá no futuro e da distância média que deverá ser percorrida por essa frota. Foram considerados três cenários de igual probabilidade de ocorrência em cada um dos períodos, um otimista, um pessimista e um intermediário. Como existem três períodos no final do horizonte têm-se nove cenários. A árvore com a demanda média dos grids para cada um dos cenários pode ser vista na Figura 5.2.



**Figura 5.2: Árvore de cenários (Almansoori & Shah, 2012)**

Para produção de H<sub>2</sub> foram consideradas como matérias primas: gás natural, carvão mineral, biomassa e água (eletrolise). O custo de importação (compra fora dos grids), e de transporte (movimentação entre grids), bem como a disponibilidade de cada uma das matérias primas nos grids, pode ser visto na Tabela 5.1. Vale ressaltar que a medida para eletricidade se dá em kWh enquanto que para as outras matérias primas a medida é em kg.

**Tabela 5.1: Matéria prima**

Matéria prima	Gás natural	Carvão	Biomassa	Eletricidade
Custo compra (US\$/unidade*)	0,12	0,03	0,05	0,05
Custo importação (US\$/unidade*)	0,132	0,033	0,055	0,055
Custo transporte (US\$/unidade*/km)	$1,22 \times 10^{-5}$	$3,05 \times 10^{-6}$	$5,09 \times 10^{-6}$	$5,09 \times 10^{-5}$
Disponibilidade (unidade*/d)	$182 \times 10^6$	$685 \times 10^6$	$61,5 \times 10^6$	$102 \times 10^6$

\* A unidade utilizada para todos é de kg a exceção da eletricidade que é medida em kWh. O volume de gás natural foi multiplicado pela densidade do metano em condições padrão para obter o kg.

Como a maior distância entre os grids é de 983 km, o maior custo de transporte de gás natural entre grids será de 0,012 US\$/kg. Somando o custo de compra com o de movimentação, o custo total máximo para utilização da matéria prima existente nos grids é de 0,132US\$/kg, igual ao custo de importação, 0,132US\$/kg. Como essa afirmação vale para todas as matérias primas, somente haverá importação quando a oferta da Grã-Bretanha não for suficiente para atender a demanda. Para proteção contra eventuais imprevistos no fornecimento de matéria prima, foi considerado um fator de segurança de 5%, isto é, um valor igual ou superior a 5% do que foi consumido em um período deve ser deixado armazenado para o período seguinte.

Para a transformação dessas matérias primas em produto final serão necessários quatro tipos de plantas, uma para cada tipo de matéria prima. O único produto final considerado será o hidrogênio líquido, pois, como dito anteriormente, este tem sido o mais utilizado como combustível de automóveis. As informações de capacidade e custo de cada uma dessas plantas (pequena - P, média - M e grande - G) podem ser vistas na Tabela 5.2.

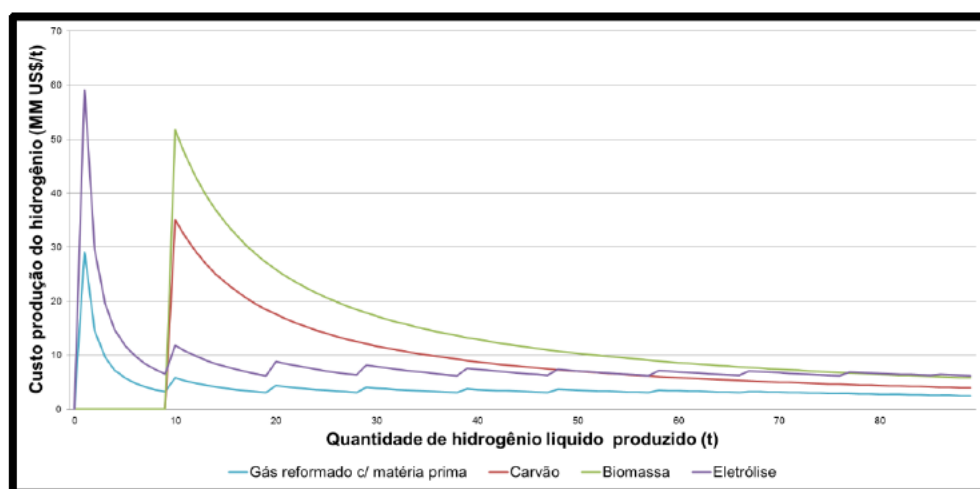
Tabela 5.2: Planta de produção

Plantas e Tamanhos	Gás reformado			Carvão		Biomassa		Eletrólise	
	P	M	G	M	G	M	G	P	M
Capacidade mínima (unidade*/d)	0.3	10	200	10	200	10	200	0.3	10
Capacidade máxima (unidade*/d)	9.5	150	960	150	960	150	960	9.5	150
Taxa de conversão da material prima em produto final (unidade*/kg)	4,02	3,34	3,16	5,64	5,33	18,4	11,3	52,5	52,5
Custo instalação (MM US\$)	29	224	903	389	1 611	575	1 836	61	663
Custo operação (US\$/kg)	3,36	1,74	1,43	2,03	1,56	3,52	2,15	6,82	5,03
Plantas já existente	0	2	3	0	0	0	0	0	0

\* A unidade utilizada para todos é de tonelada (t) a exceção da eletricidade que é medida em Megawatt-hora (MWh).

Comparando os custos de cada uma das plantas, é possível observar que a planta de gás reformado apresenta os menores custos, tanto para instalação como para operação, independente do tamanho considerado. Dessa forma, seria possível supor que esta será a única planta a ser instalada. Entretanto, além do custo de operação e instalação, o custo de matéria prima para produção de hidrogênio deve ser levado em consideração. O gás natural apresenta o maior custo para compra mas também possui a maior taxa de produção.

Para confirmar que a melhor forma de produção é realmente o gás reformado, foi considerado o custo total de produção do hidrogênio, isto é, o custo de obtenção de matéria prima e o custo de instalação e produção da planta. A Figura 5.3 mostra o gráfico que compara os custos, de produção e instalação, dos diferentes tipos de planta, de acordo com a quantidade de hidrogênio que será produzida. O gráfico apresenta picos, pois, com o crescimento da quantidade de hidrogênio que precisa ser produzida, uma nova planta de produção deve ser instalada, havendo um salto nos custos (custo fixo). Somente na planta de gás reformado foi considerado o custo de importação de matéria prima que, como visto anteriormente, será o maior valor para obtenção desta.



**Figura 5.3: Custo de obtenção do hidrogênio**

Dessa forma fica comprovado que o único tipo de planta que deverá ser instalada será a de gás reformado e, conseqüentemente somente será utilizado o gás natural como fonte de matéria prima. Outra conclusão que pode ser extraída a partir dessa análise é de que não haverá importação de matéria prima, uma vez que a quantidade de gás natural existente na Grã-Bretanha é suficiente para a produção de todo o hidrogênio necessário para atender a demanda.

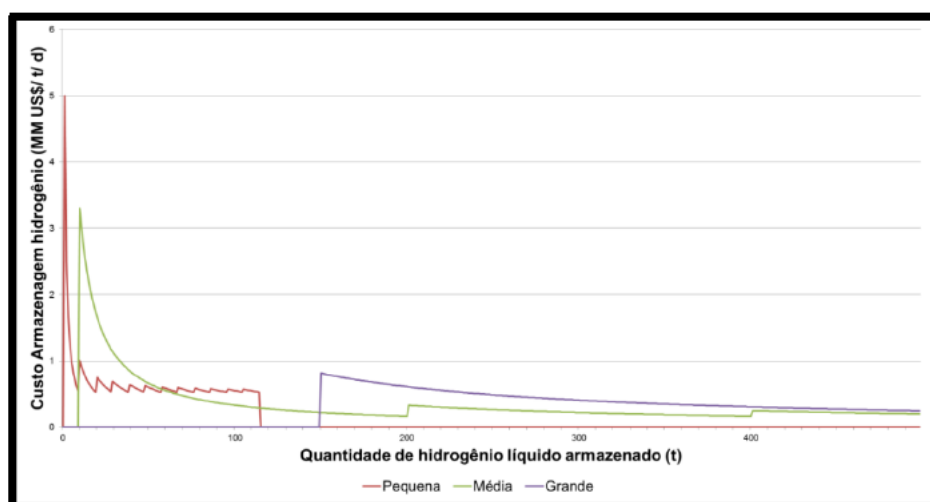
Como foi considerada a produção de apenas um único tipo de combustível, foram utilizados dados referentes apenas aos armazéns de hidrogênio líquido. Estes armazéns podem ser de três tamanhos diferentes: pequeno (P), médio (M) e grande (G). As informações dos armazéns estão detalhadas na Tabela 5.3.

**Tabela 5.3: Armazéns de hidrogênio líquido (Almansoori & Shah, 2012)**

Tamanho do armazém de hidrogênio líquido	P	M	G
Capacidade mínima (t/d)	0,5	10	200
Capacidade máxima (t/d)	9,5	150	540
Custo instalação (MM U\$)	5	33	122
Custo operação (US\$/kg)	0,032	0,010	0,005
Armazéns já existentes	0	3	2

Como a demanda tem uma variação diária muito grande, foi adotado um fator de segurança na capacidade de estoque do hidrogênio, de forma a garantir que haja espaço disponível para armazenagem quando a demanda for baixa. Esta proteção será de 10 vezes o valor da demanda diária esperada em cada um dos grids.

A Figura 5.4 mostra o gráfico de custo de armazenagem em cada uma das plantas em relação à quantidade armazenada. Novamente, os saltos são referentes aos custos fixos de instalação de novos armazéns que precisam ser instalados conforme o crescimento da quantidade de hidrogênio a ser armazenado.



**Figura 5.4: Custo armazenagem do hidrogênio**

Para grids com demandas de até 5 t/d (lembrando que a capacidade de armazenamento deverá ser sempre 10 vezes a demanda) somente serão instalados armazéns de pequeno porte. Além disso, o modelo nunca decidirá pela instalação de armazéns de grande porte, pois seus custos de armazenagem por quantidade de hidrogênio armazenada serão sempre superiores aos armazéns de pequeno e médio porte (na Figura 5.4 a linha azul está sempre acima das outras).

Para o transporte regional, aquele realizado entre grids, foram considerados dois tipos de modais: trens e caminhões. O custo de cada um destes modais pode ser visto na Tabela 5.4.

**Tabela 5.4: Custos relacionados ao transporte**

Modal	Caminhão	Trem
Capacidade mínima de transporte (kg)	4 082	9 072
Custo Contrato (US\$/t)	500 000	500 000
Consumo do combustível (km/L) (local e regional)	2,55 e 2,30	4,25 e 3,83
Velocidade média (km/h) (local e regional)	55 e 25	45 e 20
Tempo de carga e descarga (h)	2	12
Custo do motorista (US\$/h)	23	23
Custo do combustível (US\$/L)	1,16	0,28
Custo de manutenção (US\$/km)	0,0976	0,0621
Custos Genéricos (US\$/d)	8,22	6,85

Como simplificação, foi utilizado um custo médio de transporte por quilômetro e quilograma para cada um dos modais de transporte, de forma a simplificar o cálculo. De forma geral, cada um dos custos é composto por três parcelas, sendo estas o custo de: combustível, mão de obra utilizada e manutenção do modal. Um resumo da proporção do impacto dessas parcelas no preço final do transporte pode ser visto na Tabela 5.5.

**Tabela 5.5: Custo total de transporte**

Transporte	Combustível	Mão de Obra	Manutenção	Total (US\$/kg.km)
Trem Regional	10%	80%	10%	$1,4 \times 10^{-4}$
Trem Local	2%	94%	4%	$7,5 \times 10^{-4}$
Caminhão Regional	60%	30%	10%	$4,0 \times 10^{-4}$
Caminhão Local	30%	60%	10%	$7,7 \times 10^{-4}$

Apesar do custo do trem local ser menor do que o do caminhão local, será utilizado apenas o modal caminhão para transporte dentro do grid, pois as distâncias no interior deste são muito pequenas. Desta forma, o modal ferroviário poderá ser utilizado apenas para transportes de produto final de um grid para o outro.

## 5.2 Resultados - Modelo Completo

O modelo matemático foi implementado utilizando o software GAMS (*General Algebraic Modelling System*) 23.7 e resolvido pelo solver CPLEX 12.3. Para geração dos resultados, foi utilizado um computador com processador Intel Core i7 2,1GHz com 8 GB Ram. O modelo gerado possui 239.581 variáveis, sendo 75.650 inteiras, e 873.851 restrições. O tempo gasto para encontrar a solução variou dependendo do gap de otimalidade requerido. A Tabela 5.6 apresenta o tempo computacional gasto e o valor da função objetivo para cada valor de gap requerido.



**Tabela 5.6: Gap x Tempo computacional**

Gap alvo (%)	Tempo (s)	FO (MM US\$)	LB (MM US\$)	GAP obtido (%)
5	139,15	43.146,78	42.626,98	1,20
3	139,09	43.146,78	42.626,98	1,20
2	139,18	43.146,78	42.626,98	1,20
1	1245,14	42.926,44	42.646,38	0,65
0,5	5.988,94	42.845,96	42.651,13	0,45
0	71.144,85	42.789,60	42.672,05	0,27*

\*Este foi o menor gap possível de ser encontrado, devido a limitações dos recursos computacionais utilizados.

Para soluções com gap a partir de 2%, o tempo computacional cresce exponencialmente, enquanto que o valor da função objetivo se mantém praticamente constante. Para conseguir diminuir o gap de 1,2% para 0,45% foi necessário um tempo 40 vezes maior e o ganho obtido é de menos do que 0,7% na FO.

Estes resultados demonstram a eficiência da modelagem matemática desenvolvida uma vez que apresenta resultados com maior eficiência do que os modelos encontrados na literatura. Em Almansoori & Shah (2012), o tempo computacional era de 3 dias para obtenção de soluções com gaps de 9 a 3%.

Analisando os resultados obtidos para o gap alvo de 1% (real 0,65%), foi possível ver que não foi importada nenhuma matéria prima, sendo utilizada apenas a matéria prima disponível nos grids para produção do H<sub>2</sub> para atendimento da demanda. A Tabela 5.7 indica o número de plantas e armazéns de cada tipo instalados em cada um dos períodos.

**Tabela 5.7: Plantas instaladas**

Período	Planta			Armazém		
	P	M	G	P	M	G
1	14	-	-	16	43	2
2	-	-	1	8	128	-
3	2 (1 eletrólise)	2	5	17	289	1

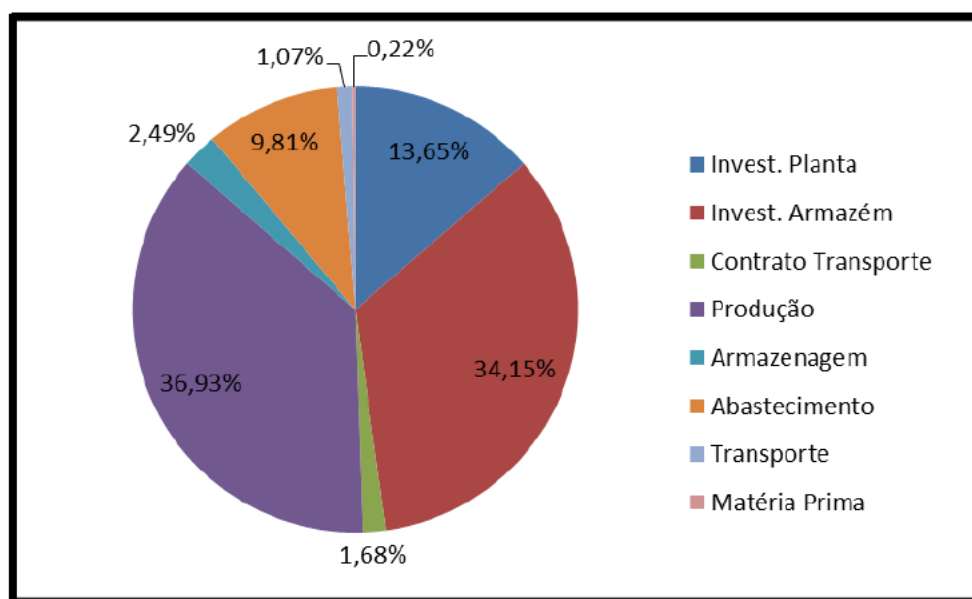
Apesar do resultado esperado pela análise inicial dos dados, onde plantas de gás reformado seriam preferíveis a todas as outras formas de produção, houve investimento em uma planta de produção pequena a partir de eletrólise da água. Quanto aos armazéns, não era esperado investimentos em armazéns de grande porte, uma vez que as demandas da Inglaterra estão na faixa onde o armazém de



médio porte é sempre vantajoso quando comparado ao de grande porte. Entretanto, optou-se por utilizar três deles, sendo dois instalados no primeiro período e um no terceiro período. Os resultados que não eram esperados advêm do fato da solução ser sub-ótima, gap de otimalidade de 0,65%, e, por isso, esta escolha ter sido feita. Estas decisões foram tomadas, pois havia dado em excesso para a tomada de decisão do modelo, possibilitando resultados sabidamente ruins depois de realizada uma análise inicial detalhada dos dados, mostrando o quão importante é a análise dos dados de um estudo antes da utilização de um modelo matemático.

No geral, pode ser observada uma preferência por plantas de pequeno porte no primeiro período, onde a demanda ainda é baixa, e de grande porte nos períodos subsequentes, conforme o crescimento da demanda. Quanto aos armazéns, há uma preferência pelos de médio porte e a capacidade deles está em constante ampliação para atender a demanda crescente.

A Figura 5.5 mostra um gráfico com porcentagem de cada uma das parcelas da função objetivo, demonstrando o peso que elas têm no custo total da cadeia.



**Figura 5.5: Participação de cada uma das parcelas da função objetivo.**

Os custos de investimento em infraestrutura correspondem a 47,8% dos custos totais e os custos de operação, a 52,2%. Esta parcela alta referente à instalação demonstra que as tecnologias existentes para produção e, principalmente, armazenagem de hidrogênio ainda são intensivas em capital. No

questo investimento, os armazéns correspondem a mais de 70% do total. Já nos custos de operação, a produção corresponde, também, a mais de 70% deste.

Como os custos da cadeia com operação de armazéns são muito menores do que o custo com sua instalação, pode-se concluir que a escolha dos tipos de armazéns, que serão instalados, é baseada no seu custo de instalação, não sendo necessário na análise inicial comparar os custos de operação deste.

Já para análise inicial de plantas, deve-se levar em consideração tanto o valor de instalação quanto de operação, uma vez que ambos possuem valor significativo na FO. Já o custo da matéria prima é praticamente insignificante na produção, podendo ser desconsiderado na análise de preferência das plantas.

### 5.3 Refinando o Resultado – Modelo Reduzido

De forma a tentar melhorar o tempo computacional e os resultados obtidos, foram utilizadas algumas simplificações referentes aos dados de entrada. Por exemplo, serão oferecidas apenas plantas do tipo gás reformado, uma vez que sua instalação, operação e custo de matéria prima possuem sempre um custo inferior às demais plantas. A matéria prima também nunca será importada uma vez que o custo de importação é superior ao de compra interna somada a sua movimentação e há matéria prima suficiente disponível nos grids para atendimento da demanda. Os armazéns de grande porte nunca serão considerados, restando à opção de escolha apenas entre armazéns de pequeno e médio porte.

Outra consideração a ser feita é que, se a demanda de um grid em um cenário for igual à de outro cenário no mesmo período, suas variáveis de segundo estágio deverão ser iguais, exceto as variáveis de matéria prima que dependem da demanda de períodos subsequentes.

O novo modelo possui 132.595 variáveis, sendo 75.002 inteiras, e 473.203 restrições. Sendo assim, seu porte foi reduzido em 45% do tamanho original, apesar do número de variáveis inteira ter permanecido praticamente inalterado. A Tabela 5.8 mostra os resultados obtidos após o pré-processamento dos dados.

**Tabela 5.8: Gap x Tempo computacional (Reduzido)**

Gap Alvo (%)	Tempo (s)	FO (MM US\$)	LB (MM US\$)	Gap obtido (%)
5	88,14	42 900,15	42 635,71	0,62
3	88,16	42 900,15	42 635,71	0,62
2	88,08	42 900,15	42 635,71	0,62
1	88,05	42 900,15	42 635,71	0,62
0,5	2941.66	42 868,40	42 654,83	0,50
0,2	47535.53	42 761,86	42 676,34	0,20
0	119136.98	42 761,86	42 682,87	0,18*

\*Este foi o menor gap possível de ser encontrado, devido a limitações dos recursos computacionais utilizados.

Com a redução do porte do modelo, foi possível obter tempos de solução menores. O tempo gasto para encontrar uma solução viável foi reduzido em 35% e, para obter uma solução com gap abaixo de 1%, a redução do tempo computacional foi de 14 vezes. Tal observação mostra a importância da análise inicial dos dados no presente contexto. A Tabela 5.9 apresenta um resumo comparando o modelo original de Almansoori & Shah (2012), a nova modelagem e a nova modelagem após limpeza dos dados.

**Tabela 5.9: Comparação entre modelagens**

Modelo	Variáveis	Inteiras	Restrições	Gap (%)	Tempo
<b>Original</b>	231 886	108 630	563 658	9	3 d
<b>Nova Modelagem</b>	239 581	75 650	873 851	1	2,32 min
<b>Limpeza Dados</b>	132 595	75 002	473 203	1	1,47 min

Analisando-se os resultados obtidos para o gap de 1%, foi possível observar a preferência exclusiva pelas plantas de gás reformado e a autossuficiência dos grids em fornecimento de matéria-prima uma vez que as soluções obtidas foram melhores.

Para comprovar a viabilidade da introdução desse combustível de forma competitiva no mercado foi calculado o custo unitário de entrega do hidrogênio até o ponto de consumo. Para o cálculo foi suposto a vida útil de 20 anos para as plantas e armazéns instalados, isto é, seus custos de implantação foram diluídos ao longo de 20 anos. A Tabela 5.10 apresenta o custo unitário total e as parcelas que o compõem.

**Tabela 5.10: Custo unitário modelo reduzido**

Custos unitários (US\$/Kg)	Período		
	1	2	3
<b>Ampliação da Rede</b>	0,402	0,293	0,261
<b>Contrato de Transporte</b>	0,065	0,039	0,029
<b>Operação da Rede</b>	2,025	1,977	1,968
<b>Total</b>	<b>2,492</b>	<b>2,309</b>	<b>2,258</b>

O custo da gasolina é inferior a 3,00 US\$ por galão. como um galão de gasolina equivale à energia contida em, aproximadamente, 1,1 kg de hidrogênio. Logo, mesmo no primeiro período, onde o preço do hidrogênio é mais caro (US\$ 2,492), o preço de 1,1 kg de hidrogênio, cerca de 2,74 US\$, é competitivo.

A Tabela 5.11 indica o número de plantas e armazéns de cada tipo instalados em cada um dos períodos.

**Tabela 5.11: Plantas instaladas**

Período	Planta			Armazém		
	Pequena	Média	Grande	Pequena	Média	Grande
1	11	-	-	12	48	-
2	-	-	2	3	127	-
3	5	2	4	9	296	-

O perfil de investimento em plantas e armazéns não foi alterado com as novas considerações, mas foi possível evitar investimentos em plantas de eletrólise e armazéns de grande porte que causavam estranhamento nos resultados encontrados na Seção 5.2. A Tabela 5.12 mostra cada uma das parcelas da função objetivo, discriminadas por período e com o peso da parcela no custo total da cadeia.

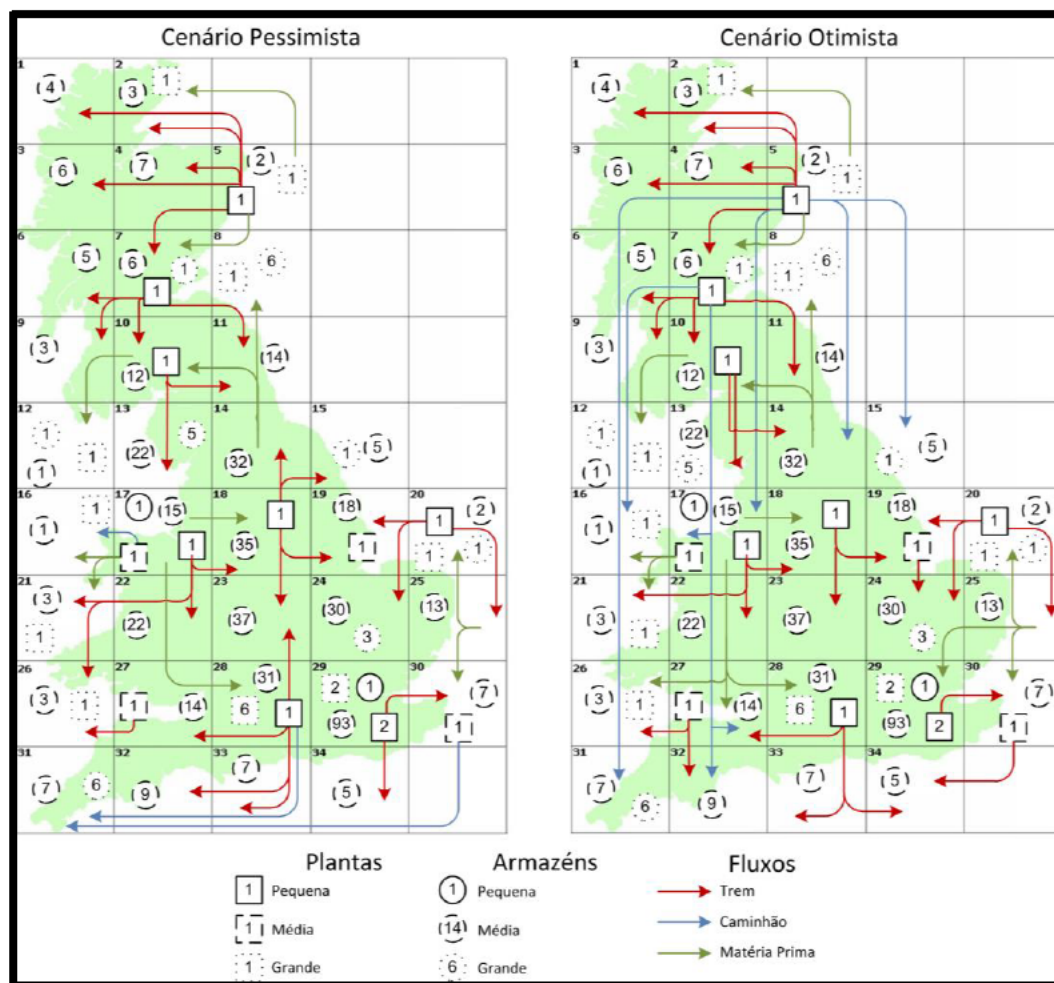
Tabela 5.12: Parcelas da função objetivo

Custos (parcelas da FO)		Período			Total	
		1	2	3	(MM US\$)	(%)
Instalação (MM US\$)	Instalação de Plantas	319,00	1 720,00	3 822,73	5 861,73	13,66
	Instalação de Armazéns	1 644,00	4 005,71	8 920,91	14 570,62	33,97
	<b>Total Instalação</b>	<b>1 963,00</b>	<b>5 725,71</b>	<b>12 743,64</b>	<b>20 432,35</b>	<b>47,63</b>
Contrato (MM US\$)	Transporte Entrega	44,57	64,44	67,42	176,43	0,41
	Transporte Local	12,55	34,09	79,09	125,73	0,29
	Transporte Regional	38,91	128,66	279,09	446,66	1,04
	<b>Total Contrato</b>	<b>96,03</b>	<b>227,19</b>	<b>425,60</b>	<b>748,82</b>	<b>1,74</b>
Operação (MM US\$)	Produção	1 092,15	4 216,19	10 546,47	15 854,81	36,96
	Armazenagem	69,37	287,94	728,74	1 086,05	2,53
	Posto de Combustível	272,58	1 123,54	2 826,72	4 222,84	9,84
	Transporte Entrega	13,40	19,37	20,26	53,03	0,12
	Transporte Local	3,77	10,25	23,77	37,79	0,09
	Transporte Regional	27,98	114,15	232,60	374,73	0,87
	<b>Total Operacional</b>	<b>1 479,25</b>	<b>5 771,44</b>	<b>14 378,56</b>	<b>21 629,25</b>	<b>50,41</b>
Matéria Prima (MM US\$)	Compra Matéria Prima	2,76	11,13	27,82	41,71	0,10
	Transporte Matéria Prima	2,87	16,82	28,33	48,02	0,11
	Matéria Prima importada	0	0	0	0	0
	<b>Total Matéria Prima</b>	<b>5,63</b>	<b>27,95</b>	<b>56,15</b>	<b>89,73</b>	<b>0,21</b>
<b>Total</b>		<b>3 543,91</b>	<b>11 752,29</b>	<b>27 603,95</b>	<b>42 900,15</b>	<b>100,00</b>

Há um crescimento claro de todas as parcelas conforme o passar do tempo. Quase todas elas têm um fator de crescimento de 10 vezes, se comparado o primeiro e o último período. As parcelas que possuem menor crescimento são as relativas a transporte, mostrando que o impacto do crescimento da demanda não é tão alto para o aumento de seus custos. O perfil das contribuições das parcelas no montante total da função objetivo se manteve constante comparado com os resultados obtidos na Seção 5.2.

A Figura 5.6 mostra a configuração da rede no último período de análise com relação ao cenário de menor crescimento de demanda, pessimista, e de maior,

otimista. Como os investimentos independem do cenário realizado, os dois esquemas apresentam a mesma infraestrutura, plantas e armazéns. Quanto à movimentação é possível observar que, quanto maior a demanda, maior é o fluxo de transporte entre os grids. Isto porque as plantas que no cenário pessimista estavam subutilizadas, no cenário otimista deverão produzir mais, de forma a atender a demanda de grids mais afastados.



**Figura 5.6: Movimentação nos cenários**

## 6

## Aplicação do SAA

Com o modelo estocástico validado, a etapa seguinte é a utilização dos cenários adequados para representar o futuro. A metodologia deste trabalho propõe a adoção da técnica de aproximação por média amostral (SAA - *Sample Average Approximation*) que, como dito na Secção 2.7, é o método para calcular o valor esperado da função objetivo, em otimizações estocásticas, utilizando simulação de Monte Carlo e garantindo soluções com qualidades estatisticamente certificadas.

Esse capítulo tem como objetivo utilizar a técnica de SAA para lidar com a incerteza existente na demanda de hidrogênio em cada um dos grid. A Seção 6.1 apresenta os dados utilizados na aplicação da metodologia ao estudo de caso apresentado no Capítulo 5 e a Seção 6.2 mostra os resultados obtidos.

### 6.1 Apresentação dos Dados

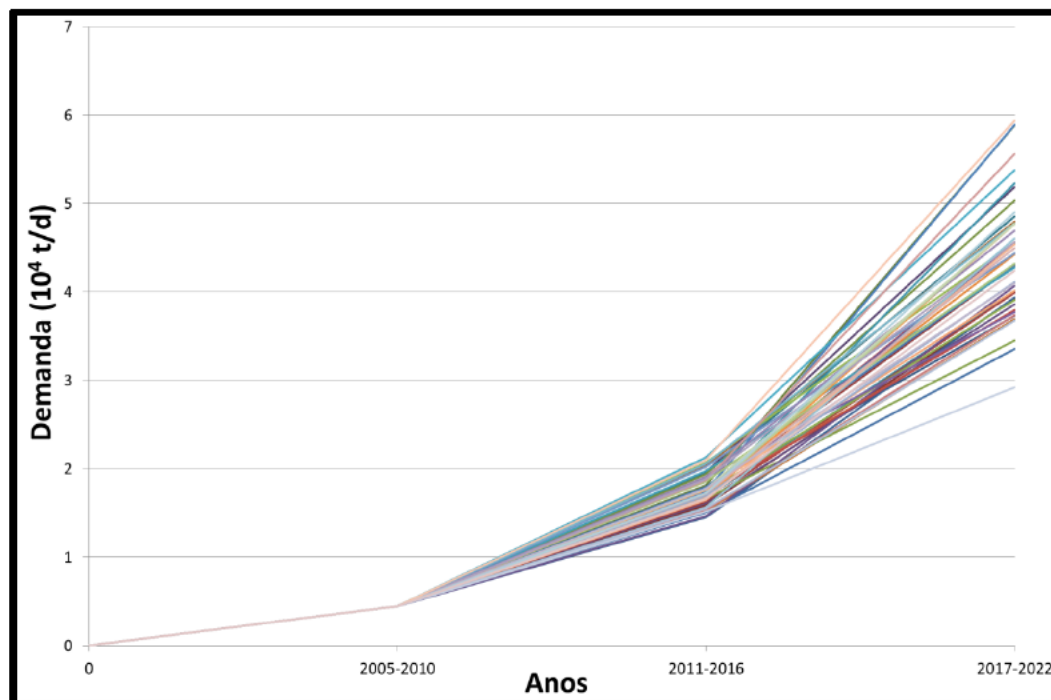
Para gerar cenários considerando a incerteza da demanda por hidrogênio, foi utilizado um modelo auto regressivo de primeira ordem, representado pela Equação 6.13. A demanda total do produto  $i$ , em um grid  $g$ , no período  $t$  e cenário  $c$  será de  $DT_{ig}^{ct}$ . Na equação,  $Da_{ig}^t$  representa o crescimento médio esperado da demanda em cada um dos períodos,  $Db_{ig}^t$  o máximo desvio esperado deste consumo e  $\epsilon$  o erro que tem distribuição normal padrão.

$$DT_{ig}^{ct} = DT_{ig}^{c(t-1)}[1 + Da_{ig}^t + Db_{ig}^t\epsilon] \quad (6.1)$$

Analisando-se os cenários de previsões de crescimento de demanda apresentados na Seção 5.1 e suas respectivas probabilidades, foi possível aproximar os valores de  $Da_{ig}^t$  por 3,0 no segundo período e por 1,5 no terceiro período. O valor de  $Db_{ig}^t$  foi aproximado por 1/3 em ambos os períodos. De forma



a manter as premissas do estudo anterior, todos os grids estão sujeitos à mesma variação de demanda. A Figura 6.1 mostra um conjunto de 50 possíveis cenários futuros para demanda de hidrogênio.



**Figura 6.1: Exemplo de cenários de demanda**

Como apresentado na Seção 6.1, o primeiro parâmetro a ser definido no SAA é o número mínimo de cenários necessários em cada uma das rodadas, de forma a garantir níveis de confiança específicos. Para definir o número mínimo de cenários que devem ser utilizados pelo SAA, foi aplicada a técnica de simulação de Monte Carlo, onde foram gerados 10 000 cenários. O máximo desvio encontrado para o último período de análise foi de 27 977 t/d, equivalente a 6,3 vezes a demanda total esperada. A Tabela 6.1 mostra o número mínimo de cenários necessários para diferentes níveis de confiança ( $1 - \alpha$ ) calculados a partir da Equação 2.12. Nela são apresentados valores de gap de otimalidade do problema, ( $\in -\delta$ ), variando entre 5 milhões de dólares, aproximadamente 10% do valor esperado para função objetivo, até 50 milhões de dólares, relativos a 100% da função objetivo.



**Tabela 6.1: Cenários para diferentes níveis de confiança e gap (MM US\$)**

$\begin{matrix} \epsilon - \delta \\ (1 - \alpha) \end{matrix}$	5	10	20	30	40	50
0,99	771	193	49	22	13	8
0,95	734	184	46	21	12	8
0,90	706	177	45	20	12	8

Estes resultados apresentam números teóricos que são extremamente conservadores. Por exemplo, seria necessária a utilização de 706 cenários para um nível de confiança de 90% e gap de 10%, tornando impossível a utilização do procedimento de SAA. De forma a obter um número de cenários reduzido, que possa ser utilizado na prática, foi utilizada a Equação 2.15. A Tabela 6.2 apresenta este número para diferentes níveis de gap,  $\beta$ , e diferentes níveis de confiança,  $(1 - \alpha)$ . Para calcular os valores necessários para utilização da fórmula foram utilizados 50 cenários ( $N = 50$ ). A média encontrada foi de 42 106,85 MM US\$ e o desvio padrão de 2 573,61 MM US\$. Os valores obtidos neste cálculo são menores do que os apresentados e, por isto, serão utilizados como base para os experimentos cujos resultados serão apresentados na Seção 6.2.

**Tabela 6.2: Cenários para diferentes níveis de confiança e gap (%)**

$\begin{matrix} \beta \\ (1 - \alpha) \end{matrix}$	0,050	0,075	0,100	0,200	0,500
0,99	40	18	10	3	1
0,95	23	11	6	2	1
0,90	17	8	5	2	1

## 6.2 Resultados

O modelo matemático foi implementado utilizando-se o software GAMS 23.7 e resolvido pelo solver CPLEX 12.3. Para geração dos resultados, foi utilizado um computador com processador Intel Core i7 2,1GHz com 8 GB de RAM, exatamente a mesma configuração utilizada no Capítulo 5.

Para obter estimativas do limite superior e inferior, foram rodados experimentos com 5, 10 e 15 cenários ( $N$ ). Estes valores foram retirados da Tabela 6.3 para valores de  $\beta$  variando entre 0,075 e 0,1 e nível de confiança variando entre 99% e 90%. Para obter os valores de limite inferior, foram feitas 50

replicações ( $M = 50$ ), utilizando-se o tempo de solução de 5 000 s ou o gap de otimalidade de 1% como critério de parada do CPLEX.

O porte dos modelos gerados, seu valor médio de FO e a média e variância dos tempos computacionais obtidos são apresentados na Tabela 6.3. O tempo médio de solução dos experimentos foi de 392,87 s para as instâncias com 5 cenários e 3 739,39 s para instâncias com 15 cenários.

**Tabela 6.3: Porte dos experimentos do SAA**

N	Variáveis	Restrições	Tempo (s)	Desvio (s)
5	78 660	107 980	392,87	504,79
10	144 025	432 970	1 842,28	1 841,81
15	209 390	975 960	3 739,39	1 957,93

Para obter uma estimativa para o limite superior, todas as soluções encontradas na etapa anterior foram avaliadas utilizando-se 50 novas replicações ( $T = 50$ ). As três soluções que apresentaram melhor performance com relação ao valor esperado do gap (menor valor) são, então, avaliadas com 1 000 novas replicações ( $T = 1\,000$ ). A melhor solução encontrada para cada um dos experimentos é apresentada na Tabela 6.4.

**Tabela 6.4: Valores do limite inferior, superior e gap do SAA**

N	Medidas	Limite Inferior	Limite Superior	GAP
5	Valor (MM US\$)	37 649,30	37 974,09	324,79 (0,86%)
	Desvio (MM US\$)	3 350,78	1 954,92	3 879,36
	Desvio (%)	8,90	5,15	10,30*
10	Valor (MM US\$)	39 751,03	39 899,00	147,97 (0,37%)
	Desvio (MM US\$)	2 543,09	2 290,33	3 609,62
	Desvio (%)	6,40	5,74	8,61*
15	Valor (MM US\$)	40 070,58	40 129,27	58,69 (0,15%)
	Desvio (MM US\$)	2 001,51	2 239,82	3 003,80
	Desvio (%)	4,99	5,58	7,50*

\* Desvio % calculado com base no valor médio do limite inferior.

Como esperado, conforme o grau de incerteza incorporado ao modelo aumenta (representação mais abrangente), os valores dos limites inferior e superior aumentam e o gap diminui. Os valores de gap encontrados estão entre 0,86%, para experimentos com 5 cenários, e 0,15%, para experimentos com 15 cenários, são satisfatórios, sendo o objetivo atingir gaps com valores inferiores a

1%. Entretanto, o valor percentual do desvio deste gap é muito alto, variando entre 10,30 e 7,50%, sendo necessário avaliar seu intervalo de confiança para garantir a qualidade da solução. A Tabela 6.5 apresenta os valores máximos e mínimos dos intervalos de confiança do gap de otimalidade para cada um dos experimentos.

**Tabela 6.5: Intervalos de confiança para o gap**

N	Valores (%)	$(1 - \alpha) = 0,99$	$(1 - \alpha) = 0,95$	$(1 - \alpha) = 0,90$
5	Mínimo	0,02	0,22	0,33
	Máximo	1,70	1,50	1,40
10	Mínimo	-0,33	-0,16	-0,08
	Máximo	1,07	0,91	0,82
15	Mínimo	-0,46	-0,32	-0,24
	Máximo	0,76	0,611	0,54

Com base nos resultados apresentados e objetivando-se um intervalo de confiança onde o valor máximo do intervalo de confiança seja inferior a 1%, é possível afirmar que a utilização de 15 cenários é satisfatória, para um nível de confiança de 99%. Se o nível de confiança requerido for inferior a 95%, 10 cenários já serão suficientes, não sendo necessário gastar recursos computacionais com um número maior de cenários. Quanto maior o número de cenários, menor será o intervalo de confiança e maior a probabilidade de acerto da solução, porém essa melhora é contraposta pelo aumento exponencial do tempo computacional como pode ser visto na Tabela 6.4. Desta forma, tem que ser avaliado o quão necessário é essa redução do intervalo de confiança do GAP. Vale lembrar que os valores dos limites superiores e inferiores são valores estatísticos e, por isso, encontramos valores negativos dos intervalos de confiança.

O valor da informação perfeita não pode ser calculado da forma convencional demonstrada na literatura, uma vez que a demanda apresenta um número infinito de valores, por ser tratar de uma distribuição de probabilidade contínua. No entanto, é possível obter uma média e um desvio padrão para esse valor. Primeiramente é preciso calcular o valor da solução espere-e-veja (Wait and See – WS), valor ótimo do problema quando os eventos futuros são conhecidos e, então, compará-la com a solução aqui-e-agora (here-and-now), dada pela solução do limite inferior do modelo estocástico de dois estágios apresentado. Desta forma

o valor médio do EVPI e seu desvio padrão podem ser calculados pelas Equações 6.2 e 6.3.

$$\overline{EVPI} = |\overline{WS} - \overline{RP}| \quad (6.2)$$

$$\hat{s}_{EVPI}^2 = \hat{s}_{WS}^2 + \hat{s}_{RP}^2 \quad (6.3)$$

O valor médio para WS encontrado foi de 36 783,31 com desvio padrão de 5 232,50. Esses valores foram calculados utilizando 1000 cenários de replicação. Dessa forma, o valor médio do EVPI, para cada um dos experimentos realizados, pode ser visto na Tabela 6.6.

**Tabela 6.6: EVPI**

N	EV (MM US\$)	EVPI (MM US\$)	Desvio EV (MM US\$)	Desvio EVPI (MM US\$)
5	37 649,30	865,99	3 350,78	1 881,72
10	39 751,03	2 967,72	2 543,09	2 689,41
15	40 070,58	3 287,27	2 001,51	3 230,99

O valor do VSS não poderá ser calculado uma vez que faz parte da premissa do modelo de que toda a demanda deve ser atendida. Dessa forma, a solução de investimentos de infraestrutura logística para a média do valor da demanda não seria suficiente para atender a demanda caso, no cenário futuro, o crescimento do mercado fosse acima do esperado. Assim, o valor da solução esperada não pode ser calculado, inviabilizando o cálculo do VSS.

De forma a comparar as decisões de investimentos obtidas nos diferentes experimentos, foi contabilizado a capacidade de produção e de armazéns instalada em cada um dos períodos, por experimento. Estes resultados são apresentados na Tabela 6.7.

**Tabela 6.7: Plantas e armazéns instalados**

N	Período	Armazém (t/d)			Planta (t/d)		
		P	M	G	P	M	G
5	1	332,5	8 600	-	95	-	-
	2	152	22 000	-	10	-	960
	3	218	44 400	540	19	-	3 840
10	1	209	8 800	-	161,5	-	-
	2	85	22 800	-	10	-	-
	3	171	50 800	-	-	300	4 800
15	1	237	9 200	-	105	-	-
	2	76	22 200	-	-	-	-
	3	180	50 800	-	-	-	5 760

Analisando-se os dados, conforme o número de cenários aumenta, é possível observar uma tendência de concentração dos investimentos em plantas de pequeno porte no primeiro período, e de grande porte no terceiro. Este resultado reforça as conclusões obtidas por EERE (2013) apresentadas na Seção 3.3, onde é afirmado que enquanto a demanda por hidrogênio for pequena, a produção deverá ser descentralizada, utilizando-se plantas de pequeno porte. Já com o aumento da demanda, a produção centralizada será a melhor escolha, com a instalação de plantas de grande porte, para ganho de escala de produção.

Com relação aos armazéns, é possível observar que com o aumento do número de cenários considerados nas replicações, há uma tendência de antecipação das instalações destes armazéns, bem como o aumento da capacidade total de armazenagem. Isto ocorre, pois, quanto mais abrangente for a representação da incerteza, maior é a chance de haver um cenário com uma demanda muito grande e os armazéns precisarão atender essa demanda.

Para verificar se esse combustível será economicamente viável foi calculado o custo unitário desse combustível, isto é, qual será o custo para entregar o combustível ao consumidor final. Para o cálculo foi suposto uma vida útil de 20 anos para os armazéns e plantas, isto é, seus custos de implantação serão diluídos ao longo de 20 anos. A Tabela 6.8 apresenta o custo unitário médio para cada um dos períodos para o experimento do SAA com 15 cenários.

**Tabela 6.8: Custo unitário**

<b>Custos unitários (US/Kg)</b>	<b>Período</b>		
	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
<b>Ampliação da Rede</b>	0,401	0,232	0,248
<b>Contrato de Transporte</b>	1,399	0,811	0,855
<b>Operação da Rede</b>	2,025	1,974	1,967
<b>Total</b>	<b>3,825</b>	<b>3,016</b>	<b>3,070</b>

Com a utilização do SAA houve um aumento no custo esperado de entrega. Isto porque a rede está mais robusta de forma a comportar um maior crescimento da demanda. Mesmo assim os preços ainda são economicamente viáveis de serem explorados, uma vez que são apenas um pouco acima dos preços da gasolina, e podem vencer a competição pelo apelo ambiental ou implantação de políticas públicas.

## 7 Conclusão

A metodologia desenvolvida para o projeto da cadeia de suprimentos de hidrogênio é composta por um modelo matemático estocástico de dois estágios combinado com a técnica de aproximação por média amostral (SAA). Esta metodologia se diferencia das demais encontradas na literatura por permitir uma avaliação estatística da qualidade das soluções obtidas.

De forma prática, a metodologia demonstrou eficiência ao ser aplicada em um estudo de caso com dados reais da Grã-Bretanha. O modelo desenvolvido apresentou resultados computacionais mais eficientes do que os existentes na literatura obtendo gaps menores com maior rapidez. Enquanto o modelo de Almansoori & Shah (2012) demorava três dias para obter soluções com gaps de 9 a 3%, o novo modelo leva 1 minuto e meio para obter gaps de 1%, e 13 horas para gaps de 0,2%. A melhoria da qualidade da solução e da eficiência computacional foi possível graças à nova modelagem matemática desenvolvida bem como o tratamento e análise inicial dos dados.

Para lidar com a grande quantidade de cenários requerida pelo elevado nível de incerteza do problema, foi utilizada a técnica de aproximação por média amostral (SAA). Com apenas 15 cenários, foi possível obter soluções otimizadas e factíveis, uma vez que o valor da função objetivo está a 1% do seu valor ótimo, para um nível de confiança de 99%. Estes resultados comprovam a eficiência da metodologia desenvolvida para o projeto da cadeia de suprimentos do hidrogênio.

Os resultados do estudo com os dados da Grã-Bretanha demonstram que as melhores plantas de produção a serem instaladas serão as de gás metano reformado. Primeiramente, deverão ser priorizadas as instalações de plantas de pequeno porte e, conforme a demanda por hidrogênio cresça, plantas de maior porte deverão ser instaladas. Já para estocagem, os armazéns de médio porte parecem ser os mais adequados, independente da demanda por hidrogênio existente. Os resultados também demonstram que o hidrogênio já demonstra competitividade quando comparado com os outros combustíveis existentes no

mercado. Seu custo de US\$ 3,85, tende a ser amortizado cada vez mais conforme este combustível ganhe espaço no mercado.

Dessa forma, fica demonstrado que a metodologia desenvolvida é adequada para avaliar diferentes alternativas de investimento para tomada de decisão no planejamento da logística do hidrogênio. Vale ressaltar que a metodologia desenvolvida deve contribuir para os avanços na criação de uma infraestrutura apropriada para a comercialização do hidrogênio possibilitando que os carros disponibilizados no mercado possam ser utilizados pela população ajudando na redução de emissão de gases poluentes e ruídos sonoros.

Entretanto, modelos com aplicações práticas devem ser desenvolvidos continuamente, podendo sempre ser aperfeiçoados. Como continuação deste trabalho, sugere-se a inclusão de algumas melhorias já identificadas como:

- Penalização para excesso de armazéns instalados por grid;
- Limitação na distância máxima de transporte;
- Penalização para demanda não atendida, diminuindo a robustez da solução.

Por se tratar de um problema onde novas tecnologias estão sendo desenvolvidas e os custos de produção e armazenagem estão em queda acentuada, a atualização constante dos dados de análise do modelo é necessária. Os custos e tecnologias existentes também poderiam ser considerados como outras fontes de incerteza desse problema.

Recomenda-se, também, a transformação deste modelo de dois estágios para um modelo multi-estágios e aplicações em outros estudos de caso. Por último, como a busca por hidrogênio advém do fato dele ser uma energia limpa, as informações de custo ambiental deverão ser incorporadas ao modelo, uma vez que estes são relevantes para a tomada de decisão no projeto desta cadeia.



## 8

## Referências

AIE, 2013a. Renewable Energy. Acessado em 08 jan 2013: "<http://www.iea.org/aboutus/faqs/renewableenergy/>"

AIE, 2013b. CCS is a necessity for a world hooked on fossil fuels. Acessado em 08 jan 2013: "<http://www.iea.org/newsroomandevents/news/2013/january/name,34527,en.html>"

Almansoori, A. & Shah, N., 2006. Design and Operation of a Future Hydrogen Supply Chain: Snapshot Model. Chemical Engineering Research and Design, Jun. pp.423-38.

Almansoori, A. & Shah, N., 2009. Design and operation of a future hydrogen supply chain: Multi-period model. International Journal of Hydrogen Energy, Out. p.7883-7897.

Almansoori, A. & Shah, N., 2012. Design and operation of a stochastic hydrogen supply chain network under demand uncertainty. International Journal of Hydrogen Energy, pp.3965-77.

Altork, L.N. & Busby, J. R., 2010. Hydrogen fuel cells: part of the solution. Technology & Engineering Teacher, 70(2), p.22-27.

Amos, W.A., 1998. Costs of Storing and Transporting Hydrogen. Golden: National Renewable Energy Laboratory.

Arntzen, B.C., Brown, G.G., Harrison, T.P. & Trafton, L.L., 1995. Global Supply Chain Management at Digital Equipment Corporation. Interfaces, 25 jan. pp.69-93.

Ausubel, J.H., 2000. Where is Energy Going? The Industrial Physicist, p.16-19.

Beale, E., 1955. On Minizing A Convex Function Subject to Linear Inequalities. Journal of the Royal Statistical Society, Series B (Methodological), 17, 2, pp.173-84.

Beamon, B.M., 1998. Supply Chain design and analysis: Models and methods. International Journal of Production Economics, 55(3), pp.281-94.

Binder, M., Faltenbacher, M., Kentzler, M. & Schuckert, M., 2006. Clean Urban Transport for Europe (CUTE) - Final Report (deliverable no. 8). Acessado em 25 jan 2013: "[http://www.transport.wa.gov.au/ACT\\_P\\_alt\\_CUTEreport.pdf](http://www.transport.wa.gov.au/ACT_P_alt_CUTEreport.pdf)"

Birge, J.R. & Louveaux, F.V., 1997. Introduction to stochastic programming. New York, NY, USA: Springer.

Bollerslev, T., 1986. Generalized autoregressive conditional heteroskedasticity. Journal Econometrics, p.307-327.

Bowersox, D.J. & Closs, D.J., 1996. Logistical managemnt: The integrated supply chain process. Nova Iorque: McGraw-Hill.

- Box, J. & Jenkins, G., 1976. Time Series Analysis: Forecasting and Control. Holden Day.
- BP, 2005. British Petroleum Statistical Review of World Energy 2005. Surrey. p.1–44.
- Brown, G.G., Graves, G.W. & Honczarenko, M.D., 1987. Design and Operation of a Multicommodity Production/Distribution System Using Primal Goal Decomposition. *Management Science*, pp.1469-80.
- BTI, s.o.t.B.T.I., 2011. 2010 Fuel Cell Technologies Market Report. Washington: U.S. Department of Energy - Energy Efficiency & Renewable Energy.
- Carpentis, C., 1988. Storage, Transport and Distribution of Hydrogen. In Nitsch, C.-J.W.a.J. Hydrogen as an Energy Carrier: Technologies, System, Economy. Berlin: Springer-Verlag. p.249–289.
- CE, 2013. Hyways hydrogen energy in Europe. Acessado em 04 janeiro 2013: "www.hyways.de"
- Charnes, A. & Cooper, W., 1959. Chance-constrained programming. *Management Science*, pp.73-79.
- Chen, F., Drezner, Z., Ryan, J.K. & Simchi-Levi, D., 2000. Quantifying the bullwhip effect in a simple supply chain: the impact of forecasting, lead times, and information. *Management Science*, pp.436-43.
- Cho, A., 2004. Toward a Hydrogen Economy—Fire and ICE: Revving Up for H2. *Science*, p.964–965.
- Chopra, S. & Meind, P., 2007. Supply Chain Management: Strategy, planning and operation. Universidade de Michigan: Pearson Prentice Hall.
- Combs, S., 2008. Hydrogen. In The Energy Report. Texas Comptroller of Public Accounts. pp.289-304.
- Conte, M., Iacobazzi, A., Ronchetti, M. & Vellone, R., 2001. Hydrogen economy for a sustainable development: state-of-the-art and technological perspectives. *Journal of Power Sources*, pp.171-87.
- Cordis, 2013. Projects - New Methods for Superior Integrated Hydrogen Generation System. Acessado em 26 jan 2013: "http://cordis.europa.eu/search/index.cfm?fuseaction=proj.document&PJ\_RCN=7957671"
- Dagdougui, H., 2012. Models, methods and approaches for the planning and design of the future hydrogen supply chain. *International Journal of Hydrogen Energy*, Mar. p.5318–5327.
- Dantzig, G., 1955. Linear Programming Under Uncertainty. *Management Science*, (50, anexo 12), pp.1764-69.
- Dantzig, G.B. & Infanger, G., 1992. Large-scale stochastic linear programs—importance sampling and Benders decomposition. In *Computational and applied mathematics*, I. Dublin. North-Holland.
- Davis, T., 1993. Effective Supply Chain Management. *Sloan Management Review*, p.35–46.

Dempster, M.A.H. & Thompson, R.T., 1999. EVPI-based importance sampling solution procedures for multistage stochastic linear programmes on parallel MIMD architectures. *Anais of Operations Research*.

D'este, G., 2001. Freight and Logistics Modeling. In Brewer, A.M., Button, K.J. & Hensher, D.A. *Handbook of Logistics and Supply Chain Management*. Amsterdam: Elsevier Science Ltd. p.521–534.

DLR, D.Z.f.L.-u.R., 2013. Project Objectives. Acessado em 26 jan 2013: "<http://www.nemesis-project.eu/project-overview/project-objectives.html>"

DOE, U.S.D.o.E., 2006. Hydrogen Posture Plan - An Integrated Research, Development and Demonstration Plan. Acessado em 26 jan 2013: "[http://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/hydrogen\\_posture\\_plan\\_dec06.pdf](http://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/hydrogen_posture_plan_dec06.pdf)"

Doucet, A., Freitas, J.F.G. & Gordon, N.J., 2000. *Sequential Monte-Carlo Methods in Practice*. Springer-Verlag.

Draper, N.R.& Smith, H., 1998. *Applied Regression Analysis*, 3ª edição.

Drucker, P.F., 1998. Management's new paradigms. *Forbes*, Outubro, pp.152-77.

DTI, 2007. Meeting the Energy Challenge - A White Paper on Energy May 2007. Acessado em 26 jan 2013: "<http://www.official-documents.gov.uk/document/cm71/7124/7124.pdf>"

Dunn, S., 2002. Hydrogen Futures: Toward a Sustainable Energy System. *International Journal of Hydrogen Energy*, p.235–264.

Dutton, G., 2002. Hydrogen Energy Technology. In Tyndall Centre for Climate Change Research., 2002. Oxon.

EERE, 2010. Fuel Cell Technoogies Program. Energy, Energy Efficiency & Renewable Acessado em 18 jan 2013 "[http://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/pdfs/fct\\_h2\\_production.pdf](http://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/pdfs/fct_h2_production.pdf)"

EERE, 2013. Hydrogen Production - Basics. Acessado em 3 mar 2013: "<http://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/production>"

Efron, B. & Tibshirani, R., 1997. Improvements on Cross-Validation: The 632+ Bootstrap Method. *Journal of the American Statistical Association*, pp.548-60.

Emsley, J., 2011. *Nature's Building Blocks*. USA: Oxford University Press. pp.183-91.

Engle, R.F., 1982. Autoregressive Conditional Heterodasticity with Estimates of the Variance of United Kingdown Inflation. *Econometrica*, pp.987-1007.

Fair, R., & Shiller, R., 1990 Comparing information in forecasts from econometric models. *Am. Econ. Rev.*, 80, 375–389.

FCH-JU, F.C.a.H.-J.U., 2013. Who we are. Acessado em 18 jan 2013: "<http://www.fch-ju.eu/page/who-we-are>"

Forrester, J., 1958. *Industrial Dynamics*. Boston: Harvard Business Review.

Freedman, D., 1983. Approximating Countable Markov Chains. 2nd ed. New York: Springer.

Geary, S., Childerhouse, P. & D. Towill, 2002. Uncertainty and the Seamless Supply Chain. Supply Chain Management Review, p.52–61.

Geoffrion, A.M. & Graves, G.W., 1974. Multicommodity Distribution System Design by Benders Decomposition. Management Science, pp.822-44.

Geoffrion, A.M. & Powers, R.F., 1995. Twenty Years of Strategic Distribution System Design: An Evolutionary Perspective. Interfaces, pp.105-27.

Goel, V. & Grossmann, I.E., 2004. A stochastic programming approach to planning of offshore gas field developments under uncertainty in reserves. Computers & Chemical Engineering, p.1409–1429.

Goetschalckx, M. et al., 1994. Computer Aided Design of Industrial Logistics Systems. In Proceedings of the Third Triennial Symposium on Transportation Analysis (TRISTAN III). Capri, Italia, 1994.

Rustem B., Gulpinar, N. & Settergren R., 2004. Simulation and optimization approaches to scenario tree generation. Journal of Economic Dynamics and Control, 28.

Gupta, A. & Maranas, C. D., 2003. Managing demand uncertainty in supply chain planning. Computers & Chemical Engineering, 27,p.1219–1227.

Hampel, C.A., 1968. The Encyclopedia of the Chemical Elements. Van Nostrand Reinhold.

Hart, D., Leach, M., Fouquet, R., Pearson, P., & A. Bauen., 2000. Methanol Infrastructure—Will it Affect the Introduction of SPFC Vehicles? Journal of Power Sources, 86(1–2), p.542–547.

Hefner III, R.A., 2002. The Age of Energy Gases: In the New Millennium. Calgary, Canada. Acessado em 15 jan 2013: "[http://www.the-get.com/site\\_pdf/age02.pdf](http://www.the-get.com/site_pdf/age02.pdf)"

Heitsch, H. & Romisch, W., 2009. Scenario tree modelling for multistage stochastic programs. Journal Mathematical Programming, pp.371-406. Acessado em 15 jan 2013: [www.matheon.de](http://www.matheon.de)

Hoffmann, P., 2002a. Hydrogen's Discovery: Phlogiston and Inflammable Air, in Tomorrow's Energy: Hydrogen, Fuel Cells and the Prospects for a Cleaner Planet. Cambridge: MIT.

Hoffmann, P., 2002b. Hydrogen for Cars and Buses: Steaming Tailpipes. In Tomorrow's Energy: Hydrogen, Fuel Cells and the Prospects for a Cleaner Planet. Cambridge: The MIT Press. p.99–139.

Hugo, A., 2005. Environmentally Conscious Process Selection, Design and Optimization. Department of Chemical Engineering and Chemical Technology.

HyFLEET: CUTE, 2009. Hydrogen Transports - Bus Tecchnology & Fuel for TODAY and for Sustainable Future. Acessado em 26 jan 2013: "[http://hyfleetcute.com/data/HyFLEETCUTE\\_Brochure\\_Web.pdf](http://hyfleetcute.com/data/HyFLEETCUTE_Brochure_Web.pdf)"

Ierapetritou, M.G. & Pistikopoulos, E.N., 1996. Batch plant design and operations under uncertainty. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 35, p. 772

Jerrum, M. & Sinclair, A., 1996. The Markov chain Monte Carlo method: An approach to approximate counting and integration. In Hochbaum, D. *Approximation Algorithms for NP-hard Problems*. PWS Publishing. p.482–520.

Jonsbraten, T.W., 1998. Oil-field optimization under price uncertainty. *Journal of the Operational Research Society*, p.811–818.

Kim, J., Lee, Y. & Il Moon, 2011. An index-based risk assessment model for hydrogen infrastructure. *International Journal of Hydrogen Energy*, Jun. p.6387–6398.

Kim, J., Lee, Y. & Moon, I., 2008. Optimization of a hydrogen supply chain under demand uncertainty. *International Journal of Hydrogen Energy*, Set. p.4715–4729.

Kim, J. & Moon, I., 2008. Strategic design of hydrogen infrastructure considering cost and safety using multiobjective optimization. *International Journal of Hydrogen Energy*, Nov. p.5887–5896.

Kleywegt, A.J., Shapiro, A. & Mello, T.H.-d., 2002. The sample average approximation method for stochastic discrete optimization. *SIAM Journal on Optimization*, p.479–502.

Lambert, D.M. & Cooper, M.C., 2000. Issues in supply chain management. *Industrial Marketing Management*, 29, pp.65-83.

Lee, H.L. & Billington, C., 1995. The Evolution of Supply-Chain-Management Models and Practice at Hewlett-Packard. *Interfaces*, pp.42-63.

LHP, L.H.P., 2013. About. Acessado em 26 jan 2013: "<http://www.london.gov.uk/lhp/about/index.jsp>"

Li, Z., Gao, D., Chang, L., Liu, P., & Pistikopoulos, E. N., 2008. Hydrogen infrastructure design and optimization: A case study of China. *International Journal of Hydrogen Energy*, Out. p.5275–5286.

Linderoth, J. & Wright, S., 2003. Decomposition algorithms for stochastic programming on a computational grid. *Computational Optimization and Applications*, pp.207-50.

Liu, M.L. & Sahinidis, N.V., 1998. Robust process planning under uncertainty. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 37, p. 1883

Lovins, A.B. & Williams, B.D., 1999. A Strategy for the Hydrogen Transition. In 10th Annual U.S. Hydrogen Meeting National Hydrogen Association. Virginia: Rocky Mountain Institute.

Min, H. & Zhou, G., 2002. Supply chain modeling: past, present, future. *Computer and Industrial Engineering*, 43, pp.231-49.

Mitra, S., 2006. Scenario generation for stochastic programming (White Paper). Reino Unido: Optirisk Systems.

NRC, 2004. The Hydrogen Economy—Opportunities, Costs, Barriers, and R&D Needs. Washington: The National Academies Press.

Ogden, J.M., 1999a. Prospects for Building a Hydrogen Energy Infrastructure. *Annual Review of Energy and the Environment*, p.227–279.

Ogden, J.M., 1999b. Developing an Infrastructure for Hydrogen Vehicles: A Southern California Case Study. *International Journal of Hydrogen Energy*, 24(8), p.709–730.

Ogden, J., 2004. Where Will the Hydrogen Come From? System Considerations and Hydrogen Supply. In Sperling, D. & Cannon, J.S. *The Hydrogen Energy Transition: Moving Toward the Post Petroleum Age in Transportation*. Elsevier Academic Press. pp.73-92.

Oliveira, F.C.P.d.O., 2012. Petroleum Supply Chain Management under Uncertainty: Models and Algorithms. Tese de Doutorado.

Oliveira, F. & Hamacher, S., 2012. Optimization of the petroleum product supply chain under uncertainty: A case study in northern brazil. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, p.4279–4287.

OMS, 2013a. Air quality. Acessado em 08 jan 2013: "<http://www.euro.who.int/en/what-we-do/health-topics/environment-and-health/air-quality>"

OMS, 2013b. Noise. Acessado em 08 jan 2013: "<http://www.euro.who.int/en/what-we-do/health-topics/environment-and-health/noise>"

Padró, C.E.G. & Putsche, V., 1999. Survey of the Economics of Hydrogen Technologies. *National Renewable Energy Laboratory: Golden*, p.1–53.

Person, F. & Olhager, J., 2002. Performance simulation of supply chain designs. *International Journal of Production Economics*, 77, pp.231-45.

Qadrdan, M., Saboohi, Y. & Shayegan, J., 2008. A model for investigation of optimal hydrogen pathway, and evaluation of environmental impacts of hydrogen supply system. *International Journal of Hydrogen Energy*, 33, p.7314–7325.

Romm, J.J., 2004. *The Hype about Hydrogen: Fact and Fiction in the Race to Save the Climate*. Washington: Island Press.

Sabio, N., Gadalla, M., Guillén-Gosálbez, G. & Jiménez, L., 2010. Strategic planning with risk control of hydrogen supply chains for vehicle use under uncertainty in operating cost: a case study of Spain. *International Journal of Hydrogen Energy*, pp.6836-52.

Sabio, N., Kostin, A., Guillén-Gosálbez, G. & Jiménez, L., 2012. Holistic minimization of the life cycle environmental impact of hydrogen infrastructures using multi-objective optimization and principal component analysis. *International Journal of Hydrogen Energy*, pp.5385-405.

Sabri, E.H. & Beamon, B.M., 2000. A multi-objective approach to simultaneous strategic and operational planning in supply chain design. *Omega - The International Journal of Management Science*, pp.581-98.

Santoso, T., Ahmed, S., Goetschalckx, M. & Shapiro, A., 2005. A stochastic programming approach for supply chain network design under uncertainty. *European Journal of Operational Research*, pp.96-115.

Santos, F.M.S.M.D. & Santos, F.A.C.M.D., 2005. O combustível “Hidrogênio”. *Millennium*, 31, pp.252-70.

Schütz, P., Tomasgard, A. & Ahmed, S., 2009. Supply chain design under uncertainty using sample average approximation and dual decomposition. *European Journal of Operational Research*, pp.409-19.

Sen, S. & Higle, J.L., 1999. An Introductory Tutorial on Stochastic Linear Programming Models. *Interfaces*, p.33–61.

Service, R.F., 2004. Toward a Hydrogen Economy: The Carbon Conundrum. *Science*, p.962–963.

Shapiro, J.F., 2001. *Modeling the supply chain*. Duxbury Press.

Shapiro, A., Dentcheva, D. & Ruszczyński, A., 2009. Multistage Problems. In *Lectures on Stochastic Programming: Modeling and Theory*. Philadelphia, PA, USA: Society for Industrial and Applied Mathematics. Chapter 3.

Shapiro, A. & Homem-de-Mello, T., 1998. A simulation-based approach to two-stage stochastic programming with recourse. *Mathematical Programming*, p.301– 325.

Shapiro, A. & Philpott, A., 2013. A Tutorial on Stochastic Programming. [Online] Acessado em 08 jan 2013: "<http://stoprog.org/>." <http://stoprog.org/>.

Simbeck, D.R. & Chang, E., 2002. Hydrogen Supply: Cost Estimate for Hydrogen Pathways—Scoping Analysis. Golden: National Renewable Energy Laboratory.

Smith, J.R., 1995. This Hybrid Vehicle Uses Hydrogen. *Science & Technology Review*, pp.26-27.

Srinivasan, S., Mosdale, R., Stevens, P. & Yang, C., 1999. Fuel Cells: Reaching the Era of Clean and Efficient Power Generation in the Twenty-First Century. *Annual Review of Energy and Environment*, 24, p.281–328.

Stevens, G.C., 1989. Integrating the supply chain. *International Journal of physical Distribution and Material Management*, pp.3-8.

Stwertka, A., 2012. *A Guide to the Elements*. USA: Oxford University Press.

Subrahmanyam, S., Pekny, J.F. & Reklaitis, G.V., 1994. Design of Batch Chemical Plants under Market Uncertainty. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, p.2688–2701.

Taylor, J., Alderson, J., Kalyanam, K., Lyle, A., & L.A. Phillips, 1986. Technical and Economic Assessment of Methods for the Storage of Large Quantities of Hydrogen. *International Journal of Hydrogen Energy*, p.5–22.

Thomas, C.E. et al., 1998. Affordable Hydrogen Supply Pathways for Fuel Cell Vehicles. *International Journal of Hydrogen Energy*, 23(6), p.507–516.

Transport for London, 2013. Hydrogen vehicles. Acessado em 27 jan 2013: "<http://www.tfl.gov.uk/corporate/projectsandschemes/8444.aspx>"

Tsiakis, P., Shah, N. & Pantelides, C.C., 2001. Design of Multi-echelon Supply Chain Networks under Demand Uncertainty. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, p.3585–3604.

US Department of Energy, 2002. A National Vision of America's Transition to a Hydrogen Economy - To 2030 and Beyond. In *National Hydrogen Vision Meeting*. Washington, 2002.

Verweij, B., Ahmed, S., Kleywegt, A., Nemhauser, G., & Shapiro, A., 2003. The sample average approximation method applied to stochastic routing problems: a computational study. *Computational Optimization and Applications*, pp.289-333.

Voelcker, J., 2013. Green Car Reports. Acessado em 04 janeiro 2013: "www.greencarreports.com"

WHEC, 2012. World Hydrogen Energy Conference (WHEC 2012), <http://www.whec2012.com/>. In *World Hydrogen Energy Conference.*, 2012.

Yang, C. & Ogden, J., 2007. Determining the lowest-cost hydrogen delivery mode. *International Journal of Hydrogen Energy*, 32, pp.268-86.

Yildiz, B. & Kazimi, M.S., 2006. Efficiency of hydrogen production systems using alternative nuclear energy technologies. *International Journal of Hydrogen Energy*, pp.77-92.

You, F., Wassick, J.M. & Grossmann, I.E., 2009. Risk management for a global supply chain planning under uncertainty: Models and algorithms. *AIChE Journal*, p.931– 946.

Zhang, D., 2006. A network economic model for supply chain versus supply chain competition. *Omega*, pp.283-95.

Zimmermann, H.J., 1991. *Fuzzy set theory and its applications*, 2nd ed. Boston, Massachusetts, United States of America: Kluwer Academic Publishers.

Zimmermann, H.J., 2000. An Application-Oriented View of Modeling Uncertainty. *European Journal of Operational Research* , p.190–198.