



Cristiano da Silva Pinto

**Introdução de Misturas de GNV e
Hidrogênio (Hidrano) em Veículos
Convencionais no Brasil e seus Impactos
Econômicos, Ambientais e Energéticos**

77/2012

CAMPINAS
2012



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
PLANEJAMENTO DE SISTEMAS ENERGÉTICOS

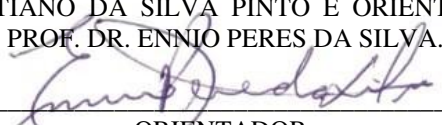
Cristiano da Silva Pinto

Introdução de Misturas de GNV e Hidrogênio (Hidrano) em Veículos Convencionais no Brasil e seus Impactos Econômicos, Ambientais e Energéticos

Orientador: Prof. Dr. Ennio Peres da Silva

Tese de Doutorado apresentada à Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas para obtenção do título de Doutor em Planejamento de Sistemas Energéticos.

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À VERSÃO FINAL DA TESE DEFENDIDA PELO ALUNO CRISTIANO DA SILVA PINTO E ORIENTADA PELO PROF. DR. ENNIO PERES DA SILVA.



ORIENTADOR

CAMPINAS, 2012

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE - UNICAMP

P658i Pinto, Cristiano da Silva
Introdução de misturas de GNV e hidrogênio
(Hidrano) em veículos convencionais no Brasil e seus
impactos econômicos, ambientais e energéticos /
Cristiano da Silva Pinto. -- Campinas, SP: [s.n.], 2012.

Orientador: Ennio Peres da Silva.
Tese de Doutorado - Universidade Estadual de
Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica.

1. Hidrogênio. 2. Gás natural. 3. Automóveis -
Combustíveis. 4. Economia de energia. 5. Eletrólise. I.
Silva, Ennio Peres da, 1956-. II. Universidade Estadual
de Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica. III.
Título.

Título em Inglês: Introduction of CNG and hydrogen (HCNG) for conventional
vehicles and its economic, environmental and energy impacts

Palavras-chave em Inglês: Hydrogen, Natural gas, Automobiles - Fuels, Energy
economics, Electrolysis

Área de concentração: Planejamento de Sistemas Energéticos

Titulação: Doutor em Planejamento de Sistemas Energéticos

Banca examinadora: Silvia Azucena Nebra de Pérez, Carlos Alberto Bandeira
Guimarães, João Carlos Camargo, Sebastião Cardoso

Data da defesa: 30-07-2012

Programa de Pós Graduação: Engenharia Mecânica

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
PLANEJAMENTO DE SISTEMAS ENERGÉTICOS**


TESE DE DOUTORADO

**Introdução de Misturas de GNV e
Hidrogênio (Hidrano) em Veículos
Convencionais no Brasil e seus Impactos
Econômicos, Ambientais e Energéticos**

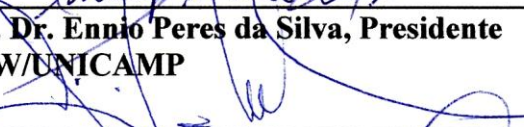
Autor: Cristiano da Silva Pinto

Orientador: Prof. Dr. Ennio Peres da Silva

A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou esta Tese:



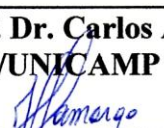
**Prof. Dr. Ennio Peres da Silva, Presidente
IFGW/UNICAMP**



**Profa. Dra. Silvia Azucena Nebra de Pérez
NIPE/UNICAMP**



**Prof. Dr. Carlos Alberto Bandeira Guimarães
FEC/UNICAMP**



**Dr. João Carlos Camargo
Hytron - Tecnologia em Hidrogênio**



**Dr. Sebastião Cardoso
VSE - Vale Soluções em Energia**

Campinas, 30 de julho de 2012

Dedicatória

Dedico este trabalho a minha amada família, presente em todos os momentos, em especial ao meu pai (*in memoriam*).

Agradecimentos

Este trabalho contou com o apoio e a colaboração de muitos colegas e amigos, sem os quais não teria chegado até aqui. Infelizmente falha a memória para agradecer nominalmente a todos.

Desejo, entretanto, agradecer mais especialmente, ao professor Ennio pela orientação ao longo dos anos que tenho feito parte do grupo do Laboratório de Hidrogênio da Unicamp.

A todos que fazem ou fizeram parte do grupo do Laboratório de Hidrogênio da Unicamp, em especial ao Newton com quem convivi e convivo mais proximamente.

Aos colegas e professores do curso de Planejamento de Sistemas Energéticos/FEM e do NIPE por compartilharem de diversos momentos da minha formação.

Aos amigos, que de uma forma ou de outra, de perto ou de longe, compartilham de minha vida, alguns que chegaram pra ficar e outros que passaram, mas certamente também deixaram suas marcas.

À minha amada família presente em todos os momentos, sejam em períodos de alegria ou de dificuldade. Sem vocês, meus pais, irmãs e irmãos, eu não teria as raízes que me apoiam, nem a força para me manter firme e tampouco a luz de minha alegria.

À Samantha, que trouxe luz à minha vida e acompanhou de perto a elaboração dessa tese, e de quem desejo a companhia e a inspiração por muito e muito tempo.

Agradeço ainda a CAPES pela bolsa de doutorado e à Faculdade de Engenharia Mecânica, ao Instituto de Física Gleb Wataghin e à Unicamp pela estrutura imprescindível.

A todos vocês, meu muito obrigado!

*Se não houver frutos, valeu a beleza das flores;
se não houver flores, valeu a sombra das folhas;
se não houver folhas, valeu a intenção da semente.*

Henrique de Souza Filho (Henfil)

Resumo

Diversas estratégias têm sido propostas para a introdução do hidrogênio na economia, especificamente no setor de transportes para se reduzir impactos ambientais em comparação com os combustíveis convencionais. Uma das estratégias implica na utilização de Hidrano (misturas de hidrogênio e Gás Natural Veicular), fazendo uso da infraestrutura de postos de GNV e dos veículos já existentes convertidos para uso de GNV. Dessa forma custos e prazos são reduzidos, tornando a introdução do hidrogênio mais promissora economicamente. Esta tese verifica se o hidrogênio pode ser imediatamente introduzido no mercado energético brasileiro através do Hidrano, com frações molares de hidrogênio de 10%, 20% e 30%. O hidrogênio será gerado através da eletrólise da água nos postos de GNV. Foram então determinados os custos do hidrogênio, os preços e a competitividade do Hidrano de forma a atender o perfil de vendas de um posto de porte médio nos Estados de São Paulo e Rio de Janeiro. O preço do Hidrano ao consumidor depende principalmente do preço de seu maior constituinte, o GNV, vendido na época a 1,308 R\$/m³ no Estado de São Paulo e a 1,662 R\$/m³ no Estado do Rio de Janeiro. O preço do Hidrano ao consumidor varia entre 1,474 R\$/m³ e 2,047 R\$/m³, dependendo de sua composição e da região. Em vista de sua competitividade em relação aos outros combustíveis automotivos, o Hidrano 10 apresenta bom potencial de introdução no mercado, inclusive do ponto de vista econômico. A competitividade entre os combustíveis no Estado de São Paulo é de 0,280 R\$/km para a gasolina, 0,259 R\$/km para o etanol, 0,111 R\$/km para o GNV, 0,129 R\$/km para o Hidrano 10 com tarifação do Grupo B3 e 0,125 R\$/km para o Hidrano 10 com tarifação do Grupo A4 Convencional. No Estado do Rio de Janeiro a competitividade é de 0,300 R\$/km para a gasolina, 0,311 R\$/km para o etanol, 0,141 R\$/km para o GNV, 0,161 R\$/km para o Hidrano 10 com tarifação do Grupo B3 e 0,157 R\$/km para o Hidrano 10 com tarifação do A4 Convencional. Também foram estimados os impactos dessa proposta em termos energéticos e ambientais. Há redução de emissões de CO₂ e CO. As emissões de THC serão possivelmente reduzidas e as de NO_x aumentadas. A proposta do Hidrano permite às concessionárias de energia elétrica entrarem no mercado de combustíveis veiculares e aumentar suas vendas. Ao mesmo tempo as concessionárias de gás natural terão reduzidas as vendas de GNV no curto prazo, o que deverá ser revertido no médio e longo prazos com os ganhos de rendimento trazidos pelo Hidrano aos veículos.

Palavras-chave: Hidrogênio; Gás natural; GNV; Combustível veicular; Eletrólise.

Abstract

Several strategies have been proposed to introduce hydrogen in the economy specifically in the transport sector in order to reduce environmental impacts of conventional fuels. One of the strategies implies in adding hydrogen to compressed natural gas (HCNG), making use of the existing refueling stations and natural gas fleet. Thus the costs and time for the introduction of hydrogen in the economy will be reduced. This thesis verifies whether hydrogen can be immediately introduced into the Brazilian energy market by means of HCNG, containing mole fractions of 10%, 20% and 30% of hydrogen, employed as fuel for conventional vehicles adapted to CNG. Hydrogen will be generated by water electrolysis in the CNG station. Then the cost of hydrogen and the prices and competitiveness of HCNG were determined to meet the sales profile of a midsize gas station in the states of Sao Paulo and Rio de Janeiro. The final price of HCNG depends mainly on the price of its major constituent, CNG, sold at that time for 1,308 R\$/m³ in the State of São Paulo and for 1,662 R\$/m³ in the State of Rio de Janeiro. The price of HCNG to the consumer varies between 1,474 R\$/m³ e 2,047 R\$/m³, depending on its composition and the region. In view of its competitiveness compared to other automotive fuels, HCNG 10 (CNG with 10% molar fraction of hydrogen) shows good potential for marketing. The competitiveness among fuels in the State of Sao Paulo is 0,280 R\$/km for gasoline, 0,259 R\$/km for ethanol, 0,111 R\$/km for CNG, 0,129 R\$/km for HCNG 10 with power tariff B3 and 0,125 R\$/km for HCNG 10 with power tariff A4 Conventional. In the State of Rio de Janeiro the competitiveness is 0,300 R\$/km for gasoline, 0,311 R\$/km for ethanol, 0,141 R\$/km for CNG, 0,161 R\$/km for HCNG 10 with power tariff B3 and 0,157 R\$/km for HCNG 10 with power tariff A4 Conventional. The energy and environmental impacts of this proposal were also estimated. There is a reduction of CO₂ and CO emissions. THC emissions are likely to be reduced and NO_x are likely to increase. The proposal of introducing HCNG allows electric utilities to enter the market for vehicular fuels and increase their sales. At the same time, natural gas utilities will have the sales of CNG reduced in the short term, although this trend may be reversed in the medium and long terms with performance gains brought by HCNG to vehicles.

Keywords: Hydrogen; Natural gas; CNG; Vehicular fuel; Electrolysis; HCNG; Hythane.

Lista de Ilustrações

Figura 2.1- Reservas provadas e relação R/P do gás natural no Brasil	10
Figura 2.2- Consumo final de gás natural no Brasil por setor em 2011	11
Figura 2.3- Consumo de combustíveis veiculares no Brasil em 2011.....	11
Figura 2.4- Evolução do GNV no Brasil: consumo, frota e postos de abastecimento	12
Figura 2.5- Preços de combustíveis automotivos ao consumidor nos Estados de São Paulo (a) e do Rio de Janeiro (b)	14
Figura 2.6- Preços de combustíveis automotivos com base no conteúdo energético para os Estados de São Paulo (a) e do Rio de Janeiro (b).....	16
Figura 2.7- Diagrama simplificado do setor de gás natural no Brasil	17
Figura 2.8- Estação de medição e totalização de um posto de abastecimento de GNV	19
Figura 2.9- Compressor de GNV	20
Figura 2.10- Feixe de cilindros de alta pressão para postos de GNV.....	20
Figura 2.11- <i>Dispenser</i> para abastecimento de GNV	21
Figura 2.12- Diagrama esquemático de um posto de abastecimento de GNV	22
Figura 2.13- Diagrama geral de um posto de abastecimento de GNV (ABNT, 1994)	23
Figura 2.14- Efeitos da razão ar/combustível sobre as emissões de um motor de ciclo Otto	35
Figura 3.1- Diagrama esquemático de um posto de abastecimento de Hidrano.....	40
Figura 3.2- Fluxograma de produção de hidrogênio para um posto de revenda de Hidrano	42
Figura 4.1- Perfil mensal de vendas horárias de GNV de um posto de porte médio (abr/2011)...	47
Figura 4.2- Perfil semanal de vendas horárias de GNV de um posto de porte médio (abr/2011).	47
Figura 4.3- Sistema de mistura de GNV e hidrogênio para composição do Hidrano	49
Figura 4.4- Demanda, produção e armazenamento de hidrogênio para um posto de Hidrano ao longo de uma semana	52
Figura 4.5- Demanda, produção e armazenamento de hidrogênio para um posto de Hidrano ao longo de dois dias	52
Figura 4.6- Preços de eletrolisadores pela capacidade de produção e pressão de trabalho	54
Figura 4.7- Contribuição de cada item para o custo do hidrogênio.....	59
Figura 4.8- Competitividade entre combustíveis no Estado de São Paulo	73

Figura 4.9- Competitividade entre combustíveis no Estado do Rio de Janeiro.....	73
Figura 4.10- Custo do quilômetro rodado em função do consumo do veículo com Hidrano no Estado de São Paulo	75
Figura 4.11- Custo do quilômetro rodado em função do consumo do veículo com Hidrano no Estado do Rio de Janeiro	75
Figura 4.12- Custo do quilômetro rodado em função do rendimento do veículo com Hidrano no Estado de São Paulo e tarifação A4 Convencional.....	78
Figura 4.13- Custo do quilômetro rodado em função do rendimento do veículo com Hidrano no Estado do Rio de Janeiro e tarifação A4 Convencional	78
Figura 4.14- Consumo de gás natural por setor em Campinas, São Paulo e Rio de Janeiro	90

Lista de Tabelas

Tabela 2.1- GNV de referência para veículos leves segundo a Resolução ANP N° 29 de 2009	7
Tabela 2.2- Frota de veículos e postos de abastecimento de GNV no mundo em 2011	8
Tabela 2.3- Alíquotas de ICMS para combustíveis em São Paulo e no Rio de Janeiro	15
Tabela 2.4- Valores médios de emissões por tipo de combustível avaliado e original do motor..	24
Tabela 2.5- Valores médios de emissões por tipo de combustível (BORSARI, 2009).....	25
Tabela 4.1- Características típicas de um posto de GNV de médio porte	46
Tabela 4.2- Médias de venda horária de GNV para um posto de médio porte	48
Tabela 4.3- Hidrogênio necessário para compor o Hidrano em um posto de médio porte	49
Tabela 4.4- Configuração de um posto de abastecimento de Hidrano de médio porte	50
Tabela 4.5- Especificações de sistemas para armazenamento de hidrogênio.....	51
Tabela 4.6- Sistemas de armazenamento de hidrogênio para cada composição de Hidrano	51
Tabela 4.7- Especificações e preços de eletrolisadores	54
Tabela 4.8- Preços de sistemas para armazenamento de hidrogênio.....	55
Tabela 4.9- Preços dos reservatórios de hidrogênio para cada composição de Hidrano.....	55
Tabela 4.10- Tarifas de energia elétrica com impostos	56
Tabela 4.11- Tarifas de água e esgoto	56
Tabela 4.12- Consumo anual de energia elétrica e água para a geração de hidrogênio de acordo com a composição do Hidrano	58
Tabela 4.13- Custo anual com insumos para geração de hidrogênio nos Estados de São Paulo e Rio de Janeiro de acordo com a composição do Hidrano e tarifas locais	58
Tabela 4.14- Dados de entrada para cálculo do VPL e determinação do custo do hidrogênio	60
Tabela 4.15- Preços de revenda do Hidrano.....	61
Tabela 4.16- Valores para o hidrogênio e Hidrano, <i>payback</i> e TIR para o posto de Hidrano (SP)	63
Tabela 4.17- Valores para o hidrogênio e Hidrano, <i>payback</i> e TIR para o posto de Hidrano (RJ).....	64
Tabela 4.18- Tarifas de energia elétrica para o Grupo A4 Convencional com impostos.....	66
Tabela 4.19- Custo anual com energia elétrica para tarifa A4 Convencional	66
Tabela 4.20- Preços de revenda do Hidrano com tarifação A4 Convencional.....	67

Tabela 4.21- Preços de combustíveis em São Paulo e no Rio de Janeiro.....	68
Tabela 4.22- Preços de combustíveis comuns e aditivados.....	68
Tabela 4.23- Consumo específico médio de veículos a gasolina, etanol e GNV	70
Tabela 4.24- Consumo específico médio de veículos a Hidrano	71
Tabela 4.25- Composição e conteúdo energético do gás natural	71
Tabela 4.26- Conteúdo energético do GNV e do Hidrano	72
Tabela 4.27- Consumo médio de veículos a gasolina, etanol, GNV e Hidrano	72
Tabela 4.28- Competitividade entre gasolina, etanol, GNV e Hidrano em São Paulo.....	72
Tabela 4.29- Competitividade entre gasolina, etanol, GNV e Hidrano no Rio de Janeiro.....	73
Tabela 4.30- Preços de combustíveis comuns e aditivados (Hidrano com tarifação A4)	77
Tabela 4.31- Competitividade entre gasolina, etanol, GNV e Hidrano para cada grupo tarifário	77
Tabela 4.32- Conteúdo energético e autonomia com GNV e Hidrano.....	80
Tabela 4.33- Emissões de CO ₂ para o Hidrano oriundas do GNV	81
Tabela 4.34- Emissões de CO ₂ para o Hidrano oriundas da produção eletrolítica de hidrogênio.	82
Tabela 4.35- Fatores de emissão de CO ₂ para o Hidrano	82
Tabela 4.36- Potencial de redução de emissões de CO ₂ para o Hidrano no Brasil	83
Tabela 4.37- Consumo de energia elétrica dos postos de Hidrano para as cidades avaliadas.....	86
Tabela 4.38- Consumo de energia elétrica total e no setor comercial em 2010.....	86
Tabela 4.39- Incremento estimado na demanda de energia elétrica para as concessionárias	87
Tabela 4.40- Consumo de gás natural por setor	88
Tabela 4.41- Redução estimada no consumo total de gás natural	89
Tabela 4.42- Impactos no consumo nacional e na importação de gás natural em 2010.....	91
Tabela 4.43- Impactos no consumo nacional de energia elétrica em 2010	92

Lista de Abreviaturas e Siglas

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

ABNT NBR - Norma Brasileira aprovada pela ABNT

ANP - Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis

BEN - Balanço Energético Nacional

BTDC - *Before Top Dead Center* (Antes do Ponto Morto Superior)

CH₄ - Metano

CO - Monóxido de Carbono

CO₂ - Dióxido de Carbono

EGR - *Exhaust Gas Recirculation* (Recirculação do Gás de Escape)

EPE - Empresa de Pesquisa Energética

FOB - *Free on Board* (Livre a Bordo - preço de produto importado sem frete, tributos e taxas)

Gasbol - Gasoduto Brasil-Bolívia

GN - Gás Natural

GNV - Gás Natural Veicular

H₂ - Hidrogênio

H₂O - Água

HCNG - *Hydrogen Enriched Compressed Natural Gas* (Gás Natural Enriquecido com Hidrogênio)

ICMS - Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços

INMETRO - Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia

IPVA - Imposto sobre a Propriedade de Veículos Automotores

MBT - *Maximum Brake Torque* (Torque Máximo em Dinamômetro)

MDL - Mecanismo de Desenvolvimento Limpo

MME - Ministério de Minas e Energia

N₂O - Óxido Nitroso

NMHC - *Non-Methane Hydrocarbons* (Hidrocarbonetos exceto o Metano)

NO_x - Óxidos de Nitrogênio

O&M - Operação e Manutenção

PCI - Poder Calorífico Inferior
PCS - Poder Calorífico Superior
PDE - Plano Decenal de Expansão de Energia
PNE - Plano Nacional de Energia
Proconve - Programa de Controle de Poluição do Ar por Veículos Automotores
RCE - Reduções Certificadas de Emissão
RJ - Estado do Rio de Janeiro
SIN - Sistema Interligado Nacional
SP - Estado de São Paulo
TIR - Taxa Interna de Retorno
THC - *Total Hydrocarbons* (Hidrocarbonetos Totais)
ULEV - *Ultra Low Emitting Vehicle* (Veículo de Emissões Ultrabaixas)
VPL - Valor Presente Líquido
WOT - *Wide Open Throttle* (Borboleta de Aceleração Totalmente Aberta)

Sumário

1	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	Tese	4
1.2	Justificativa.....	4
1.3	Objetivos	5
1.4	Estrutura da Tese	5
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	6
2.1	O Gás Natural Veicular (GNV).....	6
2.1.1	O Panorama do GNV no Brasil	9
2.1.2	Infraestrutura para o GNV	17
2.1.3	Veículos a GNV	23
2.2	Adição de Hidrogênio ao GNV (Hidrano)	27
3	METODOLOGIA E DESENVOLVIMENTO	38
3.1	Perfil de Vendas de GNV de um Posto de Porte Médio	39
3.2	Configuração Básica de um Posto de Abastecimento de Hidrano	39
3.3	Método para Dimensionamento dos Equipamentos para Produção de Hidrogênio para um Posto de Abastecimento de Hidrano	41
3.4	Determinação do Preço do Hidrano	43
3.5	Outros Impactos do Hidrano	45
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	46
4.1	Perfil de Vendas de Combustível e Dimensionamento de um Posto de Hidrano	46
4.2	Custo e Preço do Hidrano.....	53
4.2.1	Custos de Capital e O&M para a Produção de Hidrogênio no Posto de Abastecimento.....	53
4.2.2	Custos de Insumos para a Produção de Hidrogênio no Posto de Abastecimento ...	56
4.2.3	Determinação do Custo do Hidrogênio no Posto de Abastecimento de Hidrano....	57
4.2.4	Determinação do Preço de Venda do Hidrano	61
4.2.5	Preço de Venda do Hidrano, Taxa Interna de Retorno e Payback	62
4.2.6	Tarifação A4 Convencional para Postos de Hidrano	65
4.3	A Competitividade entre Hidrano, GNV, Gasolina e Etanol	67
4.3.1	Preços de Revenda dos Combustíveis	68

4.3.2	Custo do Quilômetro Rodado para cada Combustível	69
4.3.3	Competitividade do Hidrano Empregando Tarifação A4 Convencional.....	76
4.3.4	Outros Fatores com Impacto sobre a Competitividade do Hidrano	79
4.4	Impactos Ambientais do Hidrano.....	80
4.4.1	Emissões de CO ₂ a partir do Uso de Hidrano.....	81
4.4.2	Emissões de Poluentes a partir do Uso de Hidrano	84
4.5	Impactos do Hidrano sobre as Concessionárias de Energia Elétrica e Gás.....	85
4.5.1	Impactos sobre as Concessionárias de Energia Elétrica.....	86
4.5.2	Impactos sobre as Concessionárias de Gás Natural.....	88
4.6	Impactos do Hidrano sobre a Matriz Energética Nacional.....	91
5	CONCLUSÃO.....	93
5.1	Sugestões para trabalhos futuros	95
6	REFERÊNCIAS	98
	APÊNDICE A	111

1 INTRODUÇÃO

Fontes renováveis de energia e tecnologias que causem menores impactos ao ambiente têm sido cada vez mais importantes ao bem estar da sociedade e das gerações futuras e à sobrevivência de todas as espécies que habitam o planeta. Busca-se atender as necessidades e as atividades sociais e econômicas com o menor impacto ambiental possível.

Dentre as atividades humanas que causam maior prejuízo ao ambiente, o setor de transportes, em especial a utilização de automóveis em grandes centros urbanos, é uma das que mais afetam a saúde da população por causa das emissões de poluentes atmosféricos. Em âmbito global, o setor de transportes é também um dos maiores responsáveis pela emissão de gases de efeito estufa, o que pode contribuir para o aquecimento global e este, por sua vez, causar danos irreversíveis à manutenção da vida na Terra como a conhecemos.

No setor de transportes, os veículos convencionais com motores de combustão interna são as principais fontes de emissões de poluentes atmosféricos e de gases de efeito estufa. As propostas para mitigação dessas emissões são muito diversas, como por exemplo, o investimento e a maior utilização de transporte público, a locomoção a pé ou de bicicleta, a implementação de pedágios urbanos e de rodízio de veículos, o desenvolvimento e a utilização de novas tecnologias automotivas não poluentes ou menos poluentes, entre outras. Sabe-se, no entanto, que a locomoção é imprescindível e o uso de automóveis é praticamente insubstituível em nossa sociedade.

Uma das alternativas mais promissoras para se manter o padrão atual de utilização de automóveis é o desenvolvimento de veículos de emissão zero. Tais veículos em geral são elétricos e a forma de armazenamento de energia para sua locomoção pode ser realizada via baterias ou via hidrogênio e células a combustível. Os veículos elétricos a bateria sofrem críticas severas quanto à sua baixa autonomia, quanto ao longo tempo de recarga e quanto à curta vida útil das baterias, cujo custo de substituição e de reciclagem são elevados. Por outro lado, os

veículos elétricos a hidrogênio e células a combustível apresentam maior autonomia, tempo de reabastecimento semelhante ao de veículos convencionais e vida útil do sistema de potência maior do que àquela das baterias. Entretanto, esses veículos ainda têm custo muito alto, não competitivo com os automóveis convencionais, e a infraestrutura para abastecimento com hidrogênio é incipiente ou inexistente.

Apesar das desvantagens apresentadas para os veículos movidos a hidrogênio, acredita-se que a médio e longo prazo eles prevalecerão no mercado mundial, haja vista as vantagens ambientais que possuem e ao fato de o hidrogênio poder ser produzido a partir de uma vasta gama de fontes, muitas delas renováveis. Assim, a utilização de hidrogênio em veículos com células a combustível é uma solução que pode causar impactos ambientais menores ao mesmo tempo em que traz maior segurança energética, na medida que pode ser produzido através de recursos energéticos disponíveis em cada país.

Com relação aos custos para a transição da atual economia, baseada em recursos energéticos como o petróleo, para uma economia baseada na utilização do hidrogênio (Economia do Hidrogênio), estima-se que possam chegar a alguns trilhões de dólares americanos (NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 2004). Porém, essa transição deverá levar décadas para ocorrer, de forma gradual, enquanto os problemas ambientais estão a exigir soluções imediatas.

A estratégia mais plausível para a introdução do hidrogênio na economia, especificamente no setor de transportes, e ao mesmo tempo reduzir os impactos ambientais em comparação com os combustíveis convencionais, é fazer uso da infraestrutura já existente. Isso reduziria custos e prazos.

No caso da introdução gradual do hidrogênio no mercado de combustíveis, pode se fazer uso principalmente da infraestrutura para gás natural. Primeiramente, o gás natural apresenta propriedades físico-químicas similares às do hidrogênio. Além disso, o gás natural conta atualmente com uma infraestrutura bastante desenvolvida, ainda que existam limitações em alguns países. Em países como Brasil, Argentina, Irã, Paquistão e Índia, o gás natural é bastante

utilizado como combustível veicular e as frotas de cada um desses países chegam a dois milhões de automóveis.

Dessa forma, a proposta mais promissora para a introdução do hidrogênio como combustível veicular não implica na substituição completa e imediata do gás natural. Propõe-se a adição de hidrogênio ao gás natural, formando uma mistura conhecida por *Hythane*^{® 1} ou HCNG (do inglês, *Hydrogen Enriched Compressed Natural Gas*). Esse novo combustível pode ser utilizado por veículos adaptados ou dedicados ao uso de gás natural sem modificações mecânicas. Na verdade, qualquer automóvel equipado com motor do ciclo Otto pode ser adaptado para o uso de gás natural e, portanto, para o uso de misturas de hidrogênio e gás natural, com a vantagem de se reduzir as emissões de poluentes atmosféricos e de gases de efeito estufa com este último combustível. Ao contrário, veículos elétricos, a baterias ou hidrogênio e células a combustível, só poderão ser introduzidos nas frotas como veículos novos, uma vez que não há maneira prática de se converter os veículos convencionais nestas outras modalidades.

Os postos de abastecimento de Gás Natural Veicular (GNV) podem ser adaptados para produzir hidrogênio localmente e realizar a mistura desses gases. Além disso, os sistemas de produção de hidrogênio são modulares, podendo atender demandas distintas, e reversíveis, caso se opte um dia por sua desinstalação.

Nesta tese, convencionou-se utilizar o termo Hidrano para designar o combustível oriundo das misturas de hidrogênio e GNV em suas diversas composições, evitando-se marcas registradas por terceiros ou anglicismos. Em casos específicos, quando o termo Hidrano for seguido de um número, esse número corresponde à fração molar de hidrogênio contido na mistura de gás natural e hidrogênio (em outras palavras, corresponde ao volume de hidrogênio contido na mistura combustível). Por exemplo, Hidrano 15 significa uma mistura de 15% mol/mol de hidrogênio e 85% mol/mol de gás natural.

¹ *Hythane*[®] é uma marca registrada pela empresa *Hydrogen Consultants Inc.* e pertence atualmente a empresa *Eden Innovations Ltd.*

À luz desses fatos, esta tese abordará questões referentes à viabilidade técnica e econômica do Hidrano, bem como seus impactos, no contexto do planejamento de sistemas energéticos.

1.1 Tese

O hidrogênio pode ser introduzido no mercado energético brasileiro, como combustível veicular, através de sua mistura com o GNV e utilização em veículos convencionais, de maneira economicamente viável e com potencial para reduzir impactos ambientais.

1.2 Justificativa

Misturas de gás natural e hidrogênio têm sido consideradas promissoras como combustível para veículos convencionais com motores a combustão interna do ciclo Otto, capazes de reduzir emissões de poluentes e gases de efeito estufa quando comparadas às de outros combustíveis, e com potencial de introdução imediata no mercado, ao contrário de veículos a hidrogênio puro ou de veículos elétricos. Ao mesmo tempo, esse novo combustível é considerado como uma forma precoce de se introduzir o hidrogênio no mercado de energia, preparando fornecedores, consumidores e a própria infraestrutura para uma economia do hidrogênio.

O Brasil detém uma das maiores frotas de veículos e uma das mais amplas infraestruturas para GNV do mundo, com grande potencial de crescimento. Dessa forma, justifica-se avaliar o potencial para a introdução do Hidrano no país, as mudanças estruturais necessárias nos postos de abastecimento, a capacidade dos veículos atuais utilizarem o novo combustível, seu custo de produção, sua competitividade frente aos combustíveis tradicionais e seus impactos sobre o ambiente (emissões), sobre as redes de energia elétrica e de gás natural e sobre a matriz energética nacional.

1.3 Objetivos

O objetivo fundamental desta tese é determinar os custos e a competitividade da utilização do Hidrano, misturas de GNV e hidrogênio, como combustível veicular no Brasil, bem como os potenciais impactos dessa proposta em termos energéticos e ambientais.

1.4 Estrutura da Tese

Esta tese está organizada em seis capítulos, cuja estrutura está descrita a seguir:

- Capítulo 1: Introdução, contendo a tese, os objetivos, a justificativa e esta estrutura;
- Capítulo 2: Revisão Bibliográfica, englobando a literatura sobre o uso de GNV e de Hidrano;
- Capítulo 3: Metodologia e Desenvolvimento, contendo a descrição detalhada dos procedimentos realizados ao longo da tese;
- Capítulo 4: Resultados e Discussão, no qual os resultados são apresentados e discutidos à luz da metodologia proposta;
- Capítulo 5: Conclusão, onde são apresentadas as considerações finais, a análise geral da tese e dos resultados, além de sugestões para trabalhos futuros;
- Capítulo 6: Referências, que contém toda a literatura consultada para a execução desta tese.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão bibliográfica desta tese aborda fundamentalmente a utilização de GNV e de Hidrano em automóveis com motores a combustão interna do ciclo Otto, bem como a infraestrutura já existente e os aspectos energéticos e ambientais (emissões) para esses combustíveis.

2.1 O Gás Natural Veicular (GNV)

O Gás Natural Veicular (GNV) é apenas uma denominação do combustível automotivo disponível em postos de abastecimento e que nada mais é do que o próprio gás natural fornecido pelas concessionárias de gás de cada região. De acordo com a definição da Portaria ANP N° 32 de 2001 da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), o GNV é uma “mistura combustível gasosa, tipicamente proveniente do gás natural e biogás, destinada ao uso veicular e cujo componente principal é o metano” (ANP, 2001).

Outras especificações do gás natural também são fornecidas pela ANP através da Resolução ANP N° 16 de 2008, referente à especificação do gás natural, nacional ou importado, a ser comercializado em todo o território nacional (ANP, 2008), e da Resolução ANP N° 29 de 2009, referente às especificações do gás combustível veicular de referência para ensaios de avaliação de consumo de combustível e emissões veiculares para testes de homologação, certificação e desenvolvimento de veículos automotores leves e pesados (ANP, 2009). A especificação do GNV de referência para veículos leves de acordo com a ANP está apresentada na Tabela 2.1.

Tabela 2.1- GNV de referência para veículos leves segundo a Resolução ANP N° 29 de 2009

Característica	Unidade	Limites
Índice de Wobbe ²	MJ/m ³	48,0 a 50,0
Metano (mín.)	% mol/mol	86,0
Etano (máx.)	% mol/mol	10,0
Outros componentes ³ (máx.)	% mol/mol	3,0
Nitrogênio (máx.)	% mol/mol	2,0
Enxofre total (máx.)	mg/m ³	10

Fonte: Adaptado de (ANP, 2009).

O interesse no uso de gás natural como combustível veicular data da Segunda Guerra Mundial e surge por conta das seguintes características (HOEKSTRA *et al.*, 1994):

- Ampla disponibilidade (segurança energética);
- Preço baixo comparado ao da gasolina;
- Combustão que gera menos poluentes do que outros combustíveis fósseis e;
- Alta octanagem (130 octanas), o que permite taxas de compressão mais altas em motores de combustão interna e limites de inflamabilidade mais extensos do que a gasolina.

A utilização do GNV, por sua vez, apresenta algumas desvantagens (HOEKSTRA *et al.*, 1994), a saber:

- Redução da potência dos motores a combustão de ciclo Otto causado pelo menor conteúdo energético do gás por unidade de volume quando comparado ao da gasolina (PELLIZA, 2003; WRIGHT; PINKELMAN, 2008);
- Limitações da infraestrutura para abastecimento quando comparada a de outros combustíveis líquidos;
- Incremento de emissões de NO_x quando comparadas às emissões originadas da gasolina, ainda que as emissões de outros poluentes e de CO₂ possam ser inferiores (WRIGHT; PINKELMAN, 2008);

² O Índice de Wobbe (IW) é definido como a razão entre o poder calorífico superior de um gás e a raiz quadrada de sua densidade relativa (ANP, 2008), servindo como um indicador da interoperabilidade de combustores.

³ Inertes isentos de nitrogênio e hidrocarbonetos mais pesados que etano.

- Baixa velocidade de chama que pode resultar em baixa eficiência térmica, não favorece a combustão pobre (*lean burn*) e implica na necessidade do avanço da ignição de motores a combustão de ciclo Otto (GNV 50° BTDC e gasolina 35° BTDC) (PELLIZA, 2003).

Porém, ao se considerar suas características principais, o GNV tem sido utilizado como um combustível promissor por muitos países, o que pode ser confirmado pelos dados da Tabela 2.2 (NGVA EUROPE, 2011).

Tabela 2.2- Frota de veículos e postos de abastecimento de GNV no mundo em 2011

País	Frota de Veículos a GNV	Frota GNV por Frota Total	Participação no Mundo	Postos de GNV	Veículos por Posto
Irã	2.859.386	23,5%	19,7%	1.820	1.571
Paquistão	2.850.667	81,5%	19,6%	3.300	864
Argentina	2.044.131	16,0%	14,1%	1.890	1.082
Brasil *	1.702.790	4,8%	11,7%	1.729	985
Índia	1.100.376	2,6%	7,6%	724	1.520
Itália	779.090	1,9%	5,4%	858	908
China	600.000	0,6%	4,1%	2.500	240
Colômbia	348.747	12,0%	2,4%	651	536
Resto do Mundo	2.233.013	1,8%	15,4%	7.048	317
Total Mundial	14.518.200	1,3%	100,0%	20.520	708

* NGVA Europe (2011) apresenta dados inferiores aos de GasNet (2011a). Não foi possível determinar a razão dessa discrepância e os dados utilizados para fins de cálculo nessa tese são os de GasNet (2011a) que apresenta a série história brasileira desde 1991.

O Brasil encontra-se em posição de destaque no cenário mundial, contando com uma boa infraestrutura para abastecimento de GNV e uma frota numericamente significativa, que representa quase 5% de sua frota total de veículos.

2.1.1 O Panorama do GNV no Brasil

O Brasil apresenta uma frota de veículos convertidos para uso de GNV e uma infraestrutura de postos de abastecimento bem desenvolvidas. Esse desenvolvimento deveu-se não somente às vantagens técnicas do emprego do GNV, mas também a maior disponibilidade de gás natural no país a partir do final da década de 1990. A construção do gasoduto Brasil-Bolívia (Gasbol) e o contrato do tipo *take-or-pay*⁴ firmado pela Petrobras causaram um excedente de oferta de gás natural no país. A Petrobras, visando esgotar a capacidade ociosa do Gasbol manteve uma política deliberada de preços baixos entre 2003 e 2004 (ANP, 2010) e instituiu o Programa de Massificação do Uso do Gás Natural em 2004, anunciado pelo seu diretor executivo da Área de Negócios de Gás e Energia, Ildo Luis Sauer (SAUER, 2004). Concomitantemente, o incentivo de governos estaduais, especialmente com a redução de ICMS para o GNV e descontos no IPVA de veículos convertidos, e linhas de crédito especiais para a conversão dos veículos colaboraram para a rápida expansão do uso de GNV no Brasil (EPE, 2007).

Atualmente, a disponibilidade de gás natural no Brasil é crescente. As reservas provadas equivalem a $423.000 \times 10^6 \text{ m}^3$ e a relação reserva/produção (R/P) é de 23 anos, conforme ilustra a Figura 2.1 (MME, 2011). Com as recentes descobertas na Bacia de Santos e no Pré-Sal, as reservas de gás natural do país devem triplicar e a produção de gás mais do que duplicar até 2020 (EPE, 2011a). Há ainda diversos projetos de introdução de gás natural liquefeito no país (ANP, 2010). Dessa forma, deve haver também um incremento na utilização de GNV.

⁴ *Take-or-Pay* é um arranjo contratual que estabelece que o comprador do gás está obrigado a (1) receber/retirar um determinado volume mínimo de gás junto ao vendedor, pagando o preço acordado pelo volume mínimo ou (2) caso não possa retirar o volume mínimo acordado, apenas pagar o preço ajustado (SILVA, L. M. DA, 2005).

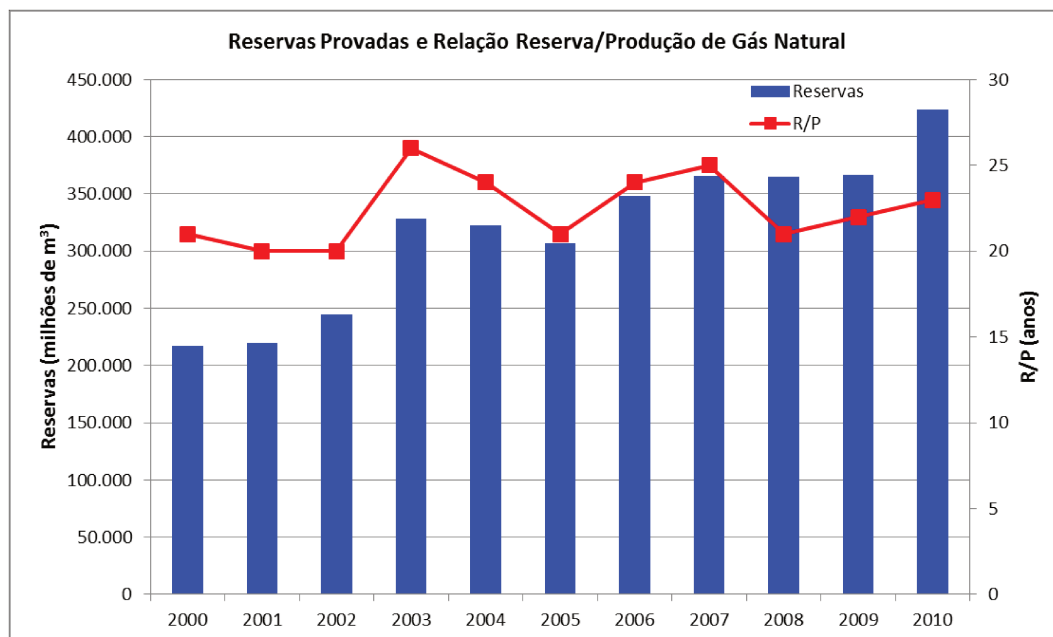


Figura 2.1- Reservas provadas e relação R/P do gás natural no Brasil

O Plano Decenal de Expansão de Energia (PDE) 2020 prevê o incremento do consumo de GNV no Brasil de $6,6 \times 10^6$ m³/dia em 2011 para $10,5 \times 10^6$ m³/dia em 2020, mas sua participação relativa no setor de transportes deve decrescer. Apesar desse prognóstico, o Brasil não apresenta uma política nacional de utilização ou incentivo ao uso de GNV. Nem o PDE 2020 e nem o Plano Nacional de Energia (PNE) 2030 fazem menção a qualquer tipo de planejamento sobre o GNV, e tampouco apresentam sugestões de política energética na área de combustíveis veiculares.

No ano de 2011, o consumo final brasileiro de gás natural nos diversos setores atingiu $18,4 \times 10^6$ tep ($20,9 \times 10^9$ m³), dos quais 9% foram utilizados no setor de transportes, unicamente para veículos a GNV (Figura 2.2). Já a participação do GNV no mercado nacional de combustíveis veiculares no mesmo ano foi de 2,5% (Figura 2.3) (EPE, 2012).

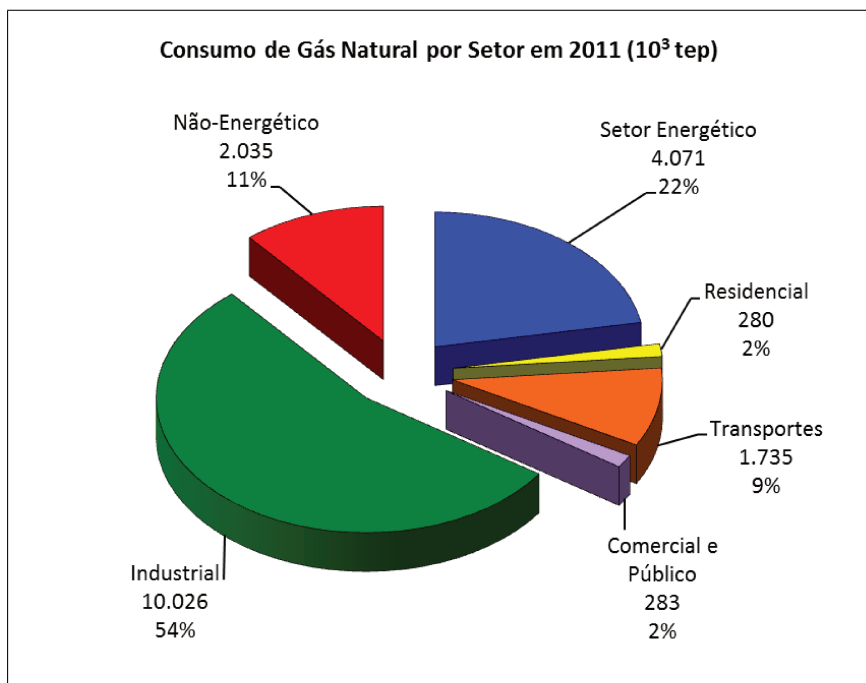


Figura 2.2- Consumo final de gás natural no Brasil por setor em 2011

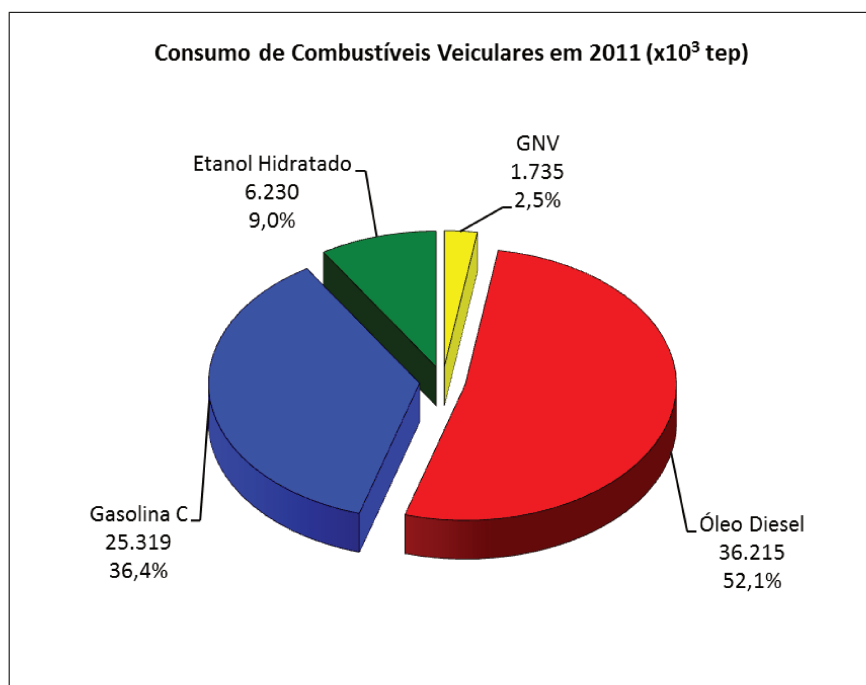


Figura 2.3- Consumo de combustíveis veiculares no Brasil em 2011

A Figura 2.4 apresenta a evolução do GNV desde sua introdução no Brasil (EPE, 2012; GASNET, 2011a, 2011b). Observa-se um crescimento constante na frota de veículos e no

número de postos de abastecimento, com maior taxa de crescimento entre 1999 e 2007 e uma taxa de crescimento menor de 2008 a 2011. Já o consumo de GNV apresenta crescimento até 2007 e queda a partir de 2008. A partir de 2009 é possível observar uma nova mudança na inflexão da curva de consumo de GNV. Os dados de consumo de GNV para o ano de 2011 indicam uma queda muito menos acentuada no consumo de GNV, possivelmente haverá uma tendência de estabilização ou novo crescimento na utilização desse combustível devido aos novos incentivos para a conversão de veículos e ao maior aumento de preços da gasolina e do etanol em relação ao gás natural.

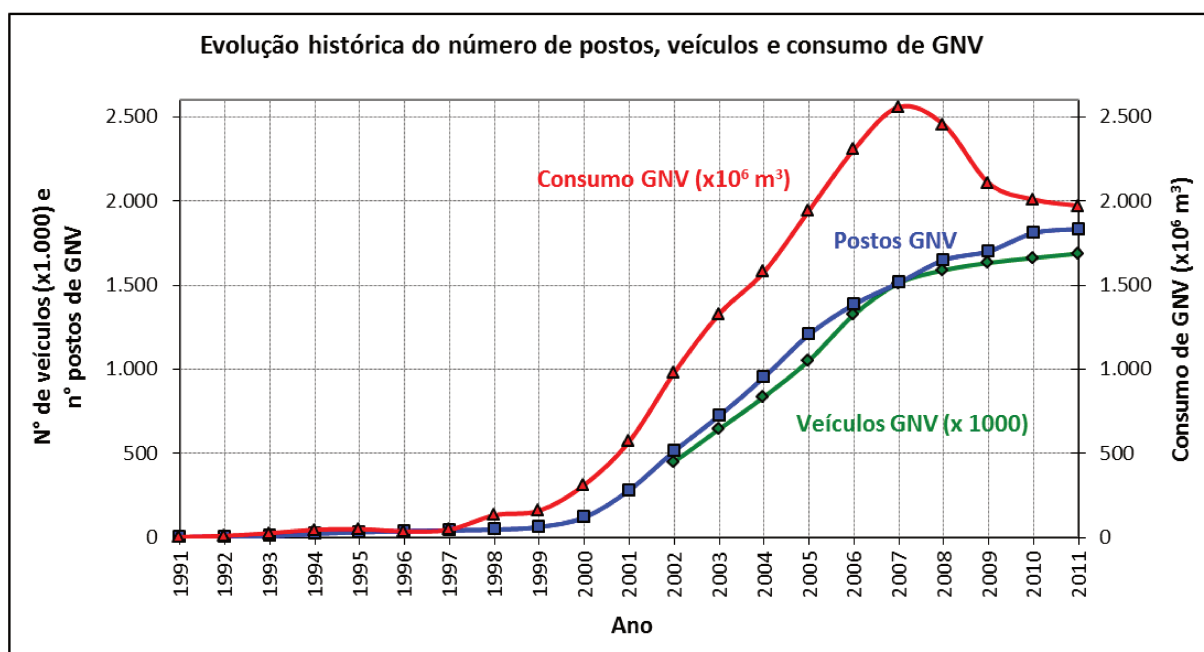


Figura 2.4- Evolução do GNV no Brasil: consumo, frota e postos de abastecimento

A retração do mercado de GNV verificada a partir de 2008 se deve a uma série de fatores de ordem política e econômica ocorridos em 2007/2008. Primeiramente, o período de estiagem ocorrido em 2007 e a conseqüente redução dos níveis dos reservatórios para geração hidrelétrica causou uma maior demanda por gás natural pelas termelétricas, momento em que a EPE e o governo federal desaconselharam a expansão do uso de GNV, ainda que houvesse garantia de manutenção da estrutura já existente (LAGE, 2007; RIBEIRO, 2007; RODRIGUES, L., 2007a, 2007b). Em seguida, ainda com a demanda de gás superior à oferta, a crise política na Bolívia em 2008 gerou uma série de inseguranças quanto ao abastecimento (“Consumo de gás cresce no país

e eleva risco ao abastecimento”, 2008, “Cronologia da crise na Bolívia”, 2008). Na mesma época, a crise financeira internacional, o aumento do preço do petróleo e a alta do dólar causaram uma elevação acentuada de preços do gás natural, enquanto que o baixo preço do etanol hidratado o tornava mais atrativo economicamente (BAHNEMANN, 2008; BRANDIMARTI, 2008; JUNIOR; SOARES, 2008). Esses fatores causaram impacto negativo sobre a percepção dos usuários de GNV e provocaram a retração das taxas de expansão do GNV no país.

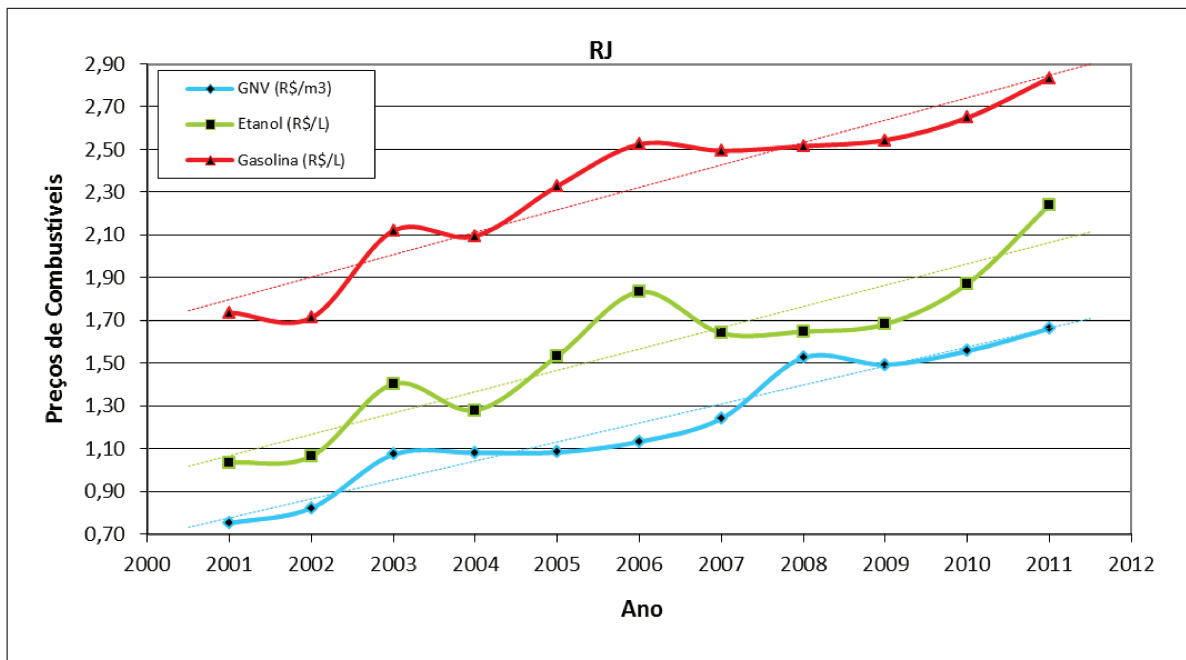
Apesar das condições desfavoráveis em 2007 e 2008, no primeiro semestre de 2009 já havia um excedente de gás natural no mercado nacional e novamente se cogitou o incentivo ao uso de GNV (BRITO, 2009), o que pode ser percebido pela mudança de inflexão da curva de consumo desse combustível entre 2009 e 2010 (Figura 2.4). A atual relação de preços entre o etanol hidratado, a gasolina e o GNV no país também contribuem para uma potencial expansão no consumo de gás.

O advento dos veículos flex⁵ (etanol hidratado e gasolina) a partir de 2003 (ANFAVEA, 2011) permitiu a opção de escolha de combustíveis por parte do consumidor. Dessa forma, o preço passou a ser um fator na escolha do combustível. Nos casos de instalação de kits de conversão para GNV nos veículos flex, essa variedade de escolha de combustíveis passa a ser ainda maior, e os preços são preponderantes na decisão do consumidor. A Figura 2.5 ilustra a evolução dos preços médios da gasolina C, do etanol hidratado e do GNV, por unidade de venda, ao consumidor nos Estados de São Paulo e Rio de Janeiro entre 2001 e 2011, segundo dados da ANP e de seu *website* (ANP, 2011, 2012). Esses Estados possuem as maiores frotas de veículos a GNV e o maior número de postos de abastecimento desse combustível (GASNET, 2011a, 2011b).

⁵ No âmbito deste trabalho convencionou-se utilizar o termo “veículos flex” para indicar aqueles veículos que podem ser abastecidos com misturas variadas de dois ou mais combustíveis armazenados no mesmo tanque (do inglês, *flexible-fuel vehicle* ou *dual-fuel vehicle*), como no caso gasolina/etanol. Já os veículos bicombustível são aqueles que podem ser abastecidos com dois ou mais combustíveis (do inglês, *bi-fuel vehicle*), mas que são armazenados em tanques distintos, como o caso gasolina/GNV (RUTZ; JANSSEN, 2007).



(a)



(b)

Figura 2.5- Preços de combustíveis automotivos ao consumidor nos Estados de São Paulo (a) e do Rio de Janeiro (b)

Uma análise dos preços dos combustíveis no Rio de Janeiro mostra que o GNV manteve-se muito competitivo ao longo de todo o período considerado. Isso se deve ao fato de que as

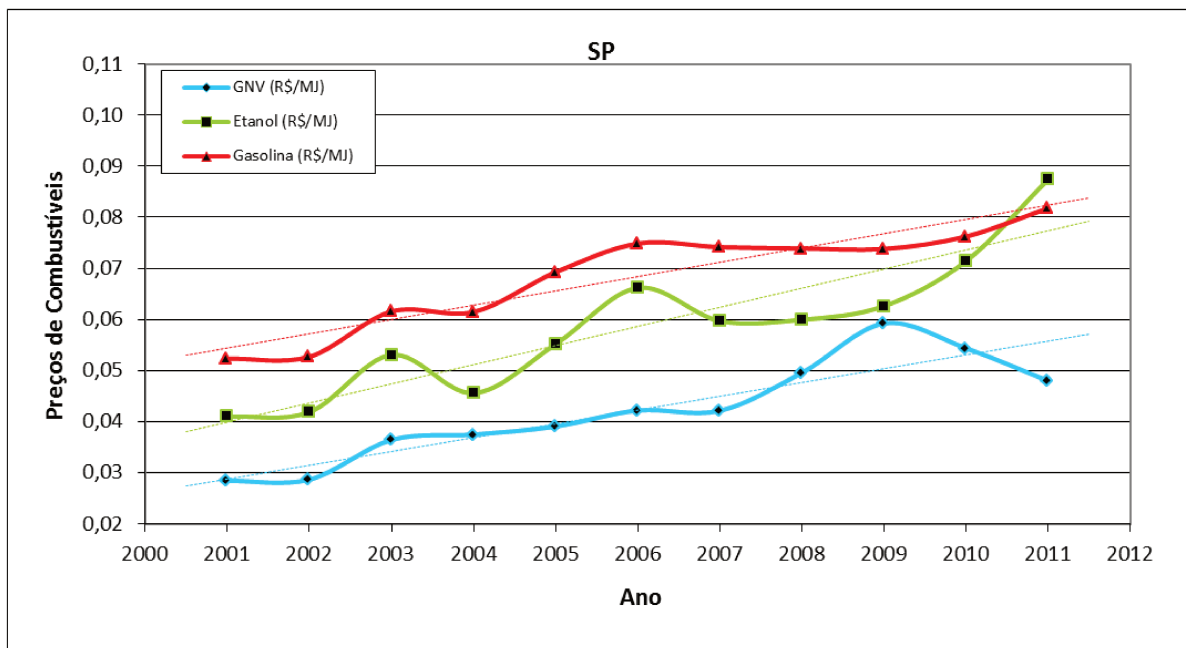
alíquotas de ICMS da gasolina e, principalmente, do etanol hidratado são elevadas em comparação com as alíquotas praticadas em São Paulo, enquanto que a alíquota para o GNV é igualmente reduzida nesses Estados (FERREIRA, A. L. M., 2007; TI IDEAL, 2012), conforme ilustra a Tabela 2.3.

Tabela 2.3- Alíquotas de ICMS para combustíveis em São Paulo e no Rio de Janeiro

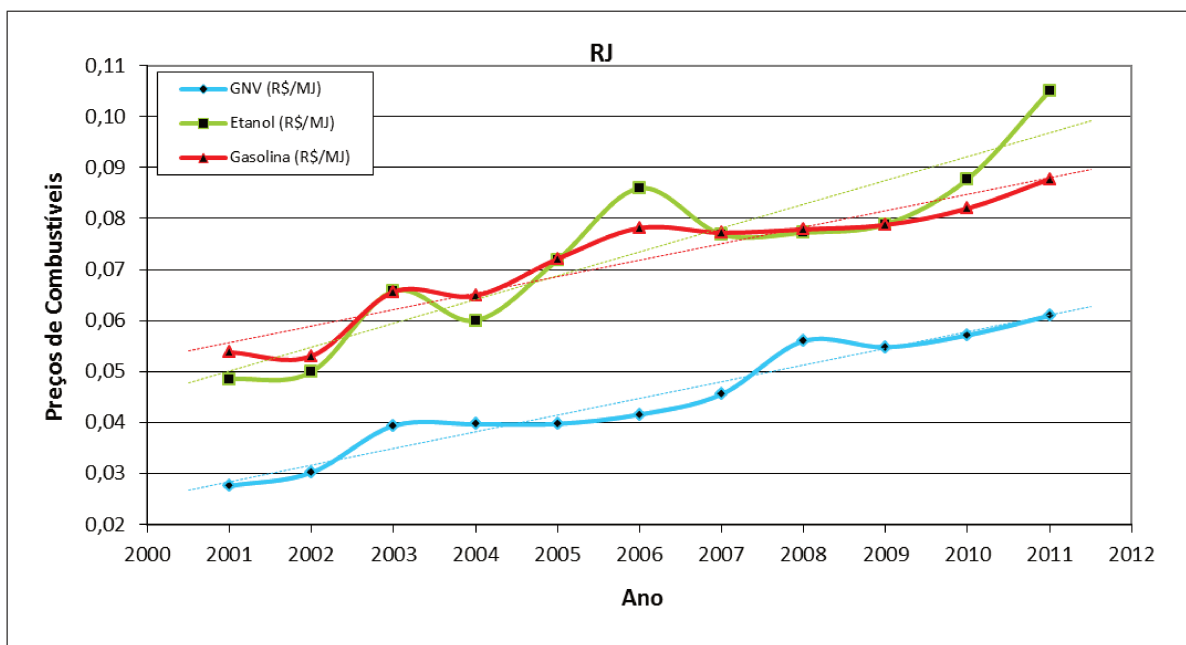
Combustível	SP	RJ
Gasolina C	25%	31%
Etanol hidratado	12%	24%
GNV	12%	12%

Quando se considera o preço do combustível com base em seu conteúdo energético (Figura 2.6), observa-se claramente que, no Estado de São Paulo, a gasolina apresenta baixa competitividade comparada ao GNV no período considerado. Assim, até o advento dos veículos flex em 2003, a conversão para GNV era considerada muito vantajosa do ponto de vista econômico. A partir de 2003, o incremento da frota de veículos flex reduziu a vantagem na conversão para GNV, uma vez que o etanol no Estado de São Paulo apresenta grande competitividade com o GNV no período considerado. Entretanto, o incremento da frota flex, com o conseqüente aumento da demanda por etanol, e a recente redução da produção desse combustível causaram elevações de preço a patamares similares ao da gasolina. Dessa forma, observa-se uma tendência atual de aproximação dos preços da gasolina e do etanol em São Paulo, o que deve tornar o GNV novamente atrativo ao consumidor do ponto de vista financeiro. Este fato já era percebido ao longo de 2011 (GASNET, 2012).

O caso do Rio de Janeiro é diferente, uma vez que o alto custo do etanol acabou por tornar o GNV atrativo ao consumidor ao longo de quase todo o período de 2001 a 2011, com exceção do ano de 2008 quando ocorreram as crises no mercado de gás natural mencionadas anteriormente. A tendência de elevação do preço do etanol nesse Estado se mostra cada vez maior, o que deve fortalecer ainda mais a competitividade do GNV (Figura 2.6).



(a)



(b)

Figura 2.6- Preços de combustíveis automotivos com base no conteúdo energético para os Estados de São Paulo (a) e do Rio de Janeiro (b)

Além do fator econômico, outras particularidades na escolha de combustíveis podem ser consideradas pelo consumidor, por exemplo a autonomia, e outras deveriam ser melhor consideradas pelo Estado, como por exemplo as emissões de poluentes atmosféricos, gases de efeito estufa e política energética.

2.1.2 Infraestrutura para o GNV

A infraestrutura para GNV no Brasil está atrelada à cadeia de exploração e produção, importação, transporte e distribuição do gás natural, e às regulações determinadas pelos agentes nacional e estaduais, conforme ilustra a Figura 2.7 (GOSMANN, 2010). No âmbito da ANP, a regulação do gás natural abrange a exploração e produção, a importação e o transporte por gasodutos e carregadores, até a chegada do gás ao *city-gate*⁶, incluindo também a especificação do gás natural, nacional ou importado, a ser comercializado em todo o território nacional. A partir do *city-gate* até o consumidor final, a regulação é feita pelas agências estaduais de serviços públicos, sendo as concessionárias responsáveis pela prestação de serviços de distribuição de gás canalizado. No caso específico do GNV, a ANP também é responsável pela especificação desse combustível e fiscalização dos postos de abastecimento.

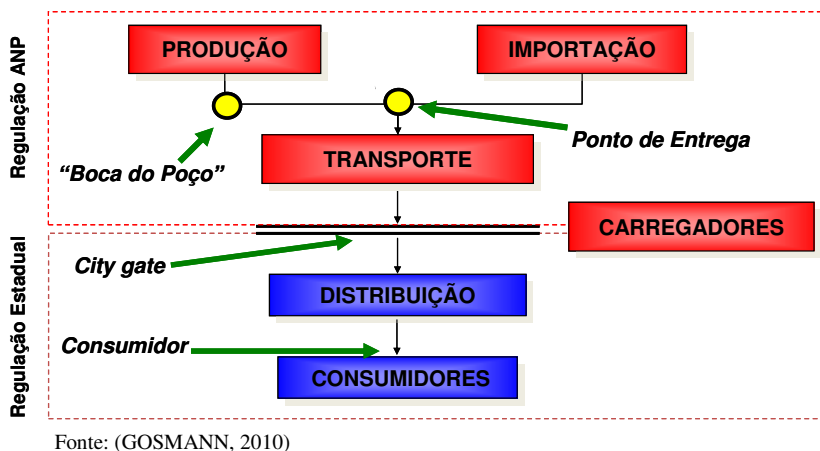


Figura 2.7- Diagrama simplificado do setor de gás natural no Brasil

⁶ *City-gate* é o ponto de acesso do gás natural a uma cidade ou grande cliente.

Com relação à infraestrutura para abastecimento de veículos a GNV, o Brasil possui papel de destaque no cenário mundial, uma vez que os dados mais fidedignos indicam que o país conta com pouco mais de 1.800 postos de abastecimento (GASNET, 2011a), conforme apresenta a Figura 2.4. A relação entre frota e número de postos de GNV é de 920 veículos para cada posto de abastecimento, isto é, dentro da média das outras cinco principais frotas de veículos a GNV no mundo, Irã, Paquistão, Argentina, Índia e Itália (NGVA EUROPE, 2011).

Os Estados do Rio de Janeiro e de São Paulo concentram cerca 55% dos postos de abastecimento de GNV do país, com 527 e 487 postos respectivamente, e com pouco mais de 1,2 milhão de veículos a GNV, cerca de 70% da frota total nacional.

Os postos de abastecimento de GNV podem ser alimentados pela rede da concessionária local de gás natural ou por um conjunto móvel de gás natural comprimido, que consiste em caminhão, semirreboque de carga, ou módulo de cilindros ou vasos de pressão instalados ou fixados permanentemente entre si (ABNT, 1994). A concepção mais comumente encontrada é a de postos alimentados pela rede da concessionária local em baixa pressão, entre 0,4 e 0,8 MPa (4 e 8 bar) ⁷.

A rede da concessionária fornece o gás natural ao posto de abastecimento através de uma estação de medição e totalização de gás, equipada com indicadores de pressão, válvulas de fechamento rápido, filtros para retenção de impurezas e medidores (Figura 2.8). A tarifação realizada pela concessionária ao posto de GNV ocorre a partir das indicações de consumo desta estação de medição. Após a estação de medição o gás segue para a compressão, mas passa anteriormente por um conjunto de filtragem e secagem, para a retenção de impurezas e remoção de umidade.

⁷ Nesta tese são empregadas as pressões manométricas dos sistemas. As pressões absolutas, quando empregadas, serão explicitamente indicadas no texto.



Figura 2.8- Estação de medição e totalização de um posto de abastecimento de GNV

O processo de compressão do GNV consiste na fase mais dispendiosa do ponto de vista energético e, portanto, econômico. Tipicamente os compressores de GNV (Figura 2.9) possuem de 3 a 4 estágios de compressão para elevar a pressão do gás de 0,4 a 0,8 MPa (4 a 8 bar) para 25 MPa (250 bar), sempre com elevadas vazões, entre 170 a 1.800 m³/h⁸. A potência elétrica demandada por tais compressores varia de 75 a 160 kW, sendo assim o item de maior consumo de energia no posto de abastecimento (ASPRO, 2012).

O gás natural comprimido é então armazenado em feixes de cilindros de alta pressão, cuja capacidade varia de acordo com a vazão do compressor e a demanda de abastecimento de veículos (Figura 2.10). Os feixes de cilindros consistem tipicamente de 9, 12 ou 16 cilindros com volume hidráulico entre 100 L e 140 L, totalizando até 2.240 L por feixe. A uma pressão de 25 MPa (250 bar) esses feixes armazenam entre 225 e 560 m³ de GNV, o que é suficiente para atender demandas para abastecimento rápido (*fastfill*) (WHITE MARTINS, 2012).

⁸ Neste trabalho volumes e vazões referem-se a CNTP, 0°C e 0,101325 MPa (1,01325 bar).



Figura 2.9- Compressor de GNV



Figura 2.10- Feixe de cilindros de alta pressão para postos de GNV

Finalmente o GNV é entregue ao consumidor através de *dispensers* no ponto ou ilha de abastecimento de veículos (Figura 2.11). O *dispenser* consiste num conjunto formado basicamente por uma mangueira e bico, com todas as facilidades necessárias para a medição da quantidade de combustível abastecida, além de filtros de entrada para limpeza do GNV e sistemas de controle para compensação da pressão de abastecimento em função da temperatura do gás. A

medição é realizada por vazão mássica, sua pressão de trabalho é de até 25 MPa (250 bar), existindo um dispositivo de bloqueio de abastecimento para pressões acima de 20 MPa (200 bar). Nos postos de abastecimento são comumente encontrados dois *dispensers* com dois bicos de abastecimento cada um.



Figura 2.11- *Dispenser* para abastecimento de GNV

Há ainda uma série de sistemas auxiliares integrantes da estação de abastecimento de GNV. Esses sistemas correspondem à tubulação de alta e de baixa pressão, painéis elétricos e de controle, sistemas de medição de pressão, temperatura e vazão, conjuntos de filtragem e secagem do gás para retenção de impurezas e retirada de umidade, válvulas e manômetros diversos para regulação de pressão e segurança, resfriadores a ar ou água especialmente para o compressor, entre outros. A instalação civil, normas de segurança e os procedimentos para abastecimento de veículos também são padronizados e podem ser considerados parte da estrutura para o GNV (ABNT, 1994).

A Figura 2.12 mostra um diagrama esquemático básico dos principais componentes de um posto de abastecimento de GNV.

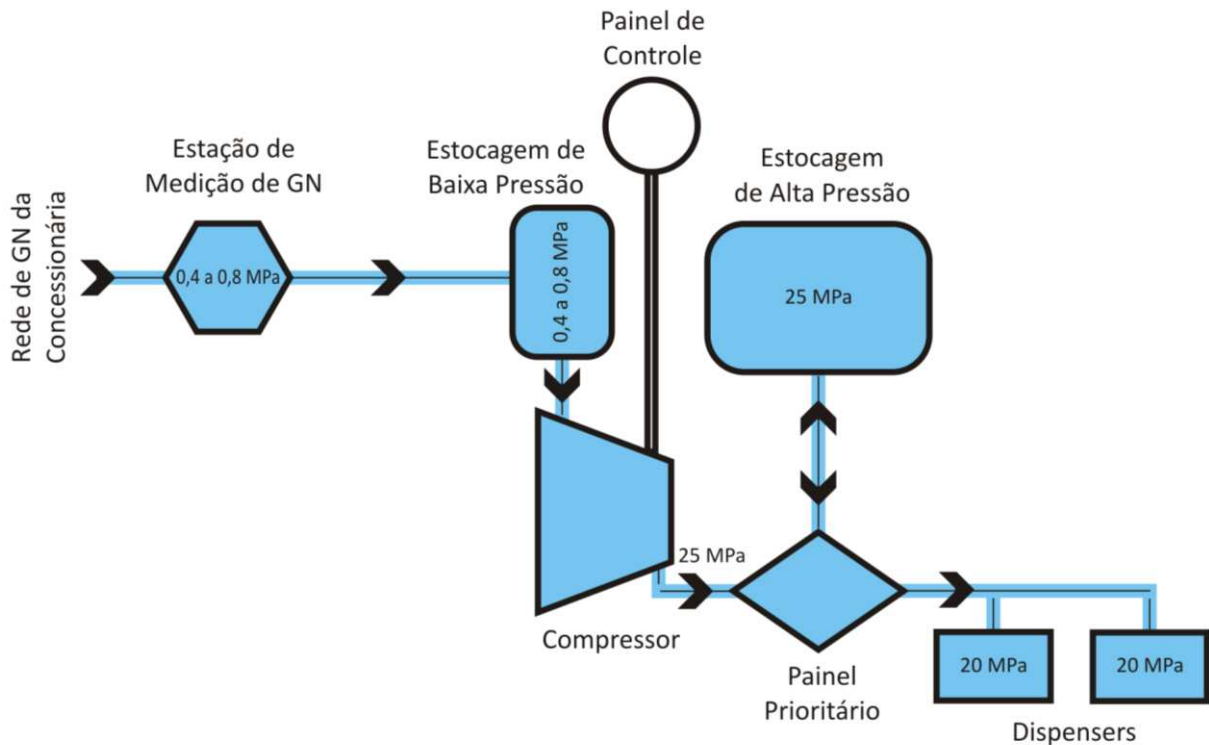


Figura 2.12- Diagrama esquemático de um posto de abastecimento de GNV

De acordo com representante da empresa Ipiranga, em comunicação pessoal (OLIVEIRA, U. A. F., 2012), o investimento médio para a introdução de GNV em um posto de combustíveis já estabelecido gira em torno de R\$ 1.000.000,00, dos quais cerca de R\$ 500.000,00 correspondem ao preço do compressor e R\$ 60.000,00 ao feixe de cilindros. O restante corresponde à infraestrutura remanescente, *dispensers*, tubulações, obras civis, entre outros. Tais valores são semelhantes aos encontrados na literatura (FERREIRA, P. F. P., 2007).

A Figura 2.13 apresenta um arranjo geral de posto de abastecimento de GNV conforme a norma ABNT NBR 12236:1994, Critérios de Projeto, Montagem e Operação de Postos de Gás Combustível Comprimido - Procedimento (ABNT, 1994). Nessa imagem estão designadas as distâncias mínimas recomendadas no caso de utilização de paredes para impedir a propagação do fogo sem comprometer sua função estrutural.

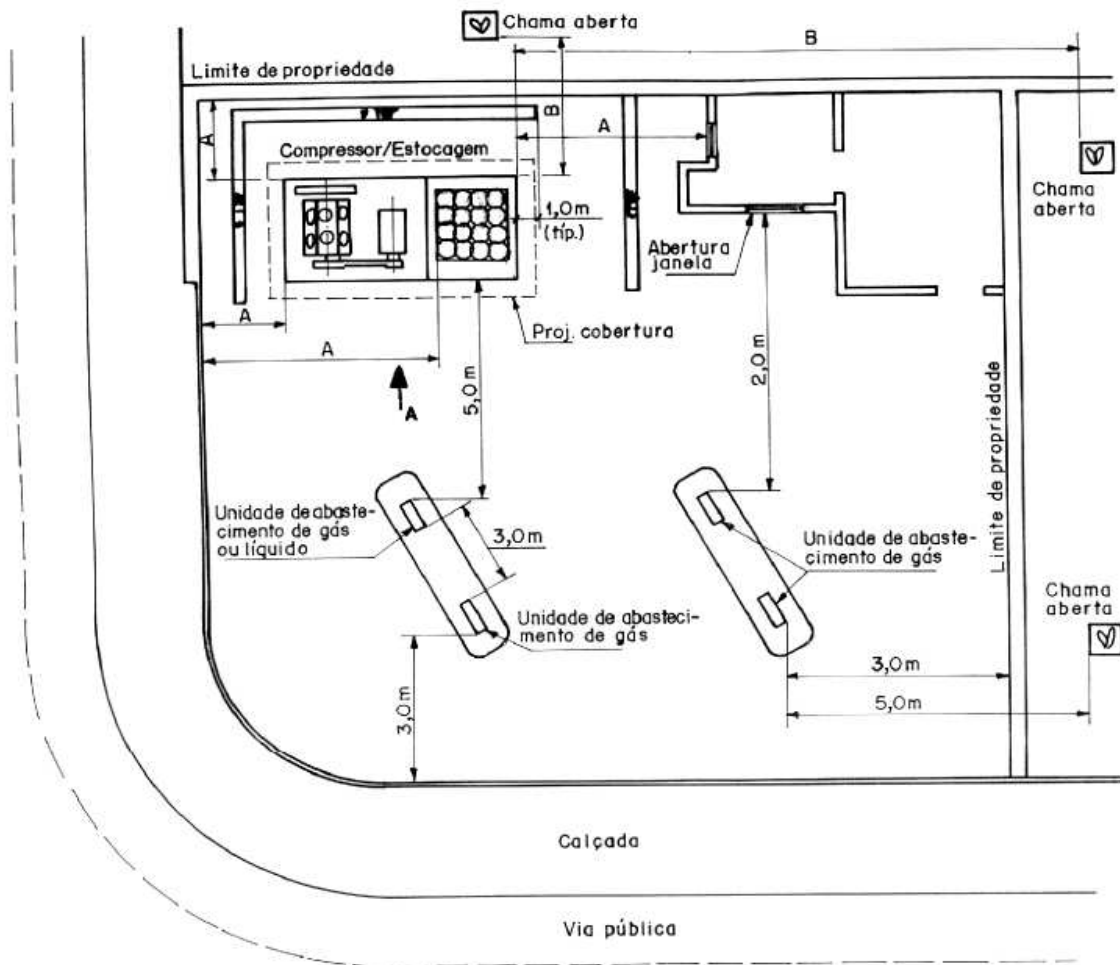


Figura 2.13- Diagrama geral de um posto de abastecimento de GNV (ABNT, 1994)

2.1.3 Veículos a GNV

Em relação aos veículos movidos a GNV, diversos trabalhos podem ser encontrados na literatura com foco em diferentes análises e características.

Pelizza (2003) avaliou os kits de conversão, as curvas de torque e potência e as emissões de veículos convertidos utilizando gasolina e GNV, e concluiu que alguns kits e ajustes de motor podem evitar muita perda de potência, aumentar a eficiência e reduzir as emissões de escape.

Valiante (2006) analisou a viabilidade técnica, econômica, ambiental e mercadológica da instalação original de fábrica de sistemas de conversão para uso de GNV em veículos leves movidos a gasolina e/ou álcool. O autor conclui que os quatro itens avaliados são viáveis, em especial a questão ambiental referente às emissões de poluentes e de CO₂. Nesse quesito e naquela época, os veículos convertidos de fábrica atendiam todas as especificações de emissões da Fase L-IV do Proconve (Programa de Controle de Poluição do Ar por Veículos Automotores). Os testes em dinamômetro com dois veículos 1.8 L, um deles a gasolina e outro a etanol, convertidos de fábrica para GNV apresentaram emissões médias de poluentes, com exceção do NO_x, inferiores para o GNV em relação aos combustíveis originais. A Tabela 2.4 apresenta o sumário dos dados médios obtidos por Valiante (2006) e os limites do Proconve L-IV e L-V (IBAMA, 2004). A comparação dos dados obtidos nesse estudo de 2006 com os limites impostos pelo Proconve Fase L-V de 2009 (IBAMA, 2004), inclusive para emissões de aldeídos, mostra que apenas as emissões de NMHC (Hidrocarbonetos exceto o Metano) e NO_x excederam os limites. No caso das emissões de NMHC, nenhum dos combustíveis utilizados nos veículos da avaliação atingiria os limites atuais do Proconve (0,05 g/km), embora o resultado mais próximo tenha sido obtido com GNV em motor originalmente a etanol (0,06 g/km). No caso das emissões de NO_x, apenas o motor originalmente a gasolina utilizando GNV ultrapassa o limite atual do Proconve.

Tabela 2.4- Valores médios de emissões por tipo de combustível avaliado e original do motor

Combustível avaliado/ Combustível original	Aldeídos (g/km)	THC (g/km)	CH ₄ (g/km)	NMHC (g/km)	CO (g/km)	CO ₂ (g/km)	NO _x (g/km)
Gasolina/gasolina	0,0045	0,10	0,01	0,09	0,92	203,8	0,08
GNV/gasolina	0,0041	0,21	0,10	0,11	0,63	161,9	0,24
Etanol/etanol	0,0127	0,18	0,06	0,12	1,16	179,0	0,05
GNV/etanol	0,0097	0,15	0,09	0,06	0,51	150,7	0,07
Proconve L-IV	0,03 ⁽¹⁾	0,3 ⁽²⁾	--	0,16	2,0	--	0,25
Proconve L-V	0,02 ⁽¹⁾	0,3 ⁽²⁾	--	0,05	2,0	--	0,12

⁽¹⁾ Aplicável apenas a veículos movidos a gasolina ou etanol

⁽²⁾ Aplicável apenas a veículos movidos a GNV

Outra informação relevante obtida por Valiante (2006) refere-se ao desempenho dos motores. O autor conclui que a conversão para uso de GNV é mais viável em motores originalmente movidos a etanol do que em motores movidos a gasolina, uma vez que a taxa de compressão é maior em motores a etanol (cerca de 13:1) e, portanto, mais próxima às taxas de compressão ideais para uso de GNV (entre 15:1 e 16:1). Esse fato permite atingir maiores eficiências em motores a etanol utilizando GNV.

Fernandes (2009) avaliou as emissões de CO e THC de 384 veículos movidos a gasolina e flex adaptados ao uso de GNV. O trabalho estatístico indica que as emissões de CO para o GNV são 62% menores do que para a gasolina ou o etanol e as emissões de THC para os três combustíveis não apresentam diferenças significativas. O autor ainda conclui que a eficiência dos conversores catalíticos é sensivelmente reduzida a partir de seis anos de utilização, o que pode implicar em emissões elevadas de poluentes para frotas mais antigas, sendo necessário instituir inspeções veiculares mais rigorosas independentemente do combustível utilizado.

Borsari (2009) comparou as emissões de uma frota de veículos leves utilizando GNV, etanol e gasolina. A frota era estatisticamente representativa da frota do Estado de São Paulo na época, isto é, 10% de veículos flex, 15% de veículos a etanol e 75% de veículos a gasolina, sendo que dos 21 veículos amostrados, 2 eram convertidos para uso de GNV. As emissões médias para cada tipo de combustível são apresentadas na Tabela 2.5, observando-se que para o GNV também ocorrem emissões fugitivas de CH₄, isto é, emissões atribuídas a vazamentos no sistema de alimentação dos veículos e queima incompleta do combustível.

Tabela 2.5- Valores médios de emissões por tipo de combustível (BORSARI, 2009)

	CO ₂ (g/km)	CH ₄ (g/km)	N ₂ O (g/km)
Etanol	193,1	0,050	0,017
Gasolina	193,5	0,051	0,068
GNV	170,9	0,590	0,033

Dondero e Goldemberg (2005) compararam as emissões de veículos à gasolina convertidos para GNV no Brasil. A frota composta de 21 veículos apresentou, em sua maioria, emissões de

CO₂, CO e NMHC menores para GNV do que para gasolina, mas emissões maiores de NO_x e THC para o gás. Na conclusão do artigo, os autores atribuem esse incremento das emissões de NO_x e THC ao uso de kits de conversão e oficinas não homologadas e à falta de ajustes nos motores pós-conversão, uma vez que os veículos homologados dessa frota apresentaram emissões inferiores de todos os gases com o uso de GNV.

Aslam *et al.* (2006) encontraram resultados semelhantes aos anteriores com um motor de ciclo Otto a gasolina convertido para uso de GNV. A operação do motor utilizando GNV apresentou consumo de energia 17% a 18% menor e eficiência de conversão de combustível (eficiência térmica) 2,9% superior quando comparado ao uso de gasolina. Na mesma comparação, houve redução das emissões de CO, CO₂ e THC com o uso de GNV em 80%, 20% e 50%, respectivamente e incremento das emissões de NO_x em 33%.

A avaliação de um motor a gasolina convertido para GNV realizada por Jahirul *et al.* (2010) determinou ainda uma redução na potência do motor com a utilização de gás, mas confirmou os ganhos de eficiência térmica, entre 1,1% e 1,6%, e a redução do consumo de energia em 15%. Com relação às emissões de CO, CO₂ e THC, os autores detectaram reduções de até 46%, 35% e 30% respectivamente a favor do GNV. As emissões de NO_x com o uso de GNV em comparação ao uso de gasolina apresentaram uma elevação de até 41%.

Um estudo mais recente sobre veículos a GNV parece levar a resultados muito promissores. O trabalho de Zhang *et al.* (2011) avaliou uma frota de taxis composta de 41 veículos de três modelos diferentes originalmente movidos a gasolina com kit de conversão para GNV. Nessa avaliação foi utilizado o protocolo europeu para emissões veiculares ECE-15, que segundo os autores é bastante representativo das condições reais de operação dos automóveis. Os autores verificaram que as emissões de CO, THC e NO_x foram respectivamente 30,34%, 15,30% e 7,22% menores para o GNV quando comparadas às emissões oriundas do uso de gasolina. Também foi avaliada a influência da idade (quilometragem) da frota sobre as emissões. Observou-se que as emissões são menores para os veículos mais novos (até 200.000 km rodados) e maiores para veículos mais velhos (até 700.000 km rodados) e que a taxa de crescimento das emissões em função da quilometragem é maior para a gasolina do que para o GNV.

2.2 Adição de Hidrogênio ao GNV (Hidrano)

O uso de GNV em motores a combustão de ciclo Otto apresenta as desvantagens indicadas na seção 2.1 (página 7). Entretanto, tais desvantagens podem ser minimizadas ou eliminadas com a adição de hidrogênio ao GNV, com o objetivo de se reduzir ainda mais as emissões de poluentes e de dióxido de carbono.

Os efeitos da adição de hidrogênio em outros combustíveis têm sido estudados há muitos anos (LEWIS; ELBE, 1987). Mais recentemente diversos autores abordaram a questão da adição de hidrogênio ao gás natural para uso como combustível veicular.

Historicamente, as misturas de GNV e hidrogênio começaram a ser denominadas *Hythane*[®] ou HCNG, do inglês *Hydrogen Enriched Compressed Natural Gas*. A marca *Hythane*[®] foi criada por Franklin Lynch e Roger Marmaro e registrada em 1991 pela empresa *Hydrogen Consultants Inc.* (HYDROGEN CONSULTANTS INC.; EDEN INNOVATIONS LTD., 1991; HYTHANE COMPANY, 2012), hoje pertencente ao grupo *Eden Innovations Ltd.* Especificamente, a marca *Hythane*[®] refere-se a misturas de hidrogênio e gás natural com até 20% de hidrogênio em volume. Misturas com mais de 20% de hidrogênio em volume são denominadas de HCNG, expressão criada por Kirk Collier e Neal Mulligan (MILLER, 2006). Convencionou-se nesta tese empregar o termo Hidrano para evitar anglicismos ou o uso de marcas registradas.

Em princípio, sugeriu-se a adição de hidrogênio ao GNV em motores a combustão de ciclo Otto principalmente para se reduzir emissões de poluentes atmosféricos sem o emprego de catalisadores de escape. Sabe-se que a combustão estequiométrica de GNV e ar nesses motores implica emissões mais baixas de CO₂, CO e THC quando comparada a outros combustíveis fósseis. Entretanto, há elevadas emissões de NO_x. Para se reduzir significativamente as emissões de NO_x, a combustão pobre pode ser empregada. A combustão pobre (*lean burn*) ocorre em condições nas quais há excesso de ar em comparação com a combustão estequiométrica.

Entretanto, o limite de combustão pobre do GNV é relativamente baixo devido as suas características, notadamente sua baixa velocidade de chama, quando comparado a outros combustíveis. Na combustão pobre de GNV, o motor apresenta falhas na ignição e baixa estabilidade (variações cíclicas), perde desempenho e produz maiores emissões de THC. Dessa forma o hidrogênio, cuja velocidade de chama é muito superior à do GNV, permite estender o limite de combustão pobre, mantendo o desempenho e a estabilidade do motor e evitando maiores emissões (GENOVESE *et al.*, 2011).

Além das questões ambientais, alguns especialistas (BOSE, 2006; MILLER, 2006) consideram o Hidrano como uma estratégia de transição para uma economia baseada no hidrogênio, isto é, para se introduzir o hidrogênio no mercado energético. Atualmente os custos do hidrogênio e de veículos com células a combustível movidos a hidrogênio são muito elevados, além de não haver uma infraestrutura específica para hidrogênio combustível, nem grandes frotas de veículos que possam utilizá-lo. Dessa forma, a utilização da infraestrutura para gás natural e a adição de hidrogênio ao gás consistem numa maneira mais rápida e mais atraente economicamente para se introduzir o hidrogênio como combustível veicular. Além disso, os veículos convencionais que podem utilizar o Hidrano como combustível já têm uma ampla estrutura para manutenção, peças de reposição facilmente encontradas no mercado e grande volume de manufatura.

De acordo com informações do grupo de trabalho SC 5/TC 22 da *International Organization for Standardization* (ISO) sobre a utilização de combustíveis gasosos em veículos rodoviários, os motores convertidos para GNV podem trabalhar com misturas contendo até 35% mol/mol de hidrogênio em gás natural. A partir desse limite, os motores necessitam de alterações mecânicas ou motores especialmente projetados para essas misturas devem ser empregados (BASSI, 2009).

Um dos primeiros estudos práticos sobre a utilização de gás natural, hidrogênio e Hidrano em veículos com motor a combustão interna de ciclo Otto foi realizado por Nagalingam *et al.* (1983). Os autores empregaram um motor de pesquisas de um cilindro, quatro tempos, com volume de deslocamento de 1,6 L e taxa de compressão de 11,7:1. Os combustíveis utilizados

foram GNV, Hidrano 20, Hidrano 50 e hidrogênio puro. O tempo de ignição foi ajustado para se obter o torque máximo para cada combustível e o motor foi operado em regime de rotação constante (2000 rpm), com a borboleta de aceleração totalmente aberta (WOT, do inglês *wide open throttle*). Os resultados obtidos indicam que a adição de hidrogênio permitiu a extensão do limite de combustão pobre, mas houve redução da eficiência térmica e aumento das emissões de NO_x . Entretanto, o motor utilizado neste trabalho não possuía sistemas de controle eletrônico de ignição e injeção, além de não considerar o uso de conversores catalíticos na exaustão.

Wallace e Catellan (1994) avaliaram o GNV e o Hidrano 15 em um motor Chevrolet Lumina V6 de 3,1 L, com taxa de compressão de 8,8:1. Os testes de desempenho do motor em dinamômetro de bancada foram realizados para rotações de 1200 e 1800 rpm, cargas de 0%, 15% e 30% da carga máxima suportada pelo motor (220 Nm), com e sem ajuste do tempo de ignição. As emissões de poluentes foram aferidas pré e pós-conversor catalítico. O trabalho mostra que na comparação do Hidrano 15 com o GNV, sem ajustes no tempo de ignição, o pior resultado levou ao aumento de consumo de combustível em 1%, redução das emissões de CO_2 , CO e THC em 4%, 5% e 10% respectivamente e incremento das emissões de NO_x em 68%. O melhor resultado, sem ajustes no tempo de ignição, levou à redução do consumo de combustível em 27% e redução das emissões de CO_2 , CO e THC em 9%, 14% e 20% respectivamente, com um incremento das emissões de NO_x em 17%. Por fim, testes foram realizados ajustando-se o motor para que os níveis de emissões de NO_x com Hidrano 15 e com GNV fossem iguais, o que resultou em consumos e emissões de CO_2 e CO equivalentes e redução nas emissões de THC em 15%. As emissões aferidas pós-conversor catalítico foram ainda mais baixas para ambos os combustíveis.

Testes de motores de grande porte para automóveis e caminhonetes, como o motor Chevrolet 350 V8 5,7 L, utilizando misturas diversas de Hidrano, foram realizados extensivamente nos anos de 1990 (HOEKSTRA *et al.*, 1994, 1995; LYNCH; FULTON, 1994; RAMAN *et al.*, 1994). Outras pesquisas incluíram a avaliação de veículos a GNV ou veículos a gasolina convertidos para operarem também com GNV e Hidrano (KARNER; FRANCFORT, 2003). Esses trabalhos confirmaram que a relação entre as emissões de THC e NO_x são inversamente proporcionais, isto é, ao se ajustarem as condições de operação do motor e a composição do Hidrano para se obter menores emissões de NO_x , as emissões de THC são

incrementadas. Em algumas condições específicas de operação, em especial em situações próximas ao limite de combustão pobre com Hidrano 20 ou superior, foi possível reduzir simultaneamente as emissões de THC e NO_x. Com o uso de conversores catalíticos, as emissões eram sempre reduzidas a ponto de se atingir os limites mais restritivos das legislações californianas para veículos de emissões ultrabaixas (ULEV – *Ultra Low Emitting Vehicle*). Esses trabalhos (HOEKSTRA *et al.*, 1994, 1995) afirmam que os melhores combustíveis para a redução das emissões de NO_x são misturas de Hidrano 28 a Hidrano 36 em condições de combustão pobre.

Em todos os estudos, os motores a combustão interna de ciclo Otto demandam ajustes no tempo de ignição para se obter os melhores desempenhos e as menores emissões. Em geral, tal tarefa era considerada complexa nos antigos motores sem sistemas de controle e gerenciamento computadorizados, em especial sem as Unidades de Comando Eletrônico (BOSCH, 2005) agora disponíveis em todos os veículos. Tais sistemas de controle de ignição permitem uma ampla gama de ajustes pré-programados (mapas de ângulo de ignição, rotação e enchimento relativo de ar), o que implica em tempos de ignição e condições de operação (rotação, carga e temperatura) ideais para cada tipo de combustível. A literatura analisada reflete tal evolução, mas em todos os casos os motores são operados com o tempo de ignição corrigido para se obter o torque máximo em dinamômetro (MBT, do inglês *maximum brake torque*).

Diversos estudos indicam que a adição de hidrogênio ao GNV contribui para estender o limite de combustão pobre e para estabilizar a operação de motores dos mais diversos portes, sejam motores de um cilindro para pesquisas (KARIM *et al.*, 1996; LIU, B. *et al.*, 2008; MOHAMMED; BAHAROM; AZIZ, 2011; MOHAMMED; BAHAROM; AZIZ; *et al.*, 2011; WANG, J. H.; CHEN, H. *et al.*, 2008), sejam motores automotivos de médio ou grande porte (BELL; GUPTA, 1997; BYSVEEN, 2007; MA, F. H.; WANG, Y., 2008; MA, F. H. *et al.*, 2007; MA, F. H.; WANG, J. J.; WANG, Y.; WANG, Y. F.; LI; *et al.*, 2008; MA, F. H.; DING; *et al.*, 2009; MA, F. H.; WANG, M. Y.; JIANG, L.; CHEN, R. Z. *et al.*, 2010). Tais resultados foram verificados em modelos matemáticos (MA, F. H.; WANG, Y. *et al.*, 2008) e confirmados através de experimentos em câmaras de combustão de volume constante (WANG, J. H. *et al.*, 2009; WANG, J. H.; HUANG, Z. H. *et al.*, 2008a, 2008b).

Com relação à eficiência dos motores operando com Hidrano, há controvérsias a respeito das misturas ideais de gases combustíveis e a forma de operação dos motores. Entretanto, a maior parte dos trabalhos da literatura indica eficiências com Hidrano até 27% superiores às eficiências obtidas com GNV (AKANSU *et al.*, 2007; BAUER; FOREST, 2001a; BYSVEEN, 2007; CEPER, B. A. *et al.*, 2009; HUANG, Z. H.; WANG, J. H. *et al.*, 2006, 2007; KAHRAMAN, N. *et al.*, 2009; KARIM *et al.*, 1996; MA, F. H.; LIU, H. Q. *et al.*, 2008; MA, F. H.; WANG, J. J.; WANG, Y.; WANG, Y. F.; LI; *et al.*, 2008; MA, F. H.; WANG, M. Y.; JIANG, L.; DENG, J. A. *et al.*, 2010; MA, F. H. *et al.*, 2007; MA, F. H.; DING; *et al.*, 2009; MOHAMMED; BAHAROM; AZIZ, 2011; PARK, C. *et al.*, 2011; SHRESTHA; KARIM, 1999; WANG, J. H. *et al.*, 2007; XU *et al.*, 2010).

Observa-se que o ganho de eficiência mais comumente encontrado na literatura situa-se entre 3% e 10%, o que já é significativo (AKANSU *et al.*, 2004; DIMOPOULOS *et al.*, 2007, 2008; GENOVESE *et al.*, 2011; MA, F. H.; WANG, J. J.; WANG, Y.; WANG, Y. F.; ZHONG; *et al.*, 2008; MA, F. H.; WANG, Y. F. *et al.*, 2009; MORRONE; UNICH, 2009; ORTENZI *et al.*, 2008; PARK, J. *et al.*, 2011). Alguns estudos indicam ganhos maiores de eficiência, entre 27% e 30%, mas em condições muito especiais de operação com motores turbo assistidos e/ou grandes taxas de recirculação do gás de escape (EGR) para geradores estacionários (JEONG *et al.*, 2009). Um único estudo refletiu tal ganho para aplicações automotivas (WALLACE; CATELLAN, 1994), com ganho de eficiência de 27% no caso de ajustes ideais do motor em baixas rotações e sem carga, mas mesmo neste estudo os ganhos médios não são superiores a 5% nas diversas cargas e rotações avaliadas.

Trabalhos experimentais e teóricos considerando a eficiência de acordo com a Primeira e Segunda Leis da Termodinâmica e o emprego de Hidrano em motores automotivos também apresentam resultados favoráveis para esse combustível. Em um dos primeiros estudos realizados, Kahraman *et al.* (2007) avaliaram o uso de um motor FIAT de 1,2 L e quatro cilindros originalmente a gasolina. Os autores demonstraram que há ganhos de eficiência na operação desse motor com hidrogênio puro. Posteriormente, o mesmo grupo demonstrou ganhos de

eficiência também para o uso do Hidrano em motores originalmente projetados para GNV (OZCAN, 2010).

A composição ideal do Hidrano para se obter os melhores índices de eficiência não está claramente definida. As pesquisas realizadas até o momento não parecem convergir, havendo estudos que indicam melhores consumos específicos de combustível com misturas de Hidrano 20 ou com menores conteúdos de hidrogênio (DIMOPOULOS *et al.*, 2008; ORTENZI *et al.*, 2008; SIERENS; ROSSEEL, 2000), e outros trabalhos com indicação de Hidrano 20 a Hidrano 35 (AKANSU *et al.*, 2004; HUANG, Z. H.; LIU, B. *et al.*, 2006, 2007; MA, F. H.; WANG, Y. F. *et al.*, 2009; SHRESTHA; KARIM, 1999).

Algumas avaliações foram realizadas em situações similares às de motores de veículos convertidos a GNV no Brasil. As avaliações de Thurnheer *et al.*(2009) empregaram um motor bicomcombustível (gasolina/GNV) de quatro cilindros, 2,0 L e taxa de compressão de 13,5:1. O resultado com a utilização de Hidrano 15 indicou uma eficiência 2% superior às eficiências de operação com gasolina e com GNV.

Os trabalhos conduzidos pela FIAT na Itália (MARIANI *et al.*, 2009; UNICH *et al.*, 2009) com veículos movidos a GNV originais de fábrica não apresentaram ganhos de eficiência quando utilizaram Hidrano 12. Houve uma redução de autonomia da ordem de 8%, incremento das emissões de NO_x em 70%, redução das emissões de CO e CO₂ em 19% e 3% respectivamente, enquanto as emissões de THC permaneceram constantes. Possivelmente os resultados poderiam ter sido melhores com o ajuste do motor para operação com Hidrano, uma vez que motores originalmente concebidos para GNV apresentam grande retardo na ignição, que não foi modificada neste experimento.

Cabe notar que embora diversos estudos indiquem que a eficiência do uso de Hidrano em motores de ciclo Otto seja superior a do uso de gás natural, em geral a adição de hidrogênio ao GNV reduz a autonomia dos veículos, uma vez que o conteúdo energético do hidrogênio por unidade de volume é inferior ao do gás natural (KARNER; FRANCFORT, 2003; UNICH *et al.*, 2009). Os ganhos de eficiência indicados pelos outros trabalhos avaliados, em sua maioria, levam

em conta apenas os testes de motor em bancada e não consideram questões primordiais como o conteúdo energético no tanque GNV ou Hidrano, o peso desse tanque e sua influência no consumo específico de combustível do veículo em ordem de marcha.

Em relação à potência desenvolvida por motores utilizando GNV e Hidrano, também há controvérsias nos trabalhos analisados. Há autores que relatam aumento de potência com a utilização de Hidrano em comparação ao GNV (AKANSU *et al.*, 2004; BELL; GUPTA, 1997; BYSVEEN, 2007; KARIM *et al.*, 1996; MOHAMMED; BAHAROM; AZIZ, 2011; MOHAMMED; BAHAROM; AZIZ; *et al.*, 2011; SHRESTHA; KARIM, 1999; WANG, J. H.; HUANG, Z. H. *et al.*, 2008a), enquanto que outros pesquisadores relatam queda na potência com a adição de hidrogênio ao GNV (MA, F. H.; WANG, M. Y.; JIANG, L.; DENG, J. A. *et al.*, 2010; ORTENZI *et al.*, 2008). Porém, a curva de potência de um motor depende de inúmeras variáveis, como velocidade de rotação, qualidade da mistura ar/combustível, taxa de compressão, instante da ignição, entre outros. Dessa forma, as condições de operação são mais influentes na potência do que as características do combustível empregado.

Alguns dos artigos avaliados indicam que a potência do motor utilizando Hidrano é incrementada em condições de cargas pequenas (SIERENS; ROSSEEL, 2000), altas velocidades de rotação e combustão pobre com as misturas de ar/combustível mais pobres possíveis sem que ocorram variações cíclicas do motor (BELL; GUPTA, 1997; BYSVEEN, 2007; KARIM *et al.*, 1996; WANG, J. H.; HUANG, Z. H. *et al.*, 2008a).

Os trabalhos de Huang *et al.* (2006, 2007) demonstram que para uma mesma razão ar/combustível, misturas de Hidrano 20 ou inferiores levam a uma perda de potência no motor e misturas de Hidrano 20 ou superiores levam a um ganho de potência. A avaliação de Akansu *et al.* (2004) corrobora os resultados anteriores e recomenda o emprego de misturas entre Hidrano 20 e Hidrano 30. A pesquisa de Shrestha e Karim (1999) sugere misturas gasosas de Hidrano 20 a Hidrano 25, enquanto que Bell e Gupta (1997) encontraram melhores resultados com Hidrano 10 e Hidrano 15 para incremento da potência de motores de ciclo Otto.

Com respeito às emissões de poluentes (NO_x, THC e CO) e de dióxido de carbono (CO₂), toda a literatura revisada aponta para redução de emissões em maior ou menor grau de ao menos dois dos poluentes de interesse quando há substituição de GNV por Hidrano.

A redução das emissões de CO₂ é evidente, uma vez que a adição de hidrogênio ao GNV diminui o conteúdo de carbono no combustível, o que consequentemente produz menos CO₂. Entretanto, Genovese *et al.* (2011) constataram que as emissões de CO₂ são ainda menores com o uso de Hidrano, isto é, a adição de hidrogênio ao GNV tem um efeito potencializador sobre a redução das emissões de CO₂ que não são unicamente atribuídas ao deslocamento de um combustível carbonado pelo hidrogênio. Genovese *et al.* (2011) atribuem esse efeito potencializador ao incremento de eficiência do Hidrano em relação ao GNV. Quando se considera a origem do hidrogênio, fóssil ou renovável, Ortenzi *et al.* (2008) indicam que há redução das emissões de CO₂ mesmo quando o hidrogênio contido no Hidrano tem origem fóssil, isto é, considerando inclusive as emissões de CO₂ oriundas da produção de hidrogênio. Por outro lado, a análise de ciclo de vida de CO₂ comparando veículos a GNV e a Hidrano apresentada por Martinez *et al.* (2010) conclui que apenas quando o hidrogênio adicionado ao Hidrano é gerado por fonte eólica ou nuclear com distribuição por gasodutos ocorre redução de emissões em relação ao GNV.

A grande maioria dos estudos realizados até o momento verificou uma redução nas emissões de CO com o aumento do teor de hidrogênio no Hidrano, quando comparado ao GNV (AKANSU *et al.*, 2004, 2007; BAUER; FOREST, 2001a, 2001b; BYSVEEN, 2007; CEPER, B. A. *et al.*, 2009; HU; HUANG, Z. H.; LIU, B.; ZHENG; GU, 2009; HU; HUANG, Z. H.; LIU, B.; ZHENG; GU; *et al.*, 2009; HUANG, B. *et al.*, 2009; KAHRAMAN, N. *et al.*, 2009; KARIM *et al.*, 1996; MA, F. H.; DING; *et al.*, 2009; MA, F. H.; WANG, M. Y.; JIANG, L.; CHEN, R. Z. *et al.*, 2010; MA, F. H.; WANG, M. Y.; JIANG, L.; DENG, J. A. *et al.*, 2010; MA, F. H.; WANG, Y. F. *et al.*, 2009; MARIANI *et al.*, 2009; MOHAMMED; BAHAROM; AZIZ, 2011; MOHAMMED; BAHAROM; AZIZ; *et al.*, 2011; ORTENZI *et al.*, 2008; PARK, C. *et al.*, 2011; UNICH *et al.*, 2009; XU *et al.*, 2010). Nessas avaliações, as emissões de CO foram reduzidas entre 5% e 84%. Alguns trabalhos indicaram que as emissões de CO mantiveram-se estáveis com a adição de hidrogênio ao GNV (BELL; GUPTA, 1997; DIMOPOULOS *et al.*, 2007; HUANG,

Z. H.; WANG, J. H. *et al.*, 2006, 2007; LIU, B. *et al.*, 2008; MA, F. H.; WANG, J. J.; WANG, Y.; WANG, Y. F.; LI; *et al.*, 2008) ou ficaram abaixo do limite de detecção dos equipamentos de análise utilizados (GENOVESE *et al.*, 2011). Apenas em um relato da literatura houve incremento nas emissões de CO (MA, F. H.; LIU, H. Q. *et al.*, 2008) cuja causa foi atribuída ao não ajuste do tempo de ignição do motor.

Já as emissões de THC e NO_x , cujas reduções são o principal objetivo da adição de hidrogênio ao GNV, apresentam tendência muito clara de serem inversamente proporcionais. Dessa forma, ao se ajustar as condições de um motor de ciclo Otto para combustão pobre, as emissões de NO_x são reduzidas, mas as de THC são incrementadas, independentemente do combustível utilizado, conforme ilustra a Figura 2.14 (BOSCH, 2005).

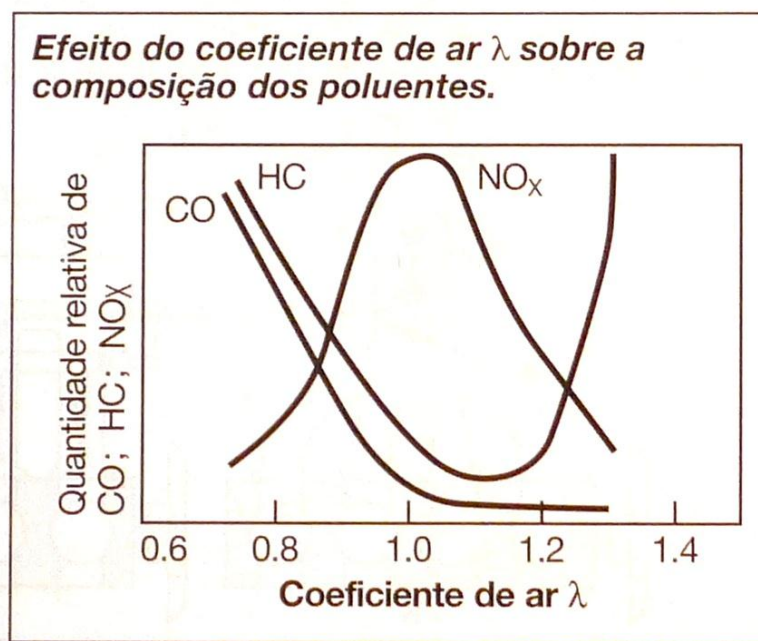


Figura 2.14- Efeitos da razão ar/combustível sobre as emissões de um motor de ciclo Otto

De fato, a oxidação completa raramente acontece num motor a combustão de ciclo Otto, mesmo nas condições ideais em que há uma mistura estequiométrica de ar/combustível. Nas condições de alta temperatura e alta pressão em que ocorre a combustão dentro dos cilindros do motor, o nitrogênio começa a reagir com o oxigênio formando NO_x . O oxigênio consumido na formação do NO_x acaba por não reagir com o combustível, havendo assim combustão incompleta

e geração de THC e CO. A combustão em condições de mistura ligeiramente pobre permite atingir os menores níveis de THC e CO, além de reduzir o consumo de combustível, mas acarreta em maiores emissões de NO_x. Misturas excessivamente pobres acarretam falhas de ignição na câmara de combustão, causando aumento das emissões de THC (BOSCH, 2005).

A literatura analisada confirma essas premissas. Entretanto, como os trabalhos tratam da comparação de combustíveis em condições específicas, principalmente analisando a combustão pobre, observa-se que em muitos casos as misturas de hidrogênio e GNV reduziram concomitantemente as emissões de THC e NO_x comparativamente aos motores utilizando GNV puro (AKANSU *et al.*, 2004; GENOVESE *et al.*, 2011; HOEKSTRA *et al.*, 1994, 1995; HUANG, Z. H.; WANG, J. H. *et al.*, 2006, 2007; MA, F. H.; WANG, J. J.; WANG, Y.; WANG, Y. F.; ZHONG; *et al.*, 2008; MA, F. H.; WANG, Y. F. *et al.*, 2009; ORTENZI *et al.*, 2008; PARK, C. *et al.*, 2011; RAMAN *et al.*, 1994).

Outras pesquisas verificaram que o aumento da temperatura de combustão causada pela adição de hidrogênio ao GNV contribuem para o aumento das emissões de NO_x em comparação ao GNV (AKANSU *et al.*, 2004, 2007; BAUER; FOREST, 2001b; BYSVEEN, 2007; HU; HUANG, Z. H.; LIU, B.; ZHENG; GU, 2009; HU; HUANG, Z. H.; LIU, B.; ZHENG; GU; *et al.*, 2009; HUANG, B. *et al.*, 2009; HUANG, Z. H.; LIU, B. *et al.*, 2006, 2007; JEONG *et al.*, 2009; KARIM *et al.*, 1996; LEE, S. W. *et al.*, 2011; LIU, B. *et al.*, 2008; MA, F. H. *et al.*, 2007; MA, F. H.; DING; *et al.*, 2009; MA, F. H.; LIU, H. Q. *et al.*, 2008; MA, F. H.; WANG, M. Y.; JIANG, L.; CHEN, R. Z. *et al.*, 2010; MARIANI *et al.*, 2009; MOHAMMED; BAHAROM; AZIZ, 2011; MOHAMMED; BAHAROM; AZIZ; *et al.*, 2011; NAGALINGAM *et al.*, 1983; PARK, J. *et al.*, 2011; SIERENS; ROSSEEL, 2000; UNICH *et al.*, 2009; WALLACE; CATELLAN, 1994; WANG, J. H. *et al.*, 2007; XU *et al.*, 2010).

Dimopoulos *et al.* (2008) verificaram que as emissões de NO_x podem ser reduzidas com a utilização de Hidrano em comparação ao GNV se a taxa de recirculação do gás de exaustão (EGR) for aumentada. Neste estudo, misturas contendo até 15% de hidrogênio no Hidrano apresentaram as menores emissões de NO_x. Ma *et al.* (2007) observaram que as emissões de THC

são reduzidas com o aumento do conteúdo de hidrogênio no Hidrano e que o ajuste do tempo de ignição do motor é suficiente para conter maiores emissões de NO_x .

Com relação ao emprego da infraestrutura de gás natural para o Hidrano, poucos dos trabalhos consideram a compatibilidade de materiais e o desempenho de componentes em função da maior concentração de hidrogênio no gás. Sabe-se que o emprego de hidrogênio a alta pressão em ligas de aço carbono não é recomendada por ocorrer fadiga de material (*hydrogen embrittlement*), mas ao mesmo tempo os cilindros para GNV, fabricados em ligas de aço, cromo e molibdênio, permitem o uso de grandes porcentagens de hidrogênio (PETROBRAS, 2007). Entretanto, faz-se necessário verificar outros componentes, como os compressores de GNV, tubulações empregadas em veículos e em postos de abastecimento, entre outros. Estes aspectos não são avaliados nesta tese, porém são recomendados para trabalhos futuros.

Por fim, observa-se uma gama extensa de trabalhos na literatura, com uma vasta abordagem de parâmetros e condições distintas de operação de motores. A literatura reflete um grande potencial para a adição de hidrogênio ao GNV permitindo em muitos casos a melhoria dos parâmetros de operação de motores a combustão interna de ciclo Otto.

3 METODOLOGIA E DESENVOLVIMENTO

A metodologia e o desenvolvimento dessa tese são fundamentados na revisão da literatura referente a veículos com motor a combustão interna de ciclo Otto movidos a GNV e Hidrano, e referentes à infraestrutura de abastecimento de GNV no Brasil. Neste trabalho preferiu-se utilizar um método para se determinar a infraestrutura para o Hidrano a partir da abordagem de um posto de GNV de porte médio (abordagem micro), avaliando sistemas energéticos e sua infraestrutura, para enfim comparar os dados e resultados obtidos com as médias nacionais de vendas de GNV fornecidas pelo Balanço Energético Nacional (BEN) e com número de postos de GNV (abordagem macro).

Dessa forma, solicitou-se à empresa Ipiranga o fornecimento de dados coletados em um de seus postos de GNV de médio porte com o perfil de abastecimento horário ao longo de um mês. De posse dessas informações, são propostos uma nova configuração do posto de GNV para que seja realizada a produção local de hidrogênio por meio da eletrólise da água e um método para se dimensionar os equipamentos para esse fim, de acordo com o perfil de abastecimento de GNV e o volume de hidrogênio adicionado ao gás. A partir do método de dimensionamento dos equipamentos, são apresentados os resultados e a discussão no capítulo seguinte, sendo determinados os outros parâmetros para alguns cenários estabelecidos com a finalidade de avaliar a viabilidade econômica da introdução do Hidrano como combustível veicular e seus possíveis impactos, a saber: custo de investimento, custo do hidrogênio, preço final do Hidrano e preço comparativo aos outros combustíveis (gasolina C, etanol hidratado e GNV) para misturas de GNV contendo frações molares de 10%, 20% e 30% mol/mol de hidrogênio (Hidrano 10, 20 ou 30).

Por fim, os resultados e a discussão apresentam estimativas dos impactos ambientais, isto é, as emissões de poluentes e de dióxido de carbono, dos impactos às redes das concessionárias de energia elétrica e de gás natural e dos impactos à matriz energética nacional, caso o Hidrano fosse adotado por todos os postos de abastecimento.

3.1 Perfil de Vendas de GNV de um Posto de Porte Médio

Primordialmente, para se investigar todos os parâmetros para a adição de hidrogênio ao GNV, é necessário conhecer e avaliar o perfil de vendas de GNV de um posto de abastecimento de médio porte. A empresa Ipiranga forneceu os dados de vendas horárias de GNV ao longo do mês de abril de 2011 (OLIVEIRA, U. A. F., 2011).

A partir do perfil de vendas de GNV é possível estimar valores máximos e médios de demanda desse combustível e determinar a quantidade de hidrogênio a se produzir para compor as diversas misturas de Hidrano. Com esses dados também é possível sugerir uma nova configuração para o posto de abastecimento.

3.2 Configuração Básica de um Posto de Abastecimento de Hidrano

Nesta tese, a proposta é produzir o hidrogênio a ser adicionado ao GNV no próprio posto de combustíveis a partir de insumos disponíveis localmente e de uma tecnologia comercial bem estabelecida, operando autonomamente. Assim, os postos necessitam de uma nova configuração para disponibilizar o Hidrano entre seus combustíveis. Optou-se pelo emprego de eletrolisadores alcalinos de água com pressão de saída de hidrogênio a 3 MPa (30 bar).

Os sistemas de eletrólise alcalina da água operam através da dissociação da molécula de água em hidrogênio e oxigênio. Os insumos necessários para a operação do eletrolisador são energia elétrica e água, amplamente disponíveis em todos os postos de abastecimento. A opção por utilizar sistemas de eletrólise a 3 MPa (30 bar) provém do fato de que estes são os equipamentos comerciais com maior pressão disponível, dispensando o uso de compressores. Assim, quanto maior a pressão final, menor será o volume hidráulico do sistema de

armazenamento de hidrogênio. Apesar dos eletrolisadores a 3 MPa (30 bar) apresentarem preços entre 20% e 25% superiores aos sistemas que operam a pressão atmosférica ou até 1 MPa (10 bar) (DRAGONI, 2012a), o custo adicional de compressores são superiores à diferença de preços entre os eletrolisadores de 1 e 3 MPa (10 e 30 bar).

A partir do diagrama esquemático básico de um posto de abastecimento de GNV, propõe-se a introdução do sistema de geração eletrolítica de hidrogênio conforme ilustra a Figura 3.1. Os principais itens integrados ao posto são o eletrolisador, vasos de pressão para armazenamento de hidrogênio e o sistema de mistura de gases para compor as misturas de Hidrano. Também são necessários sistemas auxiliares como painéis elétricos e de controle, sistemas de medição de pressão, temperatura e vazão, deionizador de água de processo quando estes não estiverem integrados ao eletrolisador, tubulações e válvulas diversas, sistemas de proteção e segurança, e instalações civis diversas. A adaptação do posto de GNV para fornecer Hidrano é simples e reversível caso se deseje, um dia, desinstalar o sistema de produção de hidrogênio.

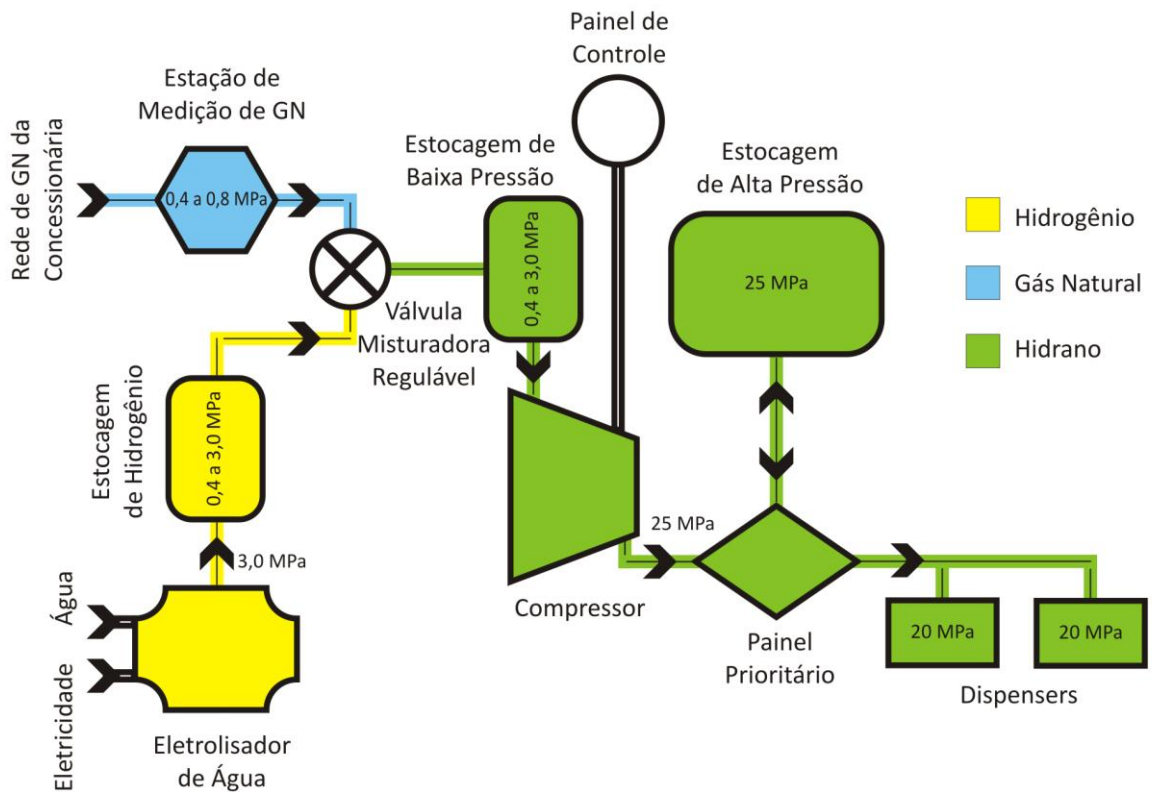


Figura 3.1- Diagrama esquemático de um posto de abastecimento de Hidrano

O processo consiste em gerar o hidrogênio a 3 MPa (30 bar) atendendo a necessidade de produção média diária baseada no consumo de GNV diário e armazená-lo num feixe de cilindros capaz de atender picos de demanda ao longo do dia. O sistema de mistura de gases é programável e pode compor misturas diversas de Hidrano. Nele são admitidos o gás natural da rede da concessionária e o hidrogênio produzido localmente. A partir desse ponto o sistema não apresenta modificações em relação àquele já existente no posto de GNV.

Embora os eletrolisadores também produzam oxigênio nesse processo, o aproveitamento econômico desse gás não é viável neste caso, uma vez que seria necessário adicionar uma infraestrutura para purificação, compressão e armazenagem de oxigênio. O custo dessa infraestrutura e de sua operação seria demasiadamente alto.

3.3 Método para Dimensionamento dos Equipamentos para Produção de Hidrogênio para um Posto de Abastecimento de Hidrano

Dado o perfil mensal de vendas de GNV, define-se a quantidade de hidrogênio a ser produzida no posto, considerando-se o percentual desse gás a ser adicionado ao GNV, isto é, o tipo de Hidrano a se produzir. Nesta tese optou-se por Hidrano 10, Hidrano 20 e Hidrano 30, para os quais não são necessárias modificações na motorização dos veículos a GNV existentes na frota nacional. Uma vez calculada a produção média mensal de hidrogênio, dimensiona-se os eletrolisadores comercialmente disponíveis capazes de atender essa demanda hora a hora com o critério de se maximizar o fator de utilização e otimizar a eficiência desses equipamentos.

Sabe-se que o fator de utilização do eletrolisador é um parâmetro a ser otimizado, pois a ociosidade desse equipamento tem grande impacto no fluxo de caixa do investimento e no custo de produção de hidrogênio, isto é, fatores de utilização baixos elevam os custos do hidrogênio (FURLAN, 2012; PINTO *et al.*, 2009). Nesta tese buscou-se determinar o fator de utilização real dos eletrolisadores, fundamentando os cálculos no perfil de demanda horária de Hidrano.

Após determinar a capacidade de produção do eletrolisador, o modelo considera o perfil de demanda horária por combustível. Uma vez que a demanda horária por hidrogênio para compor o Hidrano é superior à capacidade de produção do eletrolisador nos horários de maior quantidade de abastecimentos, é necessário dimensionar um sistema de vasos de pressão (*buffer*) para armazenamento de hidrogênio de forma que os picos de demanda possam ser atendidos. Em suma, o eletrolisador opera para atender a demanda média ao longo do dia de forma a otimizar seu fator de utilização, enquanto que o *buffer* opera para atender picos de demanda e armazenar o hidrogênio produzido pelo eletrolisador durante os horários de demanda inferior à produção. O fluxograma abaixo ilustra o modo de operação do sistema e o modelo adotado (Figura 3.2).

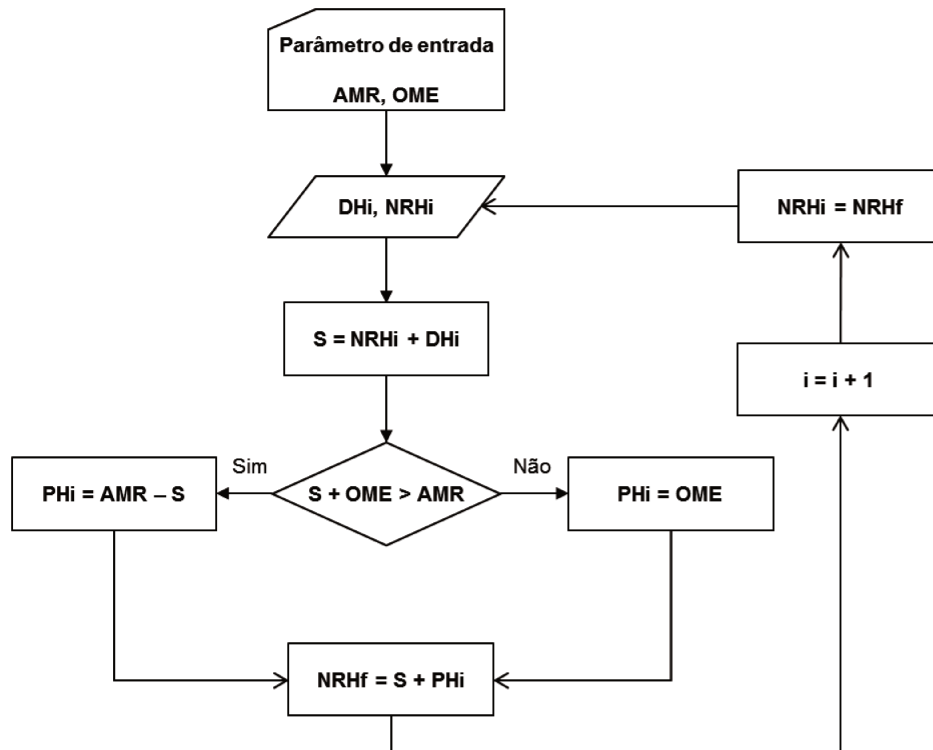


Figura 3.2- Fluxograma de produção de hidrogênio para um posto de revenda de Hidrano

As variáveis utilizadas na Figura 3.2 são:

- Armazenamento Máximo do Reservatório: **AMR** (m³);
- Oferta Máxima do Eletrolisador (equivalente à capacidade de produção): **OME** (m³/h);
- Hora do Dia: **i** (hh:mm)

- Saldo: **S** (m³);
- Demanda de Hidrogênio ao Longo da Hora i: **DHi** (m³)
- Produção de Hidrogênio ao Longo da Hora i: **PHi** (m³);
- Nível do Reservatório ao Início da Hora i: **NRHi** (m³);
- Nível do Reservatório ao Final da Hora i: **NRHf** (m³).

A rotina expressa nesse fluxograma foi então introduzida em uma planilha de cálculos do *Microsoft Excel*⁹ para se determinar a capacidade máxima ideal do *buffer* de armazenamento de hidrogênio (variável AMR), com a condição do saldo (variável S) nunca ser negativo, o que significaria ausência de hidrogênio para compor o Hidrano. Uma vez determinado o *buffer* de armazenamento ideal de acordo com a capacidade de produção de hidrogênio do eletrolisador e com a demanda diária desse gás para compor o Hidrano, é possível determinar o fator de utilização do sistema.

De posse desses dados, é possível definir o custo de capital e de operação de um posto de abastecimento de Hidrano e, finalmente, realizar uma análise de investimento para se determinar o custo do novo combustível.

3.4 Determinação do Preço do Hidrano

Há diversos métodos para se avaliar investimentos e determinar custos de sistemas energéticos. Nesta tese optou-se por utilizar o Método do Valor Presente Líquido (VPL). O método consiste basicamente em:

- 1) Definir o custo de capital do projeto (equipamentos e infraestrutura);
- 2) Definir os custos de operação e manutenção do projeto ao longo de sua vida, neste caso, a quantidade anual de energia elétrica e de outros insumos utilizados, bem como de seus custos e os custos de manutenção;

⁹ *Microsoft Excel*[®] é uma marca registrada da empresa *Microsoft*.

- 3) Definir uma taxa de desconto capaz de atender às expectativas de retorno de investimento, isto é, a atratividade do projeto para o investidor;
- 4) Projetar o fluxo de caixa ao longo do tempo de vida do sistema de eletrólise, principal equipamento do posto de abastecimento de Hidrano;
- 5) Calcular o VPL de forma que receitas e despesas retornem saldo zero ($VPL = 0$) para se determinar o custo mínimo do hidrogênio e, posteriormente, o preço final do Hidrano.

Para se determinar o preço de revenda do Hidrano, adotou-se aqui o critério de que as margens de lucro na revenda do GNV são mantidas inalteradas e as margens de lucro para o hidrogênio que compõe o Hidrano são dadas pela taxa de desconto do investimento. Assim, o preço de revenda do Hidrano XX, onde XX é o percentual de hidrogênio no combustível, é dado por:

$$PR_{Hidrano\ XX} = (100\% - XX\%) \times PR_{GNV} + XX\% \times C_H \quad \text{Equação I}$$

onde:

XX : Percentual de hidrogênio no Hidrano (em volume);

$PR_{Hidrano\ XX}$: Preço de revenda do Hidrano XX;

PR_{GNV} : Preço de revenda do GNV;

C_H : Custo do hidrogênio produzido no posto de abastecimento.

Uma vez determinado o preço mínimo do Hidrano, podem ser avaliadas as diversas taxas internas de retorno (TIR) e tempos de *payback* para os casos em que o valor do hidrogênio que compõe o preço do Hidrano seja variado de forma a trazer maior atratividade à revenda de combustíveis. Essa análise permite dar informações ao proprietário do posto de combustíveis para decidir sobre a introdução do Hidrano e sua viabilidade econômica.

Adicionalmente ao preço de revenda, o consumo específico dos veículos com Hidrano possibilita realizar comparações com outros combustíveis, de forma a informar o consumidor sobre a competitividade das misturas de GNV e hidrogênio.

Neste trabalho optou-se por aplicar essas ferramentas de análise de investimento e comparar custos nos Estados do Rio de Janeiro e de São Paulo, pois estes possuem as maiores frotas de veículos a GNV e a maior quantidade de postos de abastecimentos de GNV.

3.5 Outros Impactos do Hidrano

A partir dos dados e condições de operação dos postos de Hidrano e da frota de veículos a GNV movida pelo novo combustível, foram estabelecidas hipóteses a fim de se estimar quantitativa e qualitativamente os impactos ambientais dessa proposta. Dessa forma, as emissões de poluentes e de dióxido de carbono puderam ser calculadas de forma aproximada.

O incremento no consumo de energia elétrica e a redução do consumo de gás natural das concessionárias também puderam ser estimados de forma simples. Consequentemente, as alterações na matriz energética nacional foram avaliadas para o caso limite no qual o Hidrano passa a ser oferecido por todos os postos de abastecimento de GNV. Trabalhos futuros sobre a legislação referente aos combustíveis automotivos também foram sugeridos na discussão dos resultados.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos a partir da metodologia proposta e são realizadas discussões a respeito deles.

4.1 Perfil de Vendas de Combustível e Dimensionamento de um Posto de Hidrante

Primordialmente, para se investigar a viabilidade de se adicionar hidrogênio ao GNV foi necessário conhecer e avaliar o perfil de vendas de GNV de um posto de abastecimento de médio porte. A empresa Ipiranga forneceu os dados de vendas horárias de GNV ao longo do mês de abril de 2011 (OLIVEIRA, U. A. F., 2011). Um posto de GNV de porte médio apresenta as características da Tabela 4.1. Os perfis de vendas horárias desse posto são apresentados na Figura 4.1 e na Figura 4.2. Segundo a Ipiranga, os postos de porte médio apresentam vendas mensais de GNV da ordem de 86.000 m³.

Tabela 4.1- Características típicas de um posto de GNV de médio porte

Venda mensal de GNV – abril/2011 (m ³)	89.179
Número de cilindros para estocagem de GNV	9
Volume físico do cesto de cilindros (L)	1.125
Estocagem máxima de GNV (m ³)	280
Vazão máxima de abastecimento (m ³ /h)	650
Número de bicos de abastecimento	4
Pressão de abastecimento (MPa)	20

Fonte: Oliveira (2011).

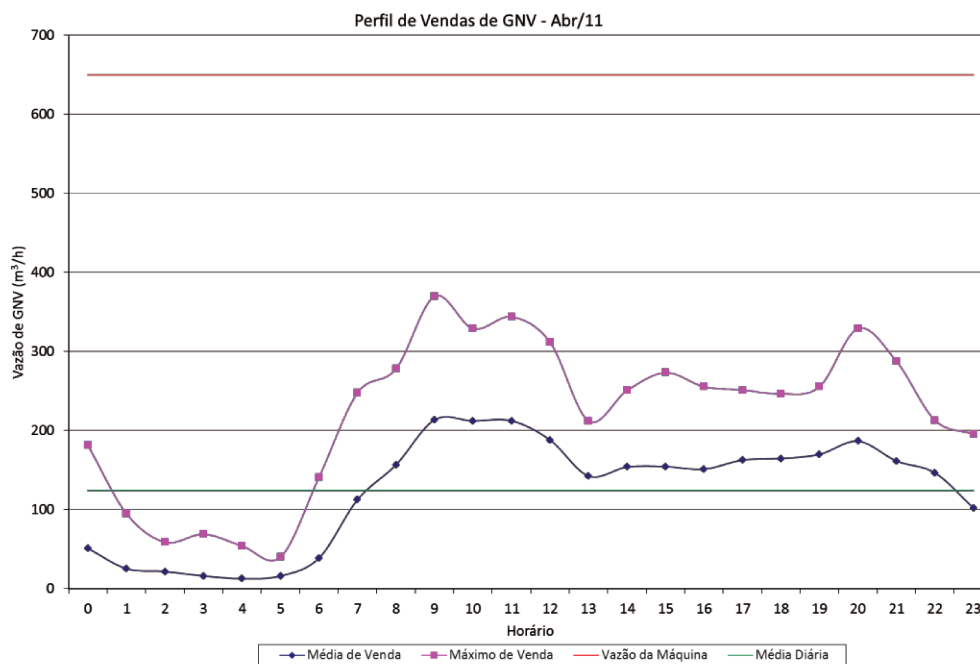


Figura 4.1- Perfil mensal de vendas horárias de GNV de um posto de porte médio (abr/2011)

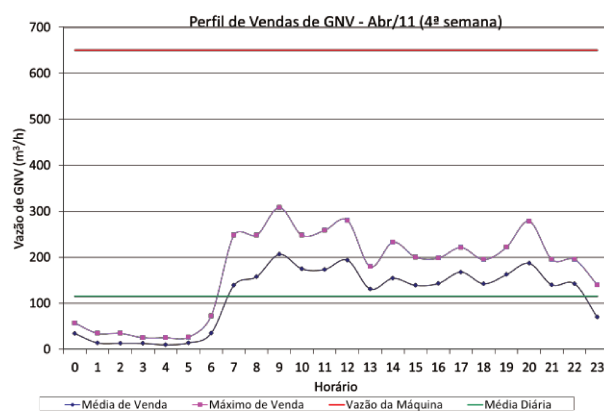
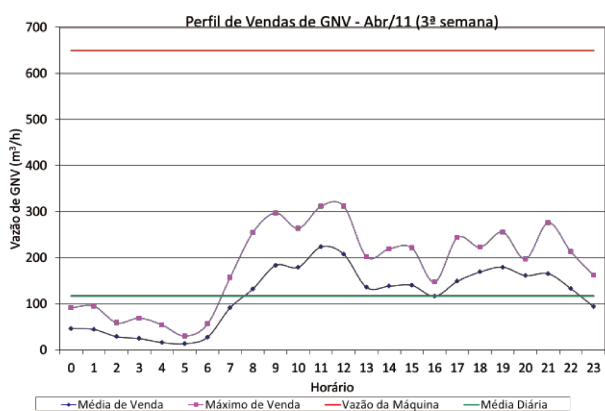
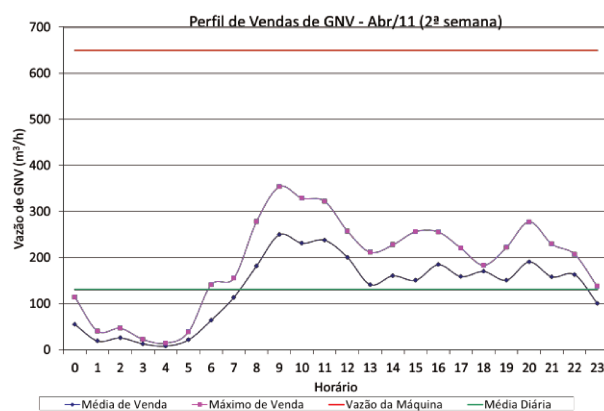
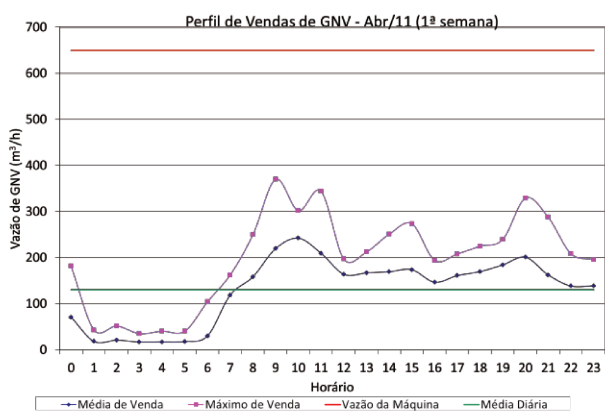


Figura 4.2- Perfil semanal de vendas horárias de GNV de um posto de porte médio (abr/2011)

Os perfis apresentam a média e o máximo de vendas de GNV a cada hora do dia (linhas azul e magenta) para abril de 2011, bem como a vazão máxima do sistema de abastecimento, que neste caso é de 650 m³/h (linha vermelha). A partir dos perfis, determinou-se a média de vendas de GNV para o mês e para cada uma de suas quatro semanas (linha verde). As médias calculadas são apresentadas na Tabela 4.2 (abordagem micro). Na mesma tabela também é apresentada a média nacional de vendas horárias, calculada a partir do consumo de GNV indicado pelo BEN (EPE, 2012) no ano de 2011 e o número de postos de GNV do país indicado pela GasNet (2011a), considerando-se um ano com 8.760 horas (abordagem macro). Os valores apresentados para esse posto são bastante próximos à média nacional e, portanto, podem ser considerados bastante ajustados à realidade do país. Dessa forma, adotou-se neste trabalho a média de vendas de GNV de 124 m³/h.

Tabela 4.2- Médias de venda horária de GNV para um posto de médio porte

	Mensal	Semana 1	Semana 2	Semana 3	Semana 4	BEN 2011
Vendas de GNV (m ³ /h)	124	130	131	117	115	127

A partir da média de vendas de GNV, 124 m³/h, determinou-se a quantidade média de hidrogênio a ser produzida no posto, levando em consideração o percentual de hidrogênio a ser adicionado ao GNV, isto é, o tipo de Hidrano a se compor.

O sistema necessário para a mistura de GNV e hidrogênio no posto de abastecimento é ilustrado na Figura 4.3 (DRAGONI, 2012b). Após ser produzido no eletrolisador, o hidrogênio é purificado para a remoção de eletrólito e água, e segue um medidor e regulador de fluxo comandado por um Controlador Lógico Programável (PLC). O PLC também verifica e regula a vazão de GNV para formar a mistura de Hidrano na composição correta para conteúdos de até 35% mol/mol de hidrogênio. Ambos os gases são finalmente combinados num misturador estático que segue para a linha de abastecimento do posto. Dessa forma, o sistema permite fornecer GNV puro ou Hidrano.

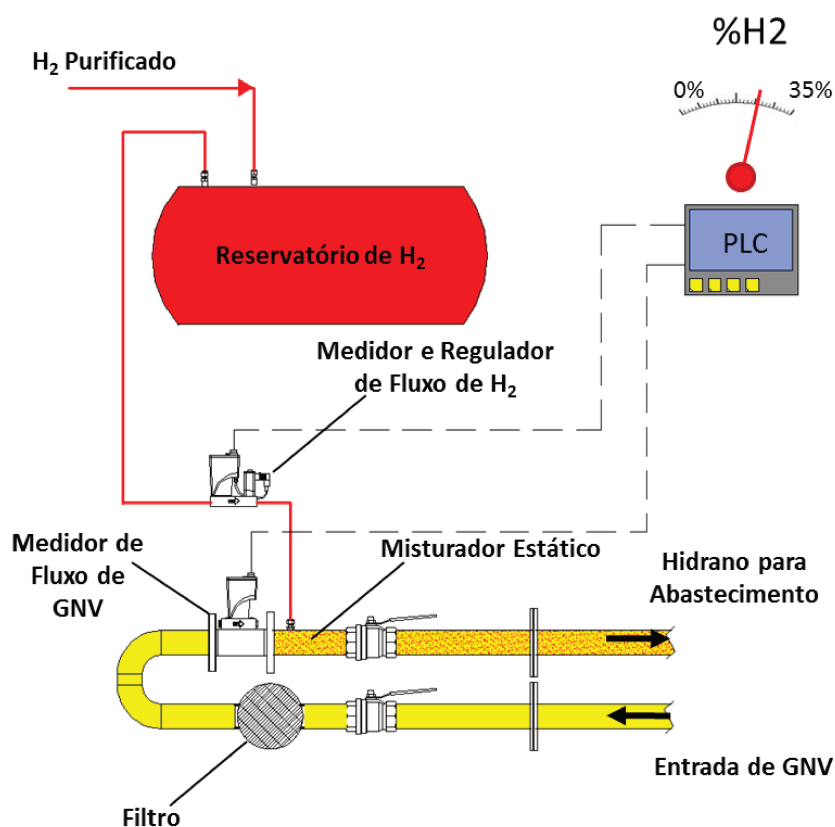


Figura 4.3- Sistema de mistura de GNV e hidrogênio para composição do Hidrão

Para as composições de Hidrão 10, 20 e 30, a produção média de hidrogênio segue os dados apresentados na Tabela 4.3, determinados pela média da demanda horária de GNV. Nessa tabela também são apresentadas as capacidades de produção de hidrogênio dos eletrolisadores comercialmente disponíveis apropriados para atender a demanda de forma a se maximizar o fator de utilização e operar esses equipamentos em seus pontos de melhor eficiência, isto é, operando os eletrolisadores em suas capacidades nominais de produção de hidrogênio.

Tabela 4.3- Hidrogênio necessário para compor o Hidrão em um posto de médio porte

	Hidrão 10	Hidrão 20	Hidrão 30
Demanda média de hidrogênio (m ³ /h)	12,4	24,8	37,2
Capacidade nominal dos eletrolisadores (m ³ /h)	15	30	50
Fator de utilização máximo do eletrolisador	82,7%	82,7%	74,4%

O fator de utilização dos eletrolisadores deve ser otimizado para se atingir os menores custos de produção de hidrogênio. A Tabela 4.3 apresenta o fator de utilização máximo possível para o caso em estudo. O fator de utilização máximo possível foi determinado através da razão entre as demandas médias e as capacidades nominais de produção de hidrogênio de cada equipamento. Entretanto, o fator de utilização real do equipamento depende do perfil de vendas horárias de combustível. Devido às variações de demanda horária por combustível, os eletrolisadores não operam ininterruptamente e assim não atingem o fator de utilização máximo.

Aplicando-se o método de cálculo apresentado na Figura 3.2 através da planilha de cálculos do *Microsoft Excel*[®] (ver Apêndice A contendo a planilha para o Hidrano 10), determina-se a quantidade mínima de hidrogênio a se armazenar para atender o perfil de demanda e o fator de utilização real do eletrolisador. Os resultados são apresentados na Tabela 4.4. A partir da quantidade de hidrogênio a se armazenar, dimensiona-se o volume do reservatório. Também percebe-se que o fator de utilização real é cerca de 1% inferior ao fator máximo possível.

Tabela 4.4- Configuração de um posto de abastecimento de Hidrano de médio porte

	Hidrano 10	Hidrano 20	Hidrano 30
Capacidade nominal do eletrolisador (m ³ /h)	15	30	50
Quantidade mínima de hidrogênio a se armazenar (m ³)	107	213	254
Fator de utilização real do eletrolisador	82,0%	82,0%	74,0%

O dimensionamento do reservatório de hidrogênio depende da quantidade mínima a se armazenar, mas também depende dos volumes hidráulicos dos vasos de pressão disponíveis no mercado. Para se evitar momentos em que ocorra escassez de hidrogênio para compor o Hidrano no posto de abastecimento, o armazenamento de hidrogênio deve ser realizado com alguma margem de segurança, isto é, acima da quantidade mínima necessária para atender a demanda. Os vasos de pressão e cilindros avaliados são descritos na Tabela 4.5 e dimensionados na Tabela 4.6. Optou-se pelos vasos de pressão da empresa Comaf por apresentarem o menor preço do mercado.

Tabela 4.5- Especificações de sistemas para armazenamento de hidrogênio

	Vaso unitário	Vaso unitário	Feixe de cilindros	Feixe de cilindros	Feixe de cilindros
Fabricante	Comaf	Engetank	Cilbras		
Volume físico (L)	2.500	1.200	1.125	1.600	2.000
Pressão de trabalho (MPa)	3	3	25	25	25
Volume de H ₂ a 3 MPa (m ³)	75	36	34	48	60

Fonte: Comunicações pessoais (DUFOUR, 2012; OLIVEIRA, E., 2012; SILVEIRA, 2012).

Tabela 4.6- Sistemas de armazenamento de hidrogênio para cada composição de Hidrano

	Hidrano 10	Hidrano 20	Hidrano 30
Quantidade mínima de hidrogênio a se armazenar (m ³)	107	213	254
Volume hidráulico unitário do vaso selecionado (L)	2.500	2.500	2.500
Número de vasos	2	4	4
Quantidade de hidrogênio efetivamente armazenada (m ³)	130	260	260

Ao mesmo tempo em que se determina a quantidade de hidrogênio a se armazenar, é possível observar, de acordo com o modelo proposto, como operam o eletrolisador e o reservatório, o primeiro visando atender a demanda média diária de abastecimento e o segundo visando atender os picos de demanda horária e absorver a produção extra de hidrogênio em momentos de baixa demanda de abastecimento. O modo de operação do sistema e a relação entre a demanda horária (linha vermelha), a produção (linha azul) e o estoque armazenado de hidrogênio (linha verde) para o Hidrano 10 são exemplificados na Figura 4.4 para o período de uma semana e na Figura 4.5 para um período de dois dias. Para os casos de Hidrano 20 e Hidrano 30 os perfis são semelhantes, uma vez que a demanda de combustível é a mesma, variando-se apenas o percentual de hidrogênio no Hidrano.

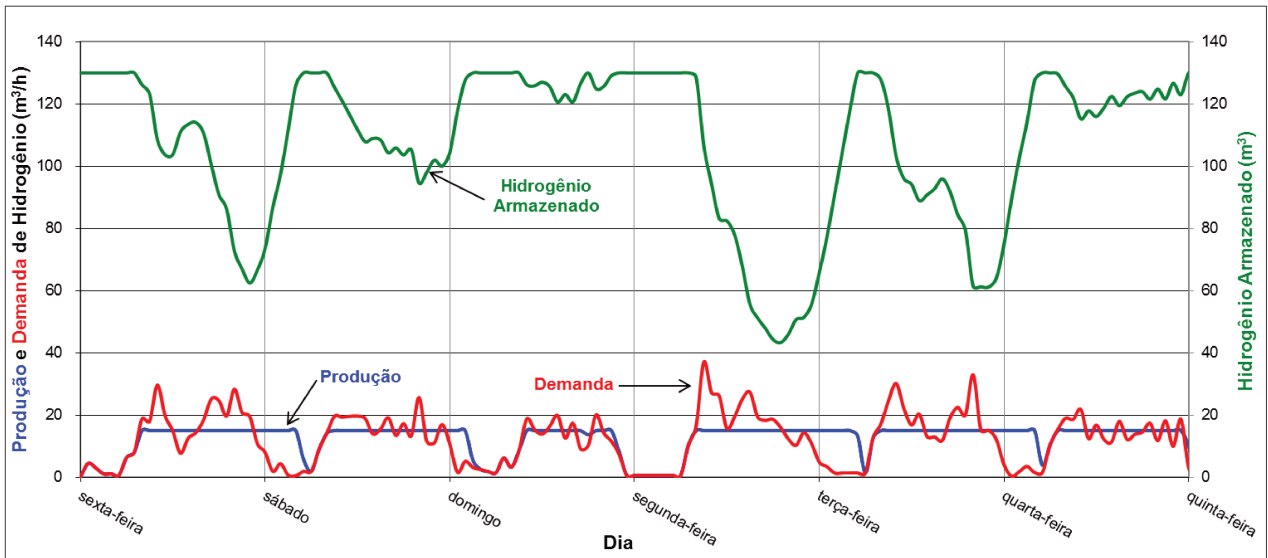


Figura 4.4- Demanda, produção e armazenamento de hidrogênio para um posto de Hidrano ao longo de uma semana

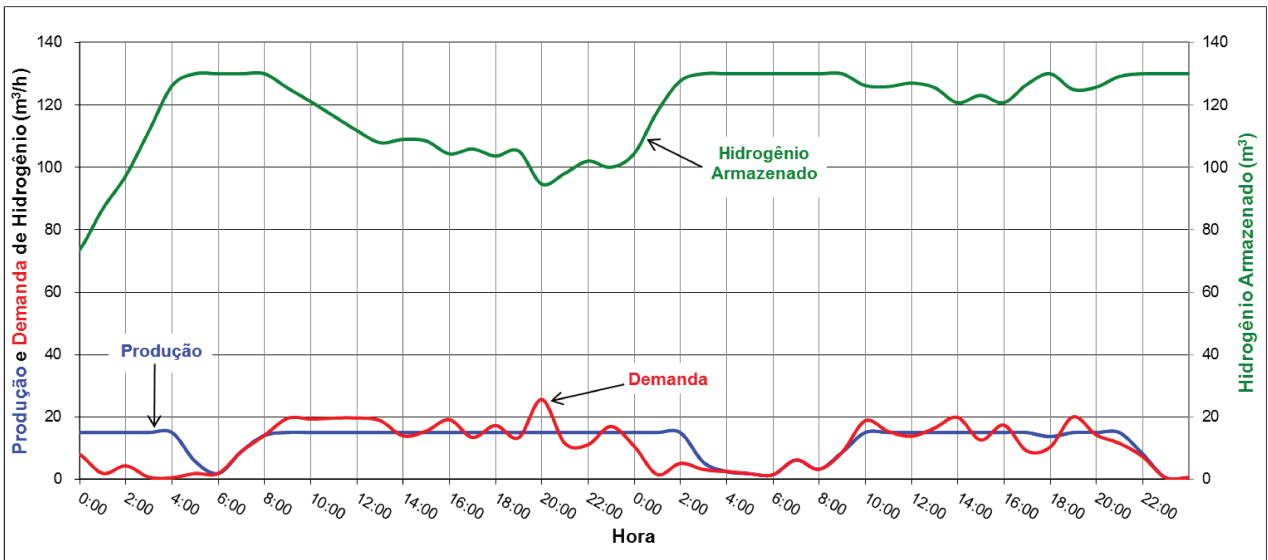


Figura 4.5- Demanda, produção e armazenamento de hidrogênio para um posto de Hidrano ao longo de dois dias

4.2 Custo e Preço do Hidrano

O custo e o preço do Hidrano dependem do preço do GNV praticado no mercado de combustíveis, do custo do hidrogênio a ser produzido no posto de abastecimento e das premissas adotadas para a aplicação do modelo de avaliação financeira do investimento (VPL). A determinação do custo e do preço do Hidrano nos Estados de São Paulo e Rio de Janeiro é apresentada a seguir.

4.2.1 Custos de Capital e O&M para a Produção de Hidrogênio no Posto de Abastecimento

Com os dados do dimensionamento do posto de Hidrano, é possível determinar os valores dos itens de capital e de consumo para a produção do hidrogênio localmente. Os itens de capital são compostos basicamente pelo eletrolisador, incluindo misturador de hidrogênio e GNV, pelo feixe de cilindros para armazenamento de hidrogênio e da infraestrutura adicional para o posto. Os valores adotados para operação e a manutenção (O&M) necessárias para o eletrolisador e para o armazenamento de hidrogênio são aqueles tradicionalmente empregados para sistemas desse tipo e equivalem a uma fração do capital dos sistemas, a saber, 2% ao ano para o eletrolisador e 0,5% a cada cinco anos para os vasos de alta pressão (FURLAN, 2012).

Nesta tese, para fins de comparação entre as diferentes quantidades de hidrogênio produzidas para o Hidrano 10, 20 e 30, optou-se por empregar eletrolisadores de um único fabricante (H2Nitidor) e que já incluem os dispositivos automáticos para mistura de hidrogênio e GNV na composição desejada. Os misturadores de hidrogênio e GNV são pré-programáveis e podem compor diversas misturas. As especificações fundamentais dos eletrolisadores, seus preços FOB e os valores de O&M são apresentados na Tabela 4.7 (DRAGONI, 2012a).

Tabela 4.7- Especificações e preços de eletrolisadores

Modelo do Eletrolisador	H15-10	H15-30	H30-10	H30-30	H50-10	H50-30
Produção nominal de H ₂ (m ³ /h)	15	15	30	30	50	50
Pressão de operação (MPa)	1	3	1	3	1	3
Potência (kW)	80	82	153	156	250	254
Consumo de água (L/h)	13,5	13,5	27,0	27,0	45,0	45,0
Pureza do hidrogênio (mol/mol)	99,8%					
Preço FOB (x 1.000 R\$)	384,48	480,60	648,81	768,96	768,96	913,14
O&M (x 1.000 R\$/ano)	7,69	9,61	12,98	15,38	15,38	18,26

Fonte: Dragoni (2012a).

Para fins de comparação, os eletrolisadores com pressão de trabalho de 3 MPa (30 bar) custam entre 20% e 25% a mais do que àqueles de 1 MPa (10 bar). A Figura 4.6 apresenta o preço dos eletrolisadores considerados neste trabalho em função da capacidade de produção e da pressão de trabalho.

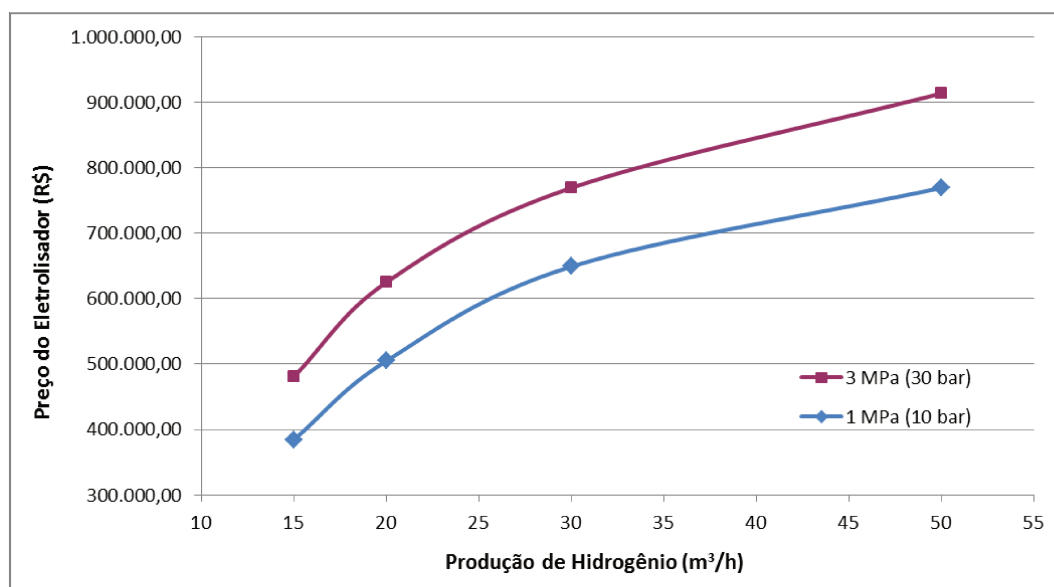


Figura 4.6- Preços de eletrolisadores pela capacidade de produção e pressão de trabalho

O armazenamento de hidrogênio foi dimensionado de acordo com a demanda do posto de abastecimento de Hidrano, apresentado na Tabela 4.6. A Tabela 4.8 apresenta uma comparação entre os preços do conjunto de vasos de pressão para 3 MPa (30 bar) das empresas Comaf e Engetank e dos feixes de cilindros para GNV da empresa Cilbras. Os vasos de pressão devem ser

associados em cascata para atender a necessidade de armazenamento de hidrogênio para cada composição de Hidrano. Por sua vez, os sistemas padronizados de estocagem de GNV são compostos por feixes de cilindros, contendo de 12 a 16 cilindros, com volume hidráulico total de até 2.000 L, e capazes de armazenar até 60 m³ de hidrogênio a 3 MPa (30 bar). A seleção de vasos de pressão priorizou os sistemas de menor custo para as diferentes necessidades de postos de Hidrano (Tabela 4.9).

Tabela 4.8- Preços de sistemas para armazenamento de hidrogênio

	Vaso unitário	Vaso unitário	Feixe de cilindros	Feixe de cilindros	Feixe de cilindros
Fabricante	Comaf	Engetank	Cilbras		
Volume físico (L)	2.500	1.200	1.125	1.600	2.000
Preço (R\$)	17.205,30	21.450,00	38.000,00	47.187,87	55.340,36

Fonte: Comunicações pessoais (DUFOUR, 2012; OLIVEIRA, E., 2012; SILVEIRA, 2012).

Tabela 4.9- Preços dos reservatórios de hidrogênio para cada composição de Hidrano

	Hidrano 10	Hidrano 20	Hidrano 30
Volume hidráulico unitário do vaso selecionado (L)	2.500	2.500	2.500
Número de vasos	2	4	4
Preço (R\$)	34.410,60	68.821,20	68.821,20
O&M (R\$/quinquênio)	172,05	344,11	344,11

O custo da infraestrutura adicional para os postos de Hidrano foi considerado fixo, independentemente do volume de hidrogênio a ser produzido, uma vez que esse item é composto de sistemas auxiliares como painéis de controle, sistemas de medição de pressão, temperatura e vazão, tubulações e válvulas diversas, sistemas de proteção e segurança, e obras civis. Neste trabalho adotou-se o valor de R\$ 50.000,00, informado pela Ipiranga para adaptação de um posto de médio porte para abastecimento com GNV (OLIVEIRA, U. A. F., 2012).

4.2.2 Custos de Insumos para a Produção de Hidrogênio no Posto de Abastecimento

Com relação aos insumos utilizados no processo de produção eletrolítica de hidrogênio, basicamente eletricidade e água, foram consideradas as tarifas de fornecimento das concessionárias que atendem duas cidades dos Estados de São Paulo e do Rio de Janeiro, a saber Campinas e Rio de Janeiro. As respectivas concessionárias de energia elétrica são CPFL e Light, e foram aplicadas as tarifas da modalidade B3 (comercial). As concessionárias de águas e esgotos são SANASA e CEDAE, e foram aplicadas as tarifas da modalidade comercial¹⁰. As tarifas empregadas, incluindo impostos, são apresentadas nas Tabela 4.10 e Tabela 4.11.

Tabela 4.10- Tarifas de energia elétrica com impostos

	CPFL (Campinas)	Light (Rio de Janeiro)
Tarifa B3 (R\$/kWh)	0,37647	0,47413

Fontes: Adaptado dos websites da CPFL e Light (CPFL, 2012; LIGHT, 2012).

Tabela 4.11- Tarifas de água e esgoto

	SANASA (Campinas)	CEDAE (Rio de Janeiro)
Tarifa comercial (R\$/m ³)	31,96	25,50

Fontes: Adaptado dos websites da CEDAE e SANASA (CEDAE, 2012; SANASA, 2012).

O custo total dos insumos depende diretamente da quantidade de hidrogênio produzido no processo. O valor anual das despesas com energia elétrica e água para cada Estado considerado e para cada composição de Hidrano é apresentado no tópico seguinte.

¹⁰ O custo com coleta de esgoto pode ser reduzido, havendo possibilidade legal para tal, uma vez que a água é consumida no processo de eletrólise.

4.2.3 Determinação do Custo do Hidrogênio no Posto de Abastecimento de Hidrano

De posse das informações dos custos de capital, O&M e dos insumos para a produção eletrolítica de hidrogênio, aplicou-se o método do Valor Presente Líquido (VPL) para se determinar o custo do hidrogênio para cada tipo de Hidrano e para cada um dos Estados considerados neste estudo.

O método do VPL demanda a imposição de alguns parâmetros, a saber, o tempo de vida útil do projeto ou sistema em avaliação e a taxa de desconto ou atratividade do investimento. Assumiu-se que o tempo de vida dos sistemas de eletrólise é de 20 anos, o que é um prazo razoável para esse tipo de equipamento (ELT ELEKTROLYSE TECHNIK, 2004; RUTH; RAMSDEN, 2012), embora a literatura apresente tempos de vida de 40 anos ou mais (IVY, 2004). Quanto aos vasos de pressão, há sistemas de armazenamento de hidrogênio que estão a mais de 50 anos em operação contínua (BECKER, 2009). A taxa de desconto foi assumida em 15% ao ano arbitrariamente, mas representa um retorno para o investimento superior àquele esperado para o mercado financeiro atual e semelhante ao esperado para postos de combustível (SEBRAE, 1999).

Assumiu-se um fator de disponibilidade do sistema de geração de hidrogênio de 98%, semelhante ao encontrado na literatura (IVY, 2004; RUTH; RAMSDEN, 2012). O fator de disponibilidade de 98% implica em paradas, planejadas para manutenção ou emergenciais, equivalentes a 175 horas ao longo de um ano. Com exceção de possíveis paradas emergenciais, as paradas para manutenção programada podem ser realizadas concomitantemente às paradas para manutenção do compressor de GNV do posto, haja vista que esse último equipamento demanda manutenção frequente (troca de óleo e filtros). A partir desse fator de disponibilidade e dos fatores de utilização reais apresentados na Tabela 4.4, determinou-se o consumo anual de energia elétrica e de água para a composição do Hidrano 10, 20 e 30 (Tabela 4.12). O consumo de água e de energia elétrica de cada sistema foi informado pelo fabricante dos eletrolisadores (DRAGONI, 2012a).

Tabela 4.12- Consumo anual de energia elétrica e água para a geração de hidrogênio de acordo com a composição do Hidrano

	Hidrano 10	Hidrano 20	Hidrano 30
Capacidade do eletrolisador (m ³ /h)	15	30	50
Potência elétrica (kW)	82	156	254
Consumo de água (L/h)	13,5	27,0	45,0
Fator de utilização real	82,0%	82,0%	74,0%
Fator de disponibilidade	98,0%	98,0%	98,0%
Consumo elétrico anual (kWh/ano)	577.242	1.098.168	1.613.599
Consumo anual de água (m ³ /ano)	95	190	286

Utilizando-se esses consumos anuais, determina-se o custo anual com energia elétrica e água para geração de hidrogênio nos Estados de São Paulo e Rio de Janeiro de acordo com a composição do Hidrano e com as tarifas das concessionárias locais. Os resultados são apresentados na Tabela 4.13.

Tabela 4.13- Custo anual com insumos para geração de hidrogênio nos Estados de São Paulo e Rio de Janeiro de acordo com a composição do Hidrano e tarifas locais

Hidrano	SP (CPFL e SANASA)			RJ (Light e CEDAE)		
	10	20	30	10	20	30
Consumo elétrico anual (kWh/ano)	577.242	1.098.168	1.613.599	577.242	1.098.168	1.613.599
Custo anual com energia elétrica (R\$/ano)	217.314,28	413.427,16	607.471,62	273.687,73	520.674,21	765.055,70
Consumo anual de água (m ³ /ano)	95	190	286	95	190	286
Custo anual com água (R\$/ano)	3.037,28	6.074,56	9.136,53	2.423,36	4.846,72	7.289,78

Primeiramente, é possível constatar que o custo de energia elétrica para o sistema de eletrólise da água é muito superior ao custo da água no processo, algo característico desse tipo de sistema. O custo anual com a água é de cerca de 1% do custo anual com energia elétrica. A

Figura 4.7 apresenta a contribuição de cada item de capital e insumo para a composição do custo do hidrogênio para o Hidrano 10 e 30 nos Estados de São Paulo e Rio de Janeiro.

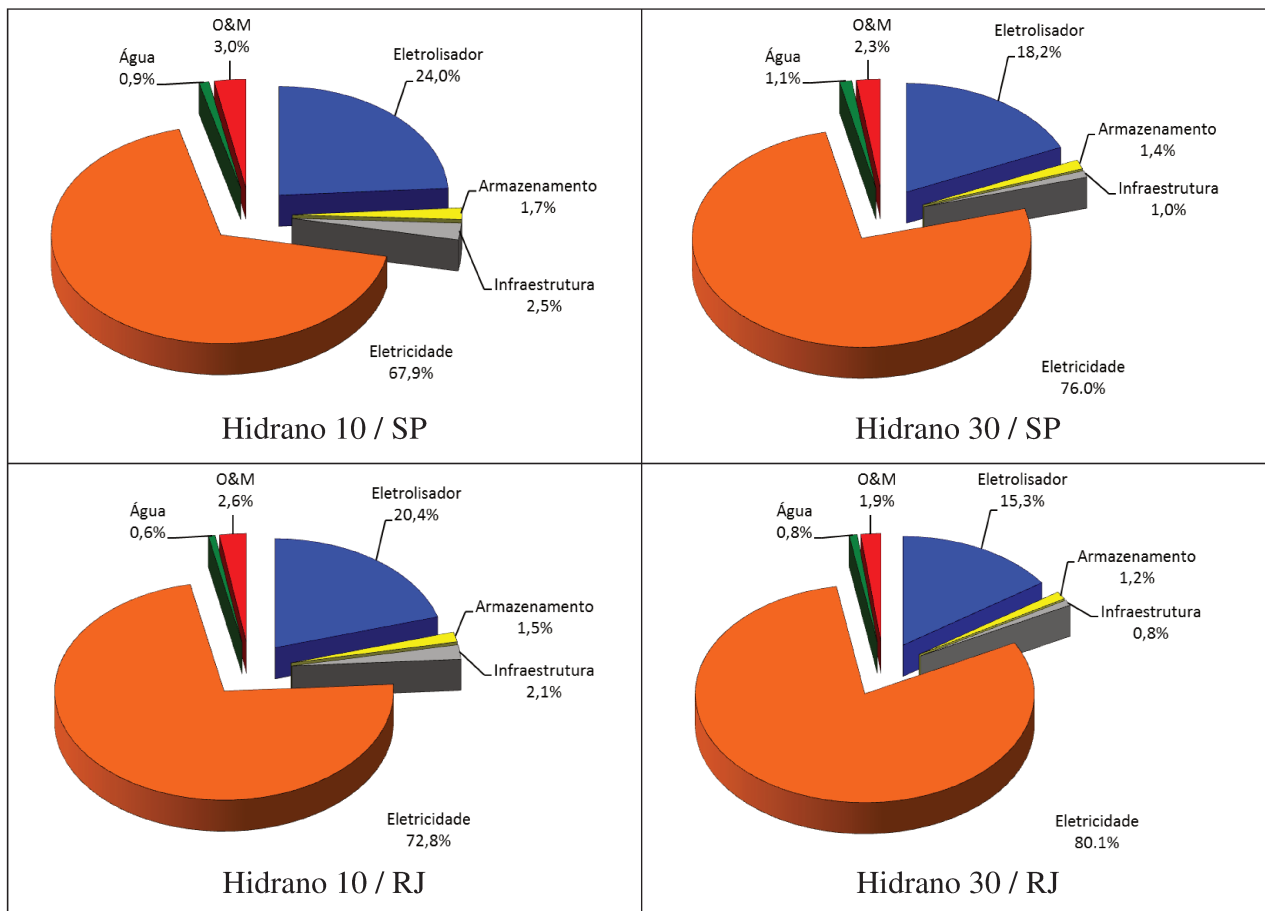


Figura 4.7- Contribuição de cada item para o custo do hidrogênio

Uma segunda constatação refere-se aos custos em cada Estado. O custo de energia elétrica no Rio de Janeiro é muito superior ao de São Paulo, fato que se deve, principalmente, à alíquota de ICMS para a energia elétrica de 29% no Rio de Janeiro e de 18% em São Paulo. O custo com a água se inverte nesses Estados, mas sua contribuição relativa é muito baixa.

Por fim, o sumário dos dados de entrada para a planilha de cálculo do VPL e os resultados para o custo do hidrogênio eletrolítico nos postos de Hidrano são apresentados na Tabela 4.14. Na mesma tabela são informadas as contribuições financeiras, em reais, do custo do hidrogênio no custo final do Hidrano, isto é, o equivalente em reais do percentual de hidrogênio contido no Hidrano.

Tabela 4.14- Dados de entrada para cálculo do VPL e determinação do custo do hidrogênio

Estado	SP			RJ		
Hidrano	10	20	30	10	20	30
Eletrolisador (R\$)	480.600,00	768.960,00	913.140,00	480.600,00	768.960,00	913.140,00
Armazenamento (R\$)	34.410,60	68.821,20	68.821,20	34.410,60	68.821,20	68.821,20
Infraestrutura (R\$)	50.000,00	50.000,00	50.000,00	50.000,00	50.000,00	50.000,00
Custo de capital (R\$)	565.010,60	887.781,20	1.031.961,20	565.010,60	887.781,20	1.031.961,20
O&M eletrolisador (R\$/ano)	9.612,00	15.379,20	18.262,80	9.612,00	15.379,20	18.262,80
O&M armazenamento (R\$/quinqüênio)	172,05	344,11	344,11	172,05	344,11	344,11
Custo anual: energia elétrica (R\$/ano)	217.314,28	413.427,16	607.471,62	273.687,73	520.674,21	765.055,70
Custo anual: água (R\$/ano)	3.037,28	6.074,56	9.136,53	2.423,36	4.846,72	7.289,78
Tempo de vida (anos)	20	20	20	20	20	20
Fator de utilização	82%	82%	74%	82%	82%	74%
Fator de disponibilidade	98%	98%	98%	98%	98%	98%
Taxa de desconto	15%	15%	15%	15%	15%	15%
Custo do hidrogênio (R\$/kg)	33,10	29,81	27,48	38,86	35,28	32,83
Custo do hidrogênio (R\$/m ³)	2,972	2,676	2,468	3,490	3,168	2,948
Contribuição para o custo do Hidrano (R\$/m ³)	0,297	0,535	0,740	0,349	0,634	0,884

Na Tabela 4.14, observa-se que o custo do hidrogênio é inversamente proporcional ao volume de sua produção, o que se deve à diluição do custo de capital e à eficiência mais elevada dos sistemas de eletrólise da água de maior porte.

4.2.4 Determinação do Preço de Venda do Hidrano

Tradicionalmente, o preço de venda do GNV é dado pelo custo do gás distribuído pela concessionária local mais a margem de lucro praticada pelo posto de combustíveis. Segundo dados da Federação Nacional do Comércio de Combustíveis e de Lubrificantes, a margem média praticada pelos postos de GNV em 2010 foi de 0,362 R\$/m³ (FECOMBUSTÍVEIS, 2011). Para a determinação do preço de revenda do Hidrano, manteve-se as margens de lucro proporcionais na revenda do GNV e adotou-se a taxa de desconto do investimento de 15% como margem de lucro para o hidrogênio que compõe o Hidrano.

Assim, empregando-se a Equação I (tópico 3.4) com os dados do custo de produção de hidrogênio nos postos de combustíveis e dos preços médios do GNV informados pela ANP (ANP, 2012) nos Estados avaliados, foram determinados os preços de revenda do Hidrano para cada uma de suas composições. Os valores obtidos são apresentados na Tabela 4.15.

Tabela 4.15- Preços de revenda do Hidrano

Estado	SP			RJ		
	10	20	30	10	20	30
Hidrano						
Preço de revenda do GNV (R\$/m ³)	1,308	1,308	1,308	1,662	1,662	1,662
Custo do hidrogênio (R\$/m ³)	2,972	2,676	2,468	3,490	3,168	2,948
Contribuição do GNV (R\$/m ³)	1,177	1,047	0,916	1,496	1,329	1,163
Contribuição do hidrogênio (R\$/m ³)	0,297	0,535	0,740	0,349	0,634	0,884
Preço de revenda do Hidrano (R\$/m³)	1,474	1,582	1,656	1,845	1,963	2,047
Incremento em relação ao GNV (R\$/m ³)	0,166	0,274	0,348	0,183	0,301	0,386
Incremento percentual em relação ao GNV	12,7%	20,9%	26,6%	11,0%	18,1%	23,2%

Considerou-se que não há incidência de mais impostos na revenda de Hidrano, além dos impostos que já incidem sobre o GNV e sobre os insumos utilizados na produção de hidrogênio. Uma análise mais detalhada sobre o assunto não faz parte do escopo desta tese e é uma sugestão para trabalhos futuros.

Constata-se que, no Rio de Janeiro, o alto preço do GNV e da energia elétrica empregada para a produção do hidrogênio que compõe o Hidrano acarretam em um preço de revenda desse último combustível mais elevado do que em São Paulo. Porém, o incremento percentual do preço do Hidrano em relação ao GNV é menor no Rio de Janeiro do que em São Paulo. Isto se deve ao fato de que o preço do GNV é 27% mais elevado no Rio de Janeiro, enquanto que o custo de produção do hidrogênio é cerca de 18% acima do custo em São Paulo. Já a diferença percentual no custo do hidrogênio se explica por conta dos custos de capital e O&M do sistema de produção desse gás serem iguais em ambos os Estados.

4.2.5 Preço de Venda do Hidrano, Taxa Interna de Retorno e Payback

Os parâmetros utilizados para a aplicação do método do VPL e para a determinação do preço das diversas composições do Hidrano implicam em uma taxa de atratividade do investimento igual a 15% ao ano, superior ao rendimento de aplicações financeiras correntes. Entretanto, investidores podem ter interesse em obter taxas internas de retorno (TIR) superiores a 15% ao ano empregando valores superiores ao mínimo praticado para o hidrogênio com as condições sugeridas na Tabela 4.14. Ao mesmo tempo, valores maiores para o hidrogênio trazem tempos de retorno do investimento inicial mais curtos, isto é, um *payback* mais rápido.

Aplicando-se as condições da Tabela 4.14 e mantendo o preço do GNV inalterado em cada Estado, o *payback* para o investimento inicial no sistema de geração e armazenamento de hidrogênio nos postos é de 6,3 anos. Os diversos valores para o hidrogênio, preço para o Hidrano, tempo de *payback* e TIR para cada um dos casos e regiões consideradas são apresentadas na Tabela 4.16 e na Tabela 4.17.

Tabela 4.16- Valores para o hidrogênio e Hidrano, *payback* e TIR para o posto de Hidrano (SP)

Hidrano 10			
Valor praticado para o hidrogênio (R\$/m ³)	Preço de revenda do Hidrano (R\$/m ³)	TIR	<i>Payback</i> (anos)
2,972	1,474	15,0%	6,3
3,143	1,492	18,6%	5,2
3,592	1,536	27,6%	3,6
4,041	1,581	36,3%	2,8
4,490	1,626	44,9%	2,2
Hidrano 20			
Valor praticado para o hidrogênio (R\$/m ³)	Preço de revenda do Hidrano (R\$/m ³)	TIR	<i>Payback</i> (anos)
2,676	1,582	15,0%	6,3
2,694	1,585	15,5%	6,1
3,143	1,675	27,1%	3,6
3,592	1,765	38,1%	2,6
4,041	1,855	49,1%	2,0
Hidrano 30			
Valor praticado para o hidrogênio (R\$/m ³)	Preço de revenda do Hidrano (R\$/m ³)	TIR	<i>Payback</i> (anos)
2,468	1,656	15,0%	6,3
2,694	1,724	22,7%	4,3
3,143	1,859	37,1%	2,7
3,592	1,993	51,3%	1,9
4,041	2,128	65,4%	1,5

Tabela 4.17- Valores para o hidrogênio e Hidrano, *payback* e TIR para o posto de Hidrano (RJ)

Hidrano 10			
Valor praticado para o hidrogênio (R\$/m ³)	Preço de revenda do Hidrano (R\$/m ³)	TIR	<i>Payback</i> (anos)
3,490	1,845	15,0%	6,3
3,592	1,855	17,2%	5,6
4,041	1,900	26,2%	3,8
4,490	1,945	35,0%	2,9
4,939	1,990	43,6%	2,3
Hidrano 20			
Valor praticado para o hidrogênio (R\$/m ³)	Preço de revenda do Hidrano (R\$/m ³)	TIR	<i>Payback</i> (anos)
3,168	1,963	15,0%	6,3
3,368	2,003	20,3%	4,8
3,592	2,048	26,0%	3,8
4,041	2,138	37,1%	2,7
4,490	2,228	48,0%	2,1
Hidrano 30			
Valor praticado para o hidrogênio (R\$/m ³)	Preço de revenda do Hidrano (R\$/m ³)	TIR	<i>Payback</i> (anos)
2,948	2,048	15,0%	6,3
3,143	2,106	21,7%	4,5
3,592	2,241	36,1%	2,8
4,041	2,376	50,3%	2,0
4,490	2,510	64,4%	1,6

Constata-se que no caso de referência (TIR igual a taxa de desconto e *payback* de 6,3 anos) a proposta do Hidrano já é promissora ao investidor (posto de combustíveis). Em casos específicos, nos quais o valor praticado para o hidrogênio possa ser maior, a proposta do Hidrano é ainda mais atrativa, podendo atingir uma TIR de até 65,4% e *paybacks* inferiores à 2 anos. Entretanto, esses casos devem ser melhor avaliados pelo investidor, pois pode tornar o Hidrano

inviável para o consumidor final, isto é, acarretar em um preço do combustível pouco competitivo frente à gasolina, ao etanol e, principalmente, ao GNV puro.

De acordo com dados encontrados na literatura referente à projetos financeiros de instalação de um posto tradicional de combustíveis (que revende diesel, gasolina e etanol, além de conveniências, exceto GNV) apresenta TIR entre 15,0% e 40,9%, com um *payback* aproximado de 3,5 anos (BORGES, 2006; MASS, 2009; SEBRAE, 1999). Entretanto, conversas informais com gerentes de postos e com representante de uma empresa de distribuição indicam que a TIR e o *payback* variam grandemente em função da localização do posto (cidade ou beira de estrada), margens de lucro praticadas, concorrência local, bandeira (vinculada ou branca), conveniências e serviços associados, fornecimento de GNV ou não, entre outros. Foram citados casos em que o *payback* foi inferior a 2 anos e casos em que o *payback* chegou a 8 anos.

As avaliações a seguir serão realizadas para o caso mais conservador, com uma taxa de desconto de 15% ao ano, o que leva a um *payback* de 6,3 anos, considerando um período de vida do projeto de 20 anos. Dessa forma a proposta de introdução do Hidrano em postos de GNV é atrativa do ponto de vista do consumidor e, portanto, com maior possibilidade de sucesso.

4.2.6 Tarifação A4 Convencional para Postos de Hidrano

Os postos de combustíveis estão em geral enquadrados no Grupo B (baixa tensão, comercial) das concessionárias de energia elétrica, cuja tarifação é baseada unicamente no consumo de energia mensal. Entretanto, a partir do momento em que se instala um eletrolisador de água para a geração de hidrogênio, com demanda de potência entre 82 e 254 kW, o posto de Hidrano pode ser enquadrado no Grupo A (alta tensão, industrial). Do ponto de vista financeiro, esse novo enquadramento do posto de abastecimento traz mais vantagens, uma vez que as tarifas são menores para o Grupo A em relação ao Grupo B. De forma a se comparar o caso avaliado (tarifação do Grupo B3) com o novo enquadramento, optou-se por estimar o preço do Hidrano para a tarifação do Grupo A4 Convencional.

A tarifação de energia elétrica no Grupo A4 Convencional se dá sobre uma demanda contratada (R\$/kW) junto à concessionária e sobre o consumo mensal (R\$/kWh). As tarifas para as concessionárias das regiões avaliadas são apresentadas na Tabela 4.18.

Tabela 4.18- Tarifas de energia elétrica para o Grupo A4 Convencional com impostos

CPFL (Campinas)		Light (Rio de Janeiro)	
Demanda (R\$/kW)	Consumo (R\$/kWh)	Demanda (R\$/kW)	Consumo (R\$/kWh)
37,06	0,23316	71,46	0,24733

Fontes: Adaptado dos websites da CPFL e Light (CPFL, 2012; LIGHT, 2012).

Considerando uma demanda contratada 15% acima da potência de cada eletrolisador, os sistemas de geração de hidrogênio para o Hidrano 10, 20 e 30 apresentam demandas de 94,3 kW, 179,4 kW e 292,1 kW, respectivamente. Empregando o mesmo consumo elétrico anual na produção de hidrogênio para o Hidrano indicado na Tabela 4.12 para esses sistemas, obtêm-se os custos de energia apresentados na Tabela 4.19.

Tabela 4.19- Custo anual com energia elétrica para tarifa A4 Convencional

Hidrano	CPFL (Campinas)			Light (Rio de Janeiro)		
	10	20	30	10	20	30
Demanda contratada (kW)	94,3	179,4	292,1	94,3	179,4	292,1
Custo com demanda (R\$/ano)	41.938,27	79.784,99	129.906,34	80.863,26	153.837,42	250.478,88
Consumo elétrico anual (kWh/ano)	577.242	1.098.168	1.613.599	577.242	1.098.168	1.613.599
Custo com consumo (R\$/ano)	134.590,05	256.049,37	376.227,64	142.770,94	271.613,01	399.096,16
Custo anual com energia elétrica (R\$/ano)	176.528,32	335.834,36	506.133,98	223.634,20	425.450,43	649.575,05
Redução do custo (ref. tarifa B3)	18,8%	18,8%	16,7%	18,3%	18,3%	15,1%

Constata-se que a economia com a nova tarifa é bastante interessante, atingindo quase 19%. O impacto dessa redução com o custo da energia elétrica acarreta uma redução nos preços finais das diversas composições de Hidrano, conforme ilustra a Tabela 4.20.

Tabela 4.20- Preços de revenda do Hidrano com tarifação A4 Convencional

Estado	SP			RJ		
Hidrano	10	20	30	10	20	30
Preço de revenda do Hidrano (R\$/m ³)	1,437	1,510	1,562	1,798	1,875	1,941
Redução do custo (ref. tarifa B3)	2,5%	4,6%	5,7%	2,5%	4,5%	5,2%

As reduções nos preços de revenda do Hidrano variam entre 2,5% e 5,7%, o que pode representar maior interesse do consumidor nesse combustível. Novamente se constata que a carga tributária sobre a energia elétrica no Estado do Rio de Janeiro penaliza o preço final do Hidrano em relação ao Estado de São Paulo. Além disso, uma vez que o preço do GNV no Estado do Rio de Janeiro é mais elevado, os impactos da redução de custo com a tarifação A4 Convencional são também menores.

4.3 A Competitividade entre Hidrano, GNV, Gasolina e Etanol

O preço do Hidrano em si não é capaz de determinar sua viabilidade econômica. A viabilidade depende da relação de preços entre os combustíveis automotivos e do consumo específico relativo dos veículos utilizando cada um desses combustíveis. Nos tópicos a seguir são apresentados os diversos aspectos a se considerar na avaliação da competitividade do Hidrano.

4.3.1 Preços de Revenda dos Combustíveis

A Tabela 4.21 apresenta um resumo dos preços médios da gasolina automotiva, etanol hidratado, GNV, Hidrano 10, 20 e 30 nos Estados de São Paulo e Rio de Janeiro no ano de 2011. Os preços médios dos combustíveis convencionais foram obtidos a partir da ANP (ANP, 2012).

Tabela 4.21- Preços de combustíveis em São Paulo e no Rio de Janeiro

	Gasolina (R\$/L)	Etanol (R\$/L)	GNV (R\$/m ³)	Hidrano		
				10 (R\$/m ³)	20 (R\$/m ³)	30 (R\$/m ³)
São Paulo	2,642	1,865	1,308	1,474	1,582	1,656
Rio de Janeiro	2,835	2,242	1,662	1,845	1,963	2,047

A variação de preços é bastante ampla entre os combustíveis e entre os Estados. Entretanto, não se pode inferir qualquer conclusão apenas através desses dados.

Do ponto de vista da estratégia de marketing para comercialização dos combustíveis, da mesma forma que os postos oferecem gasolina comum e aditivada, etanol comum e aditivado, o Hidrano pode ser comercializado como um “GNV aditivado”. Entretanto, uma análise técnica mais aprofundada, que leve em conta os efeitos mecânicos do uso prolongado de GNV e de Hidrano em motores a combustão, não fez parte do escopo deste trabalho. A avaliação técnica se faz necessária, mas do ponto de vista de marketing a proposta parece promissora, uma vez que os custos adicionais dos combustíveis aditivados são semelhantes, conforme mostra a Tabela 4.22.

Tabela 4.22- Preços de combustíveis comuns e aditivados

	Comum	Aditivado	Diferença
Gasolina (R\$/L)	2,699	2,849	0,150
Etanol (R\$/L)	1,999	2,099	0,100
GNV (SP) (R\$/m ³)	1,308	1,479	0,166
GNV (RJ) (R\$/m ³)	1,662	1,849	0,183

Na Tabela 4.22, o “GNV aditivado” foi considerado o Hidrano 10 e os preços da gasolina e do etanol foram obtidos em um posto de combustíveis de Campinas em abril de 2012, uma vez que o levantamento de preços da ANP leva em conta apenas os combustíveis comuns, não aditivados. A diferença de preços entre os combustíveis aditivados e comuns, em especial da gasolina, são muito próximos da diferença entre o preço do GNV e do Hidrano 10, o que pode parecer interessante ao consumidor no momento de abastecer.

4.3.2 Custo do Quilômetro Rodado para cada Combustível

O parâmetro mais significativo para a comparação entre os combustíveis e a competitividade entre eles é o custo do quilômetro rodado para cada combustível, principalmente quando se trata de diferentes estados físicos (líquidos e gases), como é o caso. Esse parâmetro é intrinsecamente o consumo específico de cada veículo com cada combustível avaliado.

Dados comparativos referentes ao consumo específico de veículos são escassos na literatura, além de que esse parâmetro depende do veículo, de sua motorização, do ciclo de testes ou das normas empregadas para sua avaliação, da regulagem do motor, entre outros fatores. Nesta tese optou-se por utilizar a média dos dados de trabalhos com foco na comparação de consumo específico em quilômetros por litro ou por metro cúbico (km/L ou km/m³) entre combustíveis num mesmo veículo (GASNET, 2007; PELLIZA, 2003; RODRIGUES, D., 2005; SANTOS, 2002). Os valores de consumo específico e a média calculada são apresentados na Tabela 4.23.

Tabela 4.23- Consumo específico médio de veículos a gasolina, etanol e GNV

Veículo	Gasolina (km/L)	Etanol (km/L)	GNV (km/m ³)
Veículo nacional médio ¹	10,0	8,0	12,0
GM Astra (etanol) ²	--	8,7	15,0
GM Astra (gasolina) ²	12,0	--	15,0
FIAT Siena (gasolina) ²	14,2	--	12,4
FORD Ranger (gasolina) ²	9,0	--	10,9
VW Santana (etanol) ²	--	8,7	17,8
VW Santana (gasolina) ²	11,9	--	16,3
Veículo popular de 1.0 L ³	10,0	8,5	12,0
VW Kombi ³	7,5	6,5	9,0
FORD F1000 / GM C20 ³	5,5	4,5	7,0
FORD Ranger / GM S10 ³	6,0	5,0	8,0
GM Astra / VW Santana ³	8,0	7,0	10,0
Automóvel 6 cilindros ³	5,0	4,0	6,0
FIAT Siena Tetrafuel ⁴	14,3	11,1	13,3
Média	9,5	7,2	11,8

Fontes: 1- (SANTOS, 2002); 2- (VALIANTE, 2006); 3- (RODRIGUES, D., 2005); 4- (GASNET, 2007).

Como não existem informações empíricas ou teóricas sobre veículos nacionais movidos a Hidrano, optou-se aqui por utilizar dados da literatura revisada, Capítulo 2, para o consumo específico de veículos utilizando esse novo combustível. A literatura indica que há um aumento de eficiência com o emprego de Hidrano em relação ao GNV. Entretanto, os trabalhos não apresentam uma única metodologia de aferição do consumo específico de combustíveis e, em alguns casos, apresentam apenas o ganho relativo sem indicar o consumo específico.

O consumo específico de combustível para o Hidrano é mais frequentemente encontrado na literatura em unidades de massa de combustível consumido por unidade de energia (g/MJ ou g/kWh) ou em unidades de energia por quilômetro rodado (MJ/km ou kWh/km). Os dados encontrados e estimados através da literatura estão sumarizados na Tabela 4.24.

Tabela 4.24- Consumo específico médio de veículos a Hidrano

Referência	Hidrano 10 (MJ/km)	Hidrano 20 (MJ/km)	Hidrano 30 (MJ/km)
Mariani (2012)	3,00	--	--
Genovese <i>et al.</i> (2011)	2,77	2,65	2,60
Ceper, B. A. <i>et al.</i> (2009)	2,98	2,94	2,83
Ma, F. H.; Wang, Y. F. <i>et al.</i> (2009)	2,87	2,81	2,84
Morrone; Unich (2009)	2,97	--	2,92
Ma, F. H.; Wang, J. J.; Wang, Y.; Wang, Y. F.; Zhong; <i>et al.</i> (2008)	2,91	2,91	2,91
Dimopoulos <i>et al.</i> (2008)	2,94	--	--
Ortenzi <i>et al.</i> (2008)	2,89	2,75	--
Ma, F. H.; Wang, J. J.; Wang, Y.; Wang, Y. F.; Li; <i>et al.</i> (2008)	2,93	2,86	2,76
Akansu <i>et al.</i> (2004)	--	2,91	--
Média	2,93	2,83	2,81

Neste trabalho optou-se por converter esses dados em quilômetros por metro cúbico (km/m^3) de Hidrano, tomando por base a composição do gás natural informada pela COMGAS e o poder calorífico inferior (PCI) de cada componente segundo o *software HySys*^{® 11}, determinou-se o conteúdo energético do gás natural, com base no PCI (Tabela 4.25).

Tabela 4.25- Composição e conteúdo energético do gás natural

Componentes	Metano	Etano	Propano	Butano e outros	N ₂ e CO ₂	GNV
Concentração (mol/mol)	89,0%	6,0%	1,8%	1,0%	2,2%	100,0%
PCI (kJ/m^3)	33.480	59.948	86.588	113.450	0	36.087

Fontes: (COMGAS, 2011) e (ASPENTECH, 2011).

Sabendo que o PCI do hidrogênio segundo o *software HySys*[®] é de $10.060 \text{ kJ}/\text{m}^3$, e conhecendo-se o conteúdo de hidrogênio e GNV em cada composição de Hidrano, é possível

¹¹ *HySys*[®] é uma marca registrada da empresa *AspenTech*.

calcular o conteúdo energético das diversas composições de Hidrano, que são apresentadas na Tabela 4.26.

Tabela 4.26- Conteúdo energético do GNV e do Hidrano

Combustível	GNV	Hidrogênio	Hidrano 10	Hidrano 20	Hidrano 30
PCI (kJ/m ³)	36.087	10.060	33.484	30.882	28.279

Através do PCI do GNV e sabendo que o consumo médio desse combustível em um veículo é de 11,8 km/m³, determinou-se que o seu consumo específico médio é de 3,06 MJ/km. Correlacionando-se esses valores com as médias da Tabela 4.24, obtém-se os dados de consumo médio de combustíveis da Tabela 4.27.

Tabela 4.27- Consumo médio de veículos a gasolina, etanol, GNV e Hidrano

Veículo	Gasolina (km/L)	Etanol (km/L)	GNV (km/m ³)	Hidrano		
				10 (km/m ³)	20 (km/m ³)	30 (km/m ³)
Consumo adotado	9,5	7,2	11,8	11,4	10,9	10,1

Assim, empregando os dados da Tabela 4.21, que apresenta o preço de revenda dos diversos combustíveis, e o consumo a médio apresentado na Tabela 4.27, determinou-se a competitividade entre os diversos combustíveis nos Estados de São Paulo e Rio de Janeiro. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 4.28 e na Tabela 4.29 e ilustrados na Figura 4.8 e na Figura 4.9.

Tabela 4.28- Competitividade entre gasolina, etanol, GNV e Hidrano em São Paulo

Gasolina (R\$/km)	Etanol (R\$/km)	GNV (R\$/km)	Hidrano		
			10 (R\$/km)	20 (R\$/km)	30 (R\$/km)
0,280	0,259	0,111	0,129	0,145	0,164

Tabela 4.29- Competitividade entre gasolina, etanol, GNV e Hidrano no Rio de Janeiro

Gasolina (R\$/km)	Etanol (R\$/km)	GNV (R\$/km)	Hidrano		
			10 (R\$/km)	20 (R\$/km)	30 (R\$/km)
0,300	0,311	0,141	0,161	0,180	0,203

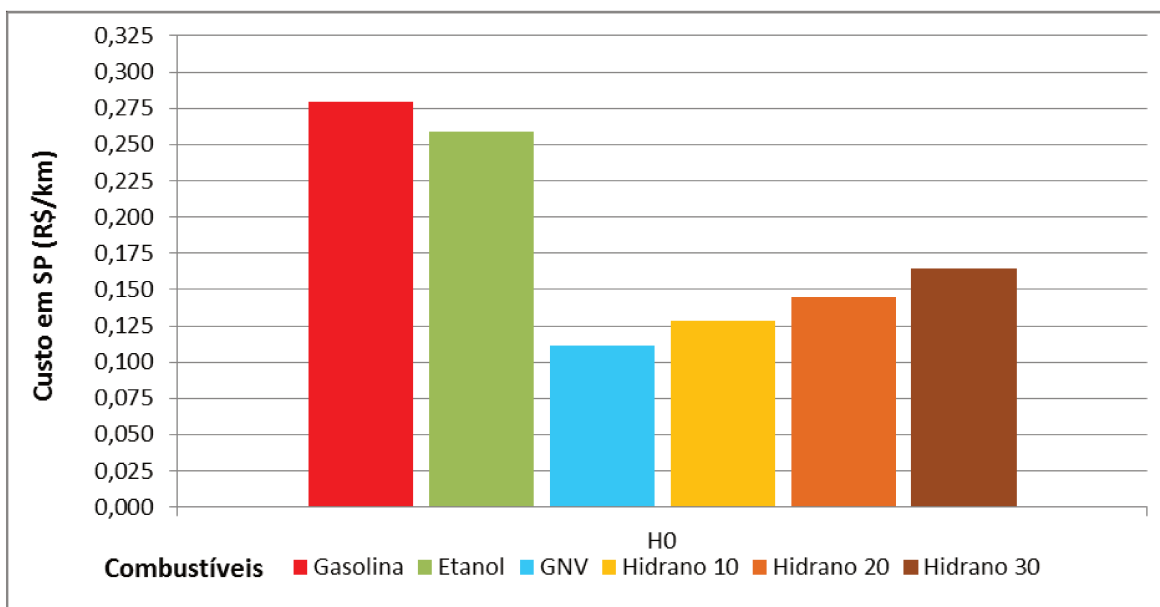


Figura 4.8- Competitividade entre combustíveis no Estado de São Paulo

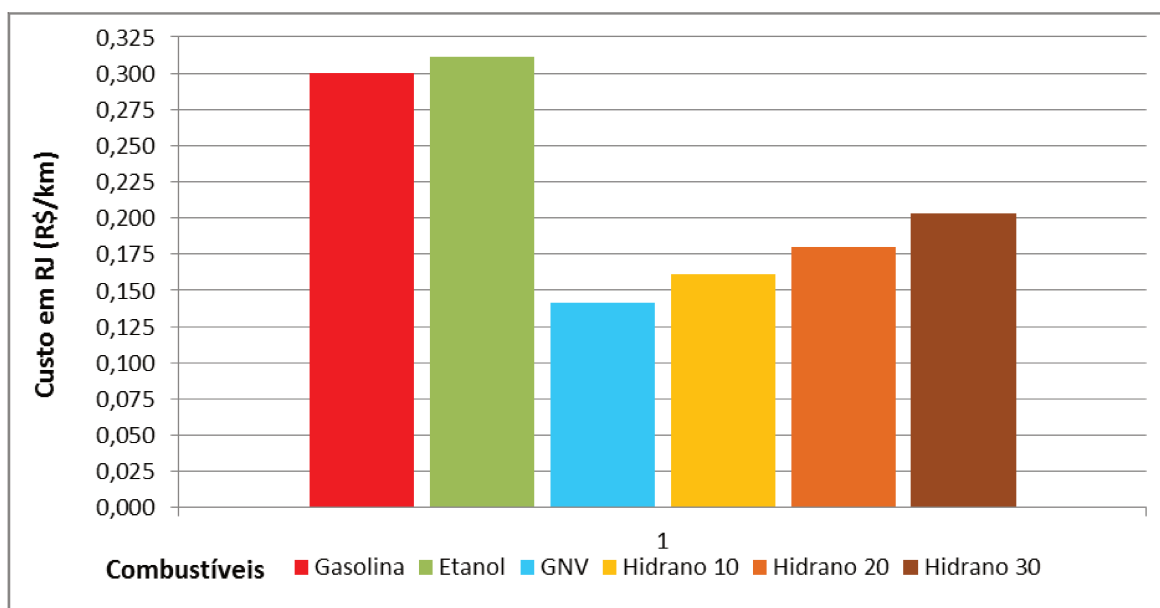


Figura 4.9- Competitividade entre combustíveis no Estado do Rio de Janeiro

Observa-se que o GNV é o combustível com melhor competitividade em ambos os Estados. Tomando o GNV como base de comparação, a gasolina apresenta custos cerca de 150% e 110% superiores em São Paulo e no Rio de Janeiro, respectivamente. De modo similar, o etanol tem custos 130% e 120% superiores ao GNV. Já o Hidrano apresenta valores entre 16% e 48% superiores ao GNV em São Paulo e entre 14% e 44% no Rio de Janeiro. Conclui-se, de imediato, que o Hidrano é ligeiramente mais competitivo no Rio de Janeiro do que em São Paulo, apesar do custo absoluto ser mais baixo nesse último Estado.

Observa-se também que o incremento no custo por quilômetro rodado com Hidrano, entre 14% e 48% superiores ao GNV, não consiste em uma barreira imediata para a utilização do novo combustível. Primeiro porque o custo por quilômetro do Hidrano ainda é muito competitivo frente aos custos verificados para a gasolina e para o etanol e, segundo, porque possíveis aumentos de torque e potência e reduções de emissões nos veículos podem tornar o Hidrano vantajoso frente ao GNV, independentemente de mudanças na política energética nacional. De modo preliminar, a revisão da literatura indica que pode haver ganhos de potência e que certamente haverá redução de algumas das emissões, principalmente CO₂ e CO. No entanto, avaliações experimentais em veículos utilizando esses combustíveis são necessárias para se esclarecer, qualitativa e quantitativamente, como se comportam a potência, o torque e as emissões em veículos representativos da frota brasileira.

A Figura 4.10 e a Figura 4.11 apresentam estimativas referentes ao custo do quilômetro rodado com Hidrano e em função do consumo desse combustível em comparação ao GNV respectivamente para os Estados de São Paulo e Rio de Janeiro. Constata-se que para o Hidrano 10, em São Paulo, um consumo a partir de 13,3 km/m³ torna esse combustível mais vantajoso que o GNV, cujo consumo estimado é de 11,8 km/m³. Isso significa a necessidade de uma melhora da ordem de 16% para o Hidrano 10 para que se torne mais vantajoso do que o GNV. Para o Estado do Rio de Janeiro, consumos a partir de 13,1 km/m³, que representam uma melhoria de 14% sobre o consumo estimado, já tornam o Hidrano 10 mais vantajoso economicamente.

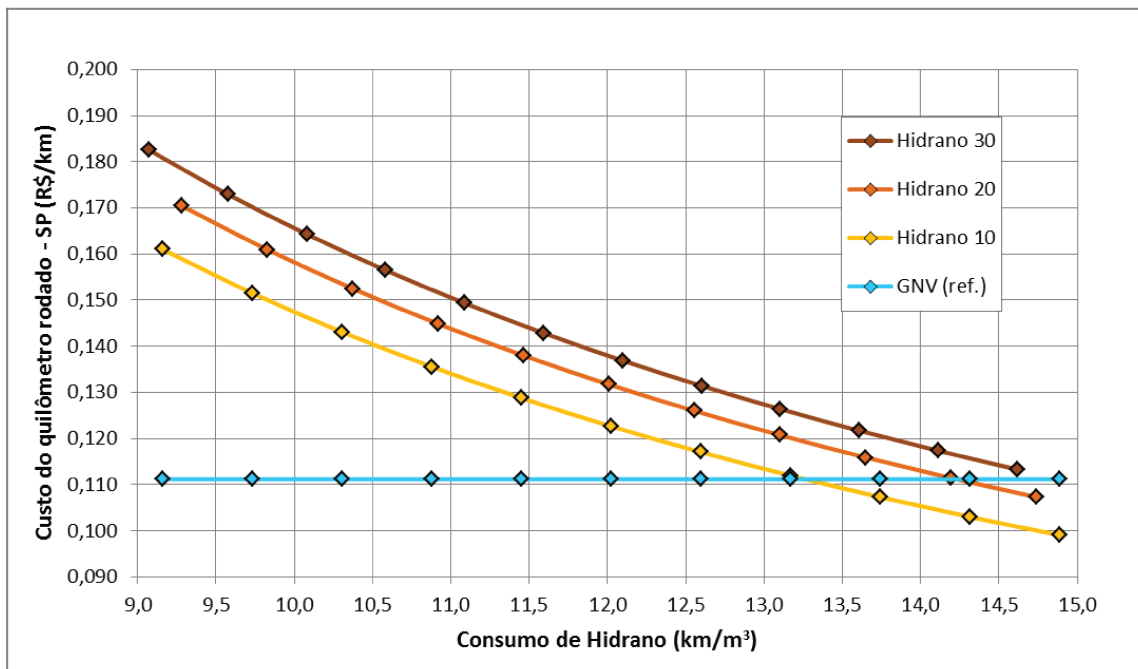


Figura 4.10- Custo do quilômetro rodado em função do consumo do veículo com Hidrano no Estado de São Paulo

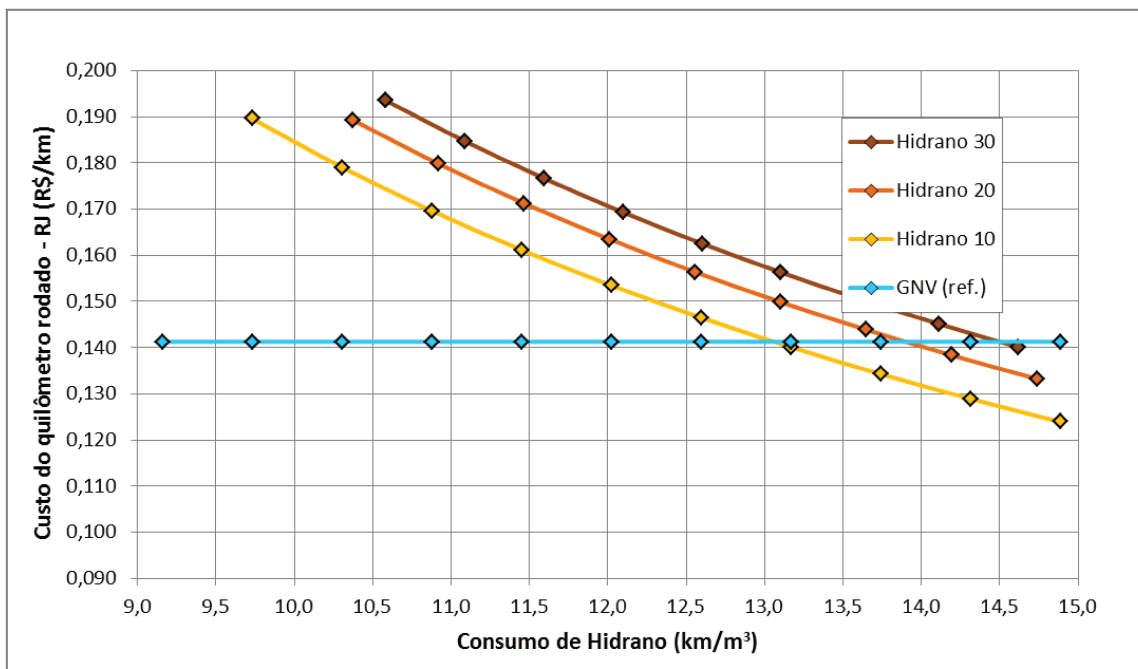


Figura 4.11- Custo do quilômetro rodado em função do consumo do veículo com Hidrano no Estado do Rio de Janeiro

Para o Hidrano 20 e Hidrano 30, as melhorias de consumo para superação do GNV são menores no Rio de Janeiro do que em São Paulo devido às diferentes relações de custos e preços

do hidrogênio e GNV. Entretanto, as melhorias de consumo para esses combustíveis são superiores a 27%, o que não deverá ser observado na prática, mas apenas em condições muito especiais.

Finalmente, um fator que afeta bastante o custo do quilômetro rodado para o GNV é o investimento inicial para a conversão do veículo, isto é, o custo de instalação do “kit gás”. Atualmente, o preço do sistema de conversão para GNV de quinta geração é de R\$ 4.000,00 em uma oficina de grande porte homologada pelo INMETRO (GÁSPOINT, 2012). Esse valor inclui o sistema de quinta geração, dois cilindros para GNV de 7,5 m³, laudo do INMETRO, autorização da delegacia de trânsito e três anos de garantia. Esse sistema é o mais eficiente do mercado e atende todos os veículos com injeção eletrônica multiponto, com perda de potência da ordem de 3% em relação à gasolina, segundo dados do instalador.

Nesta tese, assumiu-se que os combustíveis em estudo são utilizados em veículos já convertidos para GNV e, que assim, o custo do sistema de conversão já foi ou está sendo amortizado. Portanto, o custo do quilômetro rodado apresentado aqui leva em conta apenas o custo do combustível e o consumo do veículo. Finalmente, para o caso de novas instalações, principalmente em veículos que percorrem grandes quilometragens, usualmente taxistas e frotistas, o custo da conversão é amortizado rapidamente, em geral, menos de um ano após a instalação (BRANDÃO FILHO, 2005; PELLIZA, 2003; VALIANTE, 2006). Com os dados referentes ao preço dos combustíveis e com o valor da conversão aqui informado, o custo da conversão é totalmente amortizado entre 23.500 km e 27.000 km rodados.

4.3.3 Competitividade do Hidrano Empregando Tarifação A4 Convencional

Realizando-se as mesmas considerações anteriores para o caso em que o hidrogênio que compõe o Hidrano é produzido a partir de energia elétrica com tarifação do Grupo A4 Convencional, a competitividade do Hidrano será maior em relação aos demais combustíveis.

Primeiramente, os preços em relação aos outros combustíveis passam a ser mais atrativos. Quando se considera o Hidrano 10 como “GNV aditivado”, a diferença de preços passa a ser menor do que a verificada para a gasolina na época do estudo, conforme a Tabela 4.30.

Tabela 4.30- Preços de combustíveis comuns e aditivados (Hidrano com tarifação A4)

	Comum	Aditivado	Diferença
Gasolina (R\$/L)	2,699	2,849	0,150
Etanol (R\$/L)	1,999	2,099	0,100
GNV (SP) (R\$/m ³)	1,308	1,437	0,129
GNV (RJ) (R\$/m ³)	1,662	1,798	0,136

A competitividade do Hidrano com a tarifação A4 Convencional é, conseqüentemente, melhorada. O custo do quilômetro rodado com Hidrano se reduz entre 2,5% e 5,7% dependendo de sua composição e da região. A Tabela 4.31 apresenta a competitividade do Hidrano frente aos outros combustíveis para cada grupo tarifário.

Tabela 4.31- Competitividade entre gasolina, etanol, GNV e Hidrano para cada grupo tarifário

	Gasolina (R\$/km)	Etanol (R\$/km)	GNV (R\$/km)	Hidrano		
				10 (R\$/km)	20 (R\$/km)	30 (R\$/km)
Tarifação A4 / SP	0,280	0,259	0,111	0,125	0,138	0,155
Tarifação B3 / SP	0,280	0,259	0,111	0,129	0,145	0,164
Redução (ref. tarifa B3)	--	--	--	2,6%	4,6%	5,7%
Tarifação A4 / RJ	0,300	0,311	0,141	0,157	0,172	0,193
Tarifação B3 / RJ	0,300	0,311	0,141	0,161	0,180	0,203
Redução (ref. tarifa B3)	--	--	--	2,5%	4,5%	5,2%

Dessa forma, com a tarifação A4 Convencional, a competitividade do Hidrano aumenta, apresentando valores entre 13% e 39% superiores ao GNV em São Paulo e entre 11% e 36% no Rio de Janeiro. O Hidrano se mantém ligeiramente mais competitivo no Rio de Janeiro do que em São Paulo, apesar do custo absoluto ser mais baixo nesse último Estado.

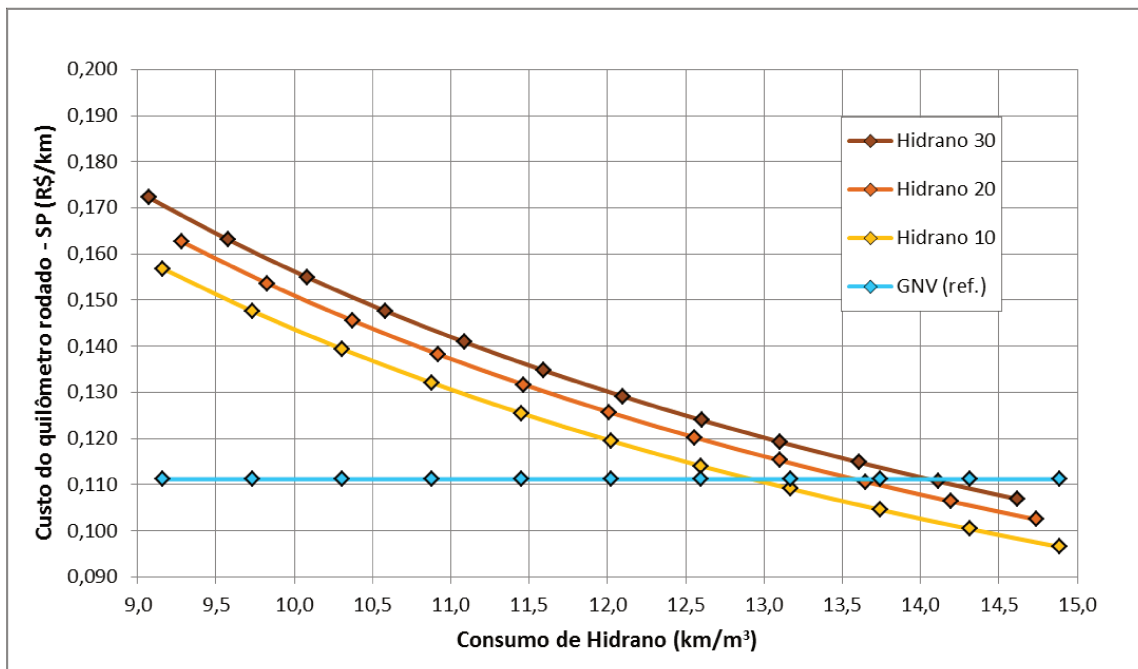


Figura 4.12- Custo do quilômetro rodado em função do rendimento do veículo com Hidrano no Estado de São Paulo e tarifação A4 Convencional

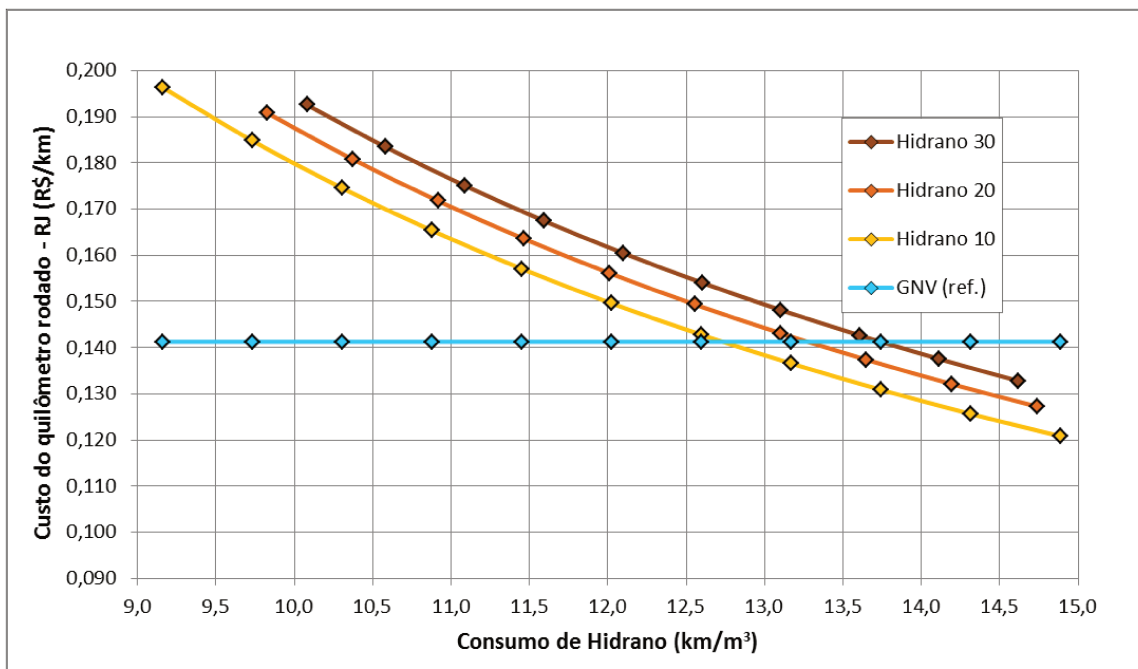


Figura 4.13- Custo do quilômetro rodado em função do rendimento do veículo com Hidrano no Estado do Rio de Janeiro e tarifação A4 Convencional

A Figura 4.12 e a Figura 4.13 mostram que o consumo de um veículo para o qual o Hidrano 10 passa a ser mais vantajoso do que o GNV ocorre a partir de 12,9 km/m³ em São Paulo

e a partir de $12,7 \text{ km/m}^3$ no Rio de Janeiro, o que equivale a melhorias entre 13% e 11% superiores respectivamente. Para o Hidrano 20 e 30, em São Paulo, os consumos precisam apresentar melhorias de 24% e 39%, e uma elevação de 22% e 36% no Rio de Janeiro. Portanto, a tarifação do Grupo A4 Convencional torna o Hidrano 20 e 30 mais próximos de se tornarem viáveis, quando se compara com a tarifação do Grupo B3.

4.3.4 Outros Fatores com Impacto sobre a Competitividade do Hidrano

Outros fatores além do custo podem afetar a competitividade do Hidrano com relação aos outros combustíveis. Por exemplo, um dos aspectos que costumam causar insatisfação nos usuários de GNV frente ao etanol e à gasolina refere-se ao espaço que o cilindro de gás ocupa no porta-malas do veículo, nos casos em que o tanque não pode ser instalado sob o assoalho traseiro (RODRIGUES, D., 2005). Esse fator não afeta grandemente a competitividade do Hidrano frente ao GNV, uma vez que os seus usuários já se acostumaram com o espaço ocupado pelo cilindro.

Um fator que pode afetar a competitividade do Hidrano frente ao GNV é a autonomia do veículo. Os usuários de GNV em geral optam normalmente por cilindros com volume de armazenamento de até 15 m^3 , o que oferece uma autonomia média de 177 km, quando empregado o consumo de $11,8 \text{ km/m}^3$ com GNV (Tabela 4.27). Essa autonomia é considerada baixa frente ao etanol e à gasolina em veículos convencionais. Portanto, se o Hidrano acarretar em autonomies muito menores do que a atingida com GNV, isso pode ser uma desvantagem para o Hidrano.

A Tabela 4.32 apresenta a redução do conteúdo energético das diversas composições de Hidrano frente ao GNV e a respectiva redução de autonomia de um veículo considerando-se a média do consumo específico para cada um dos combustíveis (Tabela 4.24).

Tabela 4.32- Conteúdo energético e autonomia com GNV e Hidrano

Combustível	GNV	Hidrogênio	Hidrano 10	Hidrano 20	Hidrano 30
PCI (kJ/m ³)	36.087	10.060	33.484	30.882	28.279
Redução do PCI com relação ao GNV	0,0%	-72,1%	-7,2%	-14,4%	-21,6%
Redução da autonomia com relação ao GNV	0,0%	--	-3,0%	-7,6%	-14,7%

Dessa forma, para o Hidrano 10, o conteúdo energético é reduzido em 7,2%. Porém, como se assumiu que o consumo específico médio do veículo utilizando esse combustível é de 2,93 MJ/km, a redução de autonomia seria de apenas 3,0%. Isto é, para o caso de um veículo com cilindros de 15 m³ capaz de rodar 177 km com GNV, haveria a redução da autonomia para 172 km com Hidrano 10.

Novamente, a exemplo do custo do quilômetro rodado, o Hidrano 20 e o Hidrano 30 apresentam maiores desvantagens considerando a autonomia frente ao GNV. Na condição de uma autonomia de 177 km com GNV, o Hidrano 20 teria autonomia de 164 km e o Hidrano 30 apenas 151 km, se não houver maiores melhorias do consumo de combustível para os veículos abastecidos com Hidrano.

4.4 Impactos Ambientais do Hidrano

Os impactos ambientais diretos da utilização de Hidrano na frota atual de veículos a GNV se resume às emissões de gases de efeito estufa e às emissões de poluentes. No caso dos gases de efeito estufa, avaliou-se nesta tese o dióxido de carbono (CO₂). Com relação aos poluentes, são avaliadas as emissões de CO, NO_x e THC.

4.4.1 Emissões de CO₂ a partir do Uso de Hidrano

As emissões de CO₂ oriundas da queima de combustíveis estão diretamente relacionadas ao conteúdo de carbono do combustível. Ainda que o processo de combustão em si influencie na taxa de emissão de CO₂, para fins de estimativa, considerou-se que a queima do GNV em motores do ciclo Otto emita 56.100 kgCO₂/TJ (IPCC, 2006). Considerando que o PCI do GNV é de 36,087 MJ/m³, o fator de emissão desse gás resulta em 2,024 kgCO₂/m³. Portanto, as emissões de CO₂ para o Hidrano oriundas do GNV são apresentadas na Tabela 4.33

Tabela 4.33- Emissões de CO₂ para o Hidrano oriundas do GNV

	Conteúdo de GNV	Emissões de CO ₂ (kgCO ₂ /m ³)
GNV	100%	2,024
Hidrano 10	90%	1,822
Hidrano 20	80%	1,620
Hidrano 30	70%	1,417

Por sua vez, a combustão do hidrogênio produz quase que exclusivamente água (H₂O). As altas temperaturas geradas na combustão do hidrogênio também acarretam emissões de NO_x. Entretanto, essas emissões não são consideradas neste item por se tratar de um poluente, cujo impacto sobre a saúde humana é bem mais intenso do que seus efeitos como gás de efeito estufa.

Ainda com relação ao hidrogênio, dependendo de seu processo de produção, pode haver emissões de CO₂. Como o processo de eletrólise da água abordado nesta tese utiliza energia elétrica da rede, considera-se que o fator de emissão para a produção de hidrogênio é proporcional às emissões médias totais do Sistema Interligado Nacional (SIN), calculadas de acordo com as metodologias do Programa Nacional de Mudanças Climáticas (MCTI, 2012). No ano de 2011, o fator de emissão médio do SIN foi de 0,0292 tCO₂/MWh. Dessa forma, as emissões de CO₂ oriundas da produção de hidrogênio para cada uma das composições de Hidrano são dadas pela eficiência de produção de cada eletrolisador (Tabela 4.34).

Tabela 4.34- Emissões de CO₂ para o Hidrano oriundas da produção eletrolítica de hidrogênio

	Consumo energético do eletrolisador (kWh)	Produção de hidrogênio (m ³ /h)	Eficiência de produção (m ³ /kWh)	Emissões de CO ₂ (kgCO ₂ /m ³)
Hidrano 10	82	15	5,47	0,160
Hidrano 20	156	30	5,20	0,152
Hidrano 30	254	50	5,08	0,148

Dessa forma, os fatores de emissão total de CO₂ para cada uma das composições de Hidrano são dados pelas emissões oriundas do GNV somadas às emissões oriundas da produção de hidrogênio. Os resultados são apresentados na Tabela 4.35.

Tabela 4.35- Fatores de emissão de CO₂ para o Hidrano

	Emissões de CO ₂ (kgCO ₂ /m ³)			Redução de emissões em relação ao GNV
	Oriundas do GNV	Oriundas da produção de hidrogênio	Totais	
GNV	2,024	0,000	2,024	0,0%
Hidrano 10	1,822	0,160	1,982	2,1%
Hidrano 20	1,620	0,152	1,771	12,5%
Hidrano 30	1,417	0,148	1,565	22,7%

Observa-se que o potencial de redução de emissões de CO₂ é maior para o Hidrano 30 devido ao menor conteúdo de GNV e à melhor eficiência de produção de hidrogênio pelo eletrolisador, atingindo um potencial de redução de emissões de 22,7% em relação ao GNV. O Hidrano 10 apresenta um resultado menos significativo, com potencial de redução de emissões de CO₂ de apenas 2,1%. O resultado para Hidrano 10 é condizente com os resultados obtidos pela FIAT na Itália (MARIANI *et al.*, 2009; UNICH *et al.*, 2009). Entretanto, há relatos na literatura de uma potencialização da redução de emissões de CO₂ em medições de escape de veículos a Hidrano (GENOVESE *et al.*, 2011), que precisa ser verificada experimentalmente.

Caso a produção eletrolítica de hidrogênio fosse realizada por fontes de energia com emissões ainda menores do que às do SIN, como por exemplo por meio de energia eólica ou

fotovoltaica, cujas emissões são quase nulas, as reduções nas emissões de CO₂ poderiam atingir até 10%, 20% e 30% para o Hidrano 10, 20 e 30, respectivamente, em relação ao GNV.

Considerando o consumo nacional de GNV no ano de 2010, igual a 2.008×10^6 m³ (EPE, 2012), o volume possível de emissões CO₂ evitadas no país é apresentado para cada composição de Hidrano na Tabela 4.36. Caso esta proposta possa ser beneficiada pelo Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) e obter créditos de carbono, as emissões evitadas equivaleriam a créditos entre R\$ 2,265 milhões e R\$ 24,284 milhões, com base na cotação do Euro a R\$ 2,25 (BANCO CENTRAL DO BRASIL, 2010) e das Reduções Certificadas de Emissão (RCEs) a 11,71 €/tCO₂ (INSTITUTO CARBONO BRASIL, 2010) em dezembro de 2010. Os valores dos créditos de carbono também são mostrados na Tabela 4.36.

Tabela 4.36- Potencial de redução de emissões de CO₂ para o Hidrano no Brasil

	Emissões estimadas em 2010 (tCO ₂)	Emissões evitadas em relação ao GNV (tCO ₂)	Valores estimados em créditos de carbono (Milhões R\$)
GNV	4.065.157	0	0,00
Hidrano 10	3.979.172	85.985	2,265
Hidrano 20	3.557.021	508.137	13,388
Hidrano 30	3.143.469	921.688	24,284

O enquadramento dessa proposta de adição de hidrogênio gerado por eletrólise da água ao GNV dentro do MDL, a obtenção dos créditos de carbono, a destinação dos recursos obtidos com os créditos e os possíveis impactos para o custo do Hidrano não fazem parte do escopo desta tese. Entretanto, a avaliação de tais aspectos é de grande interesse para trabalhos futuros.

As emissões de outros gases de efeito estufa não foram contabilizadas neste trabalho, uma vez que essas emissões dependem mais fortemente do processo de combustão, entre outros fatores que não puderam ser avaliados.

4.4.2 Emissões de Poluentes a partir do Uso de Hidrano

As emissões de CO, NO_x e THC são difíceis de serem estimadas sem a avaliação das diferentes composições de Hidrano em veículos reais, especialmente porque a literatura disponível não contém resultados conclusivos e apresenta valores discrepantes, em especial para NO_x e THC.

Com relação às emissões de CO, a literatura revisada indica redução das emissões em até 84% quando comparadas ao GNV. Apenas um único artigo informou incremento das emissões, mas relacionadas ao não ajuste do tempo de ignição do motor em teste. A média de redução das emissões de CO obtida na literatura é de 27%.

A redução nas emissões de CO estão relacionadas ao menor conteúdo de carbono do Hidrano e à extensão do limite de combustão pobre proporcionada pelo hidrogênio, na qual o excesso de ar leva a um processo mais completo de combustão (CEPER, B. A. *et al.*, 2009; KAHRAMAN, N. *et al.*, 2009; MARIANI *et al.*, 2009; UNICH *et al.*, 2009).

As emissões de NO_x e THC apresentam comportamento inversamente proporcional, isto é, reduções nas emissões de THC em geral levam ao incremento das emissões de NO_x ao redor da região de misturas estequiométricas de combustível e ar (Figura 2.14).

Em comparação ao GNV, as emissões de NO_x são em geral superiores para o Hidrano numa mesma razão ar/combustível, ainda que haja relatos na literatura de condições de ajuste de motores nas quais se observa redução das emissões de NO_x. As maiores emissões de NO_x para o Hidrano se devem às maiores temperaturas e à extensão do limite de combustão pobre proporcionadas pela combustão do hidrogênio (BYSVEEN, 2007). Nos casos em que a razão ar/combustível é aumentada a tendência é de que as emissões de NO_x para o GNV e o Hidrano se igualem.

As emissões de THC tendem a ser menores com o aumento do conteúdo de hidrogênio no Hidrano, uma vez que assim há um menor conteúdo de carbono no combustível. Por outro lado, qualquer emissão fugitiva de GNV ou Hidrano podem levar a grandes emissões de THC, uma vez que o gás natural é composto principalmente por metano (CH_4). Quando se consideram os ajustes de motor, misturas com excesso de ar, próximas do limite máximo para a combustão pobre, acarretam falhas de ignição na câmara de combustão que, por sua vez, causam maiores emissões de THC (BOSCH, 2005). Uma vez que o limite de combustão pobre é menor para o GNV do que para o Hidrano, as emissões de THC tendem a ser menores para o Hidrano (BYSVEEN, 2007).

Resultados experimentais são imprescindíveis para referendar as constatações anteriores e, principalmente, para se determinar o impacto quantitativo da proposta da introdução de hidrogênio no GNV no Brasil e seu enquadramento dentro do Proconve.

4.5 Impactos do Hidrano sobre as Concessionárias de Energia Elétrica e Gás

Os impactos da utilização de Hidrano podem ser sentidos especialmente sobre o acréscimo imediato do consumo de energia elétrica e deslocamento do uso de gás natural. Aqui são apresentadas as estimativas de impactos sobre as concessionárias das cidades avaliadas para determinação do preço do Hidrano, Campinas e Rio de Janeiro: CPFL, Light, COMGAS e CEG-Rio. Optou-se por incluir a cidade de São Paulo nesta análise, por conta de sua importância no cenário nacional e, portanto, foram incluídos os impactos sobre as concessionárias dessa cidade, AES Eletropaulo e COMGAS.

4.5.1 Impactos sobre as Concessionárias de Energia Elétrica

As cidades utilizadas como exemplo para determinação dos impactos da proposta de adição de hidrogênio ao GNV, Campinas, São Paulo e Rio de Janeiro, possuem respectivamente 19, 231 e 281 postos de GNV (GASNET, 2011a). Assumindo que todos os postos de GNV dessas cidades passem a oferecer o Hidrano e empregando o consumo elétrico anual de cada sistema de geração de hidrogênio indicado na Tabela 4.12, o incremento do consumo de energia elétrica em cada cidade será o verificado na Tabela 4.37.

Tabela 4.37- Consumo de energia elétrica dos postos de Hidrano para as cidades avaliadas

	Postos de GNV	Hidrano 10 (kWh/ano)	Hidrano 20 (kWh/ano)	Hidrano 30 (kWh/ano)
Campinas	19	10.967.598	20.865.192	30.658.381
São Paulo	231	133.342.902	253.676.808	372.741.369
Rio de Janeiro	281	162.205.002	308.585.208	453.421.319

De acordo com os dados do consumo de energia elétrica total e no setor comercial das cidades avaliadas para o ano de 2010, apresentados na Tabela 4.38, podem ser estimados os incrementos na demanda de energia elétrica para cada uma das concessionárias nessas cidades (Tabela 4.39).

Tabela 4.38- Consumo de energia elétrica total e no setor comercial em 2010

Cidades	Consumo de energia elétrica (kWh/ano)	Consumo de energia elétrica no setor comercial (kWh/ano)
Campinas	2.829.693.637	890.374.970
São Paulo	27.325.839.772	9.187.709.265
Rio de Janeiro	14.511.867.000	5.023.741.000

Fontes: (SÃO PAULO, 2011) e (RIO DE JANEIRO, 2010)

Tabela 4.39- Incremento estimado na demanda de energia elétrica para as concessionárias

	Incremento relativo à demanda total			Incremento relativo à demanda no setor comercial		
	Hidrano 10	Hidrano 20	Hidrano 30	Hidrano 10	Hidrano 20	Hidrano 30
CPFL	0,39%	0,74%	1,08%	1,23%	2,34%	3,44%
AES Eletropaulo	0,49%	0,93%	1,36%	1,45%	2,76%	4,06%
Light	1,12%	2,13%	3,12%	3,23%	6,14%	9,03%

É possível constatar que o Hidrano traz um maior incremento absoluto e relativo na demanda por energia elétrica na cidade do Rio de Janeiro, o que pode ser explicado pela maior quantidade de postos de GNV. Além disso, mesmo o discreto aumento da demanda relativa nas cidades de Campinas e de São Paulo para o Hidrano 10, impactando o setor comercial em pouco mais de 1%, isso pode ser atrativo para as concessionárias de energia elétrica na busca de entrar em um novo mercado que pode trazer mais receitas. Já a Light, poderia se beneficiar mais fortemente através do Hidrano.

O Hidrano permite que as concessionárias de energia elétrica participem diretamente de um novo mercado, o de combustíveis veiculares, com essa proposta de geração do hidrogênio a partir da eletrólise da água. Atualmente, as concessionárias de energia elétrica aguardam a disseminação dos veículos elétricos para entrar nesse mercado. Entretanto, essa estratégia é de longo prazo e ocorrerá, se e somente se, os veículos elétricos tiverem seus preços reduzidos e autonomies aumentadas, o que ainda não foi observado. Através do Hidrano, a entrada das distribuidoras de energia elétrica no mercado de combustíveis pode ocorrer em curto prazo. A infraestrutura para o Hidrano também pode preparar as concessionárias e os postos de abastecimento para a futura introdução de veículos a hidrogênio, uma vez que as infraestruturas são similares.

4.5.2 Impactos sobre as Concessionárias de Gás Natural

As cidades utilizadas como exemplo para determinação dos impactos da proposta de adição de hidrogênio ao GNV apresentaram o perfil de consumo de gás natural exibido na Tabela 4.40. Os dados das cidades de Campinas e São Paulo referem-se ao ano de 2010, enquanto que os dados do município do Rio de Janeiro referem-se ao ano de 2007, uma vez que não há disponibilidade de dados atualizados.

Tabela 4.40- Consumo de gás natural por setor

Cidades	Residencial (m ³ /ano)	Comercial (m ³ /ano)	Industrial (m ³ /ano)	Automotivo (m ³ /ano)	Cogeração/ Termogeração (m ³ /ano)	Total (m ³ /ano)
Campinas	3.095.434	2.373.359	29.588.703	9.596.601	0	44.654.097
São Paulo	142.019.933	82.674.947	338.447.365	160.924.954	288.638.034	1.012.705.233
Rio de Janeiro	110.182.873	71.720.266	1.117.162.656	890.058.239	ND	2.189.124.034

Fontes: (SÃO PAULO, 2011) e (RIO DE JANEIRO, 2007)

A implementação do Hidrano em todos os postos de GNV dessas cidades implicaria numa redução no consumo total de gás natural proporcional ao volume de hidrogênio adicionado ao GNV. A redução percentual para cada composição de Hidrano é apresentada na Tabela 4.41.

Observa-se que uma redução de 10% nas vendas de GNV (Hidrano 10) nas cidades de São Paulo e Campinas implica na redução de 1,59% e 2,15%, respectivamente, no consumo total de gás natural. O impacto não é tão significativo e pode ser rapidamente revertido caso o Hidrano 10 traga vantagens no desempenho ou no impacto ambiental dos veículos, estimulando novas instalações de kits de conversão.

Tabela 4.41- Redução estimada no consumo total de gás natural

Cidades	Hidrano 10	Hidrano 20	Hidrano 30
Campinas	2,15%	4,30%	6,45%
São Paulo	1,59%	3,18%	4,77%
Rio de Janeiro	4,07%	8,13%	12,20%

Na cidade do Rio de Janeiro, o impacto da introdução do Hidrano na venda direta de gás natural é mais significativo. Para o Hidrano 10 a redução no consumo de gás natural atinge 4,07%. Isso se deve principalmente a dois fatores correlacionados: primeiro, o GNV tem maior contribuição no setor de gás natural carioca, conforme apresenta a Figura 4.14, e, segundo, o GNV é mais interessante para o consumidor frente aos outros combustíveis automotivos nessa cidade. Entretanto, o Hidrano 10 é ao mesmo tempo mais promissor no Rio de Janeiro do que nas cidades de Campinas e São Paulo, conforme foi verificado nas outras seções dessa tese. Portanto, a reversão desse impacto sobre as vendas de gás natural podem ocorrer em um prazo menos longo no Rio de Janeiro.

Portanto, a redução de consumo de gás natural no curto prazo deverá impactar as concessionárias Comgas e CEG. Porém, caso o Hidrano traga mais benefícios do que o GNV sem adição de hidrogênio, pode haver uma compensação na redução das vendas de gás natural com aumento no número de conversões de veículos e, conseqüentemente, crescimento do consumo de GNV a médio e longo prazo. Isso pode ser interessante para as concessionárias de gás, principalmente pelo preço de venda do GNV ser superior ao preço de venda de gás natural às indústrias, comércio, residências e termoelétricas.

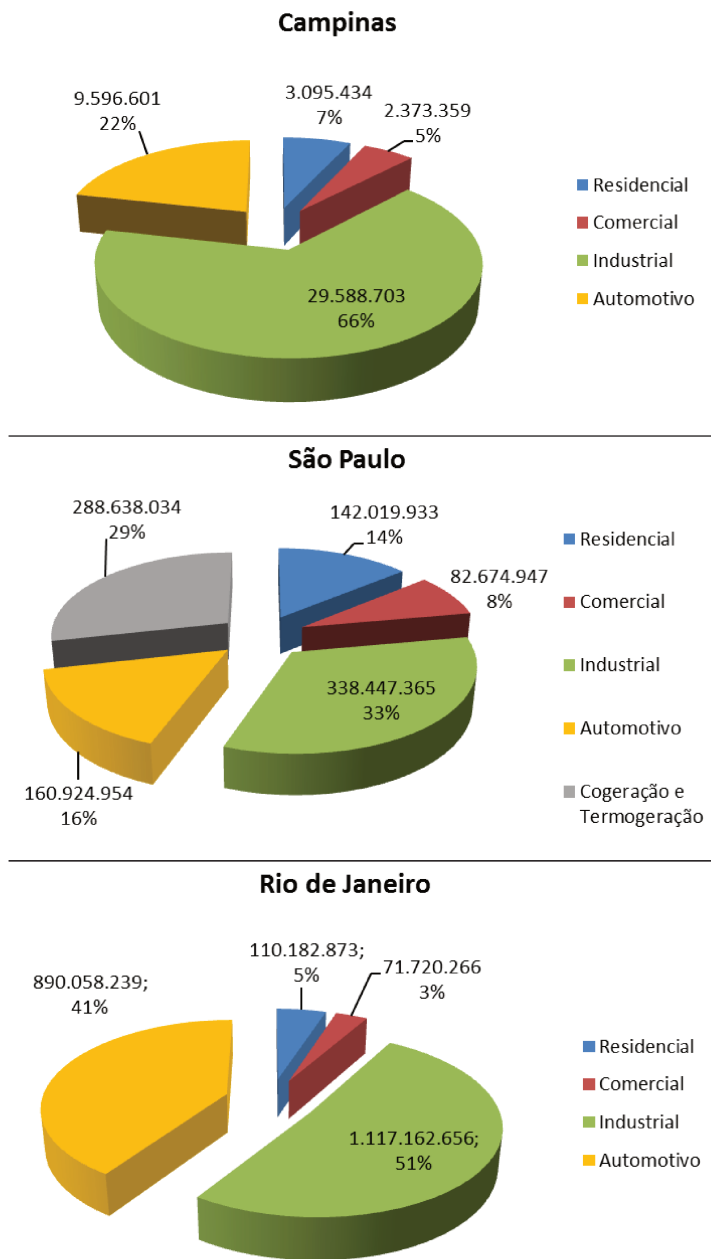


Figura 4.14- Consumo de gás natural por setor em Campinas, São Paulo e Rio de Janeiro

4.6 Impactos do Hidrano sobre a Matriz Energética Nacional

Os impactos da utilização de Hidrano sobre a matriz energética nacional ocorrerão sobre o consumo de energia elétrica e de gás natural, de forma semelhante àqueles verificados sobre as concessionárias. Aqui são apresentados os impactos no caso em que todos os postos de GNV do país passam a oferecer o Hidrano.

Considerando os dados do Balanço Energético Nacional (EPE, 2011b), tem-se que o consumo de GNV no Brasil em 2010 foi de $2.008 \times 10^6 \text{ m}^3$. As quantidades de hidrogênio necessárias para compor as misturas de Hidrano 10, 20 e 30 são equivalentes às reduções no volume consumido de GNV apresentadas na Tabela 4.42. Levando-se em conta que o consumo final de gás natural foi de $19.169 \times 10^6 \text{ m}^3$ e que a importação foi de $12.647 \times 10^6 \text{ m}^3$, observam-se os impactos informados na Tabela 4.42.

Tabela 4.42- Impactos no consumo nacional e na importação de gás natural em 2010

	Hidrano 10	Hidrano 20	Hidrano 30
Redução do consumo de GNV (m^3)	200,8	401,6	602,4
Redução percentual no consumo final de gás natural	1,05%	2,10%	3,14%
Redução percentual na importação de gás natural	1,59%	3,18%	4,76%

As reduções observadas no consumo final de gás natural são pouco significativas, mas podem ser interessantes quando se considera o volume de importações. Infelizmente a modalidade de contrato de importação assumida pelo Brasil, do tipo *take-or-pay*, não permite o aproveitamento dessa vantagem da proposta do Hidrano. De qualquer forma o país pode se tornar um pouco menos dependente das importações de gás.

Com relação aos impactos sobre o consumo de energia elétrica, considerando que havia 1.810 postos de GNV no Brasil em 2010 (GASNET, 2011a) e que cada posto de Hidrano passaria

a ter um consumo de eletricidade equivalente ao apresentado na Tabela 4.12, é possível estimar o aumento do consumo de energia elétrica no país (EPE, 2011b), apresentado na Tabela 4.43. O impacto sobre o consumo total no Brasil é baixo, não sendo superior a 0,7%. Entretanto, ao se comparar o impacto sobre o consumo de energia elétrica no setor de transportes do país, hoje restrito principalmente ao modal ferroviário (metrô e trens elétricos), o incremento varia de 62,8% para o Hidrano 10 até 175,6% para o Hidrano 30, sendo assim muito significativo.

Tabela 4.43- Impactos no consumo nacional de energia elétrica em 2010

	Hidrano 10	Hidrano 20	Hidrano 30
Consumo adicional por posto (kWh)	577.242	1.098.168	1.613.599
Consumo adicional no país (GWh)	1.045	1.988	2.921
Incremento do consumo no país	0,23%	0,44%	0,64%
Incremento do consumo de eletricidade no setor de transportes	62,8%	119,5%	175,6%

Ao se comparar o incremento do consumo de energia elétrica pela proposta do Hidrano no país, observa-se que ele apresenta a mesma ordem de grandeza de a toda a geração eólica no ano de 2010, que foi de 2.177 GWh (EPE, 2011b).

5 CONCLUSÃO

Esta tese abordou as questões referentes à viabilidade técnica e econômica do Hidrano, bem como seus impactos, no contexto do planejamento de sistemas energéticos. De acordo com as análises realizadas, concluiu-se que:

1. O custo do hidrogênio eletrolítico produzido no posto de abastecimento depende principalmente do custo da energia elétrica, cuja contribuição está entre 68% e 80%. O custo de capital, referente ao eletrolisador, vasos de pressão e infraestrutura, contribuem com 17% a 28% para o custo do hidrogênio. Evidentemente, qualquer redução no custo de capital, que deve ser obtida com a nacionalização dos eletrolisadores, trará menores custos ao hidrogênio e, conseqüentemente, ao Hidrano;
2. Do ponto de vista do investidor (posto de combustíveis), a taxa de desconto de 15% ao ano leva a um período de *payback* do investimento inicial no eletrolisador, vasos de pressão e infraestrutura associada de 6,3 anos. O valor praticado para o hidrogênio pode ser maior em alguns casos para os quais a proposta do Hidrano se torna mais atrativa, podendo atingir uma TIR de até 65,4% e *paybacks* inferiores à 2 anos. Entretanto, o preço final do Hidrano será menos atrativo ao consumidor final;
3. O preço do Hidrano ao consumidor, entretanto, depende principalmente do preço de seu maior constituinte, o GNV, vendido na época a 1,308 R\$/m³ no Estado de São Paulo e a 1,662 R\$/m³ no Estado do Rio de Janeiro. O preço do Hidrano ao consumidor varia entre 1,474 e 2,047 R\$/m³, dependendo de sua composição e da região;
4. Em vista de sua competitividade em relação aos outros combustíveis automotivos, o Hidrano 10 apresenta bom potencial de introdução no mercado, inclusive do ponto de vista econômico. Considerando as hipóteses do consumo específico de combustível para o Hidrano 10 em relação ao GNV, a competitividade entre os combustíveis no Estado de São

Paulo é de 0,280 R\$/km para a gasolina, 0,259 R\$/km para o etanol, 0,111 R\$/km para o GNV, 0,129 R\$/km para o Hidrano 10 com tarifação do Grupo B3 e 0,125 R\$/km para o Hidrano 10 com tarifação do Grupo A4 Convencional. No Estado do Rio de Janeiro a competitividade é de 0,300 R\$/km para a gasolina, 0,311 R\$/km para o etanol, 0,141 R\$/km para o GNV, 0,161 R\$/km para o Hidrano 10 com tarifação do Grupo B3 e 0,157 R\$/km para o Hidrano 10 com tarifação do A4 Convencional;

5. A competitividade do Hidrano 20 e o Hidrano 30 é menos atrativa em relação ao GNV, mas ainda é atrativa em relação à gasolina e ao etanol. Possivelmente a introdução do Hidrano 20 e 30 dependerá de políticas de incentivo com viés ambiental e com viés estratégico visando à introdução da economia do hidrogênio no Brasil;

6. A tarifação do Grupo A4 Convencional para a energia elétrica necessária à geração do hidrogênio que compõe o Hidrano torna esse combustível ainda mais promissor, tanto do ponto de vista do posto de abastecimento (investidor), possibilitando a aplicação de taxas internas de retorno do investimento maiores, quanto do ponto de vista do consumidor, em razão da melhor competitividade frente ao GNV, gasolina e etanol;

7. A autonomia de um veículo utilizando Hidrano em relação ao GNV tende a ser reduzida. Tal redução é pouco significativa para o Hidrano 10 (cerca de 3,0%), mas passa a ter implicações negativas para o Hidrano 20 e 30 (entre 7,6% e 14,7%), o que pode desagradar aos motoristas por implicar numa maior frequência de abastecimentos;

8. O Hidrano, cujo hidrogênio é oriundo da eletrólise da água ou de outras fontes renováveis de energia, permite redução de emissões de dióxido de carbono e, portanto, maior aderência do país aos compromissos de redução de emissões de gases de efeito estufa. A redução das emissões de CO₂ em relação ao GNV para Hidrano 10, 20 e 30 são de 2,1%, 12,5% e 22,7% respectivamente, quando é empregada energia elétrica da rede para a produção de hidrogênio. Reduções ainda maiores podem ser obtidas com a utilização de fontes eólicas e fotovoltaicas;

9. As emissões de monóxido de carbono também devem se reduzir para o Hidrano em relação ao GNV. As emissões de NO_x e THC necessitam de maior investigação, mas ao menos a emissão de um desses poluentes deve se reduzir, possivelmente de THC;

10. O Hidrano permite que as concessionárias de energia elétrica entrem no mercado de combustíveis veiculares em curto prazo, sem a necessidade da introdução de veículos elétricos, o que deverá levar um longo prazo, se ocorrer. O incremento das vendas de energia elétrica no setor comercial podem chegar à 9%;

11. O impacto do Hidrano às concessionária de gás natural é negativo num primeiro momento, causando uma retração no consumo de até 12%. Entretanto, as melhorias no desempenho dos veículos utilizando Hidrano podem estimular um maior número de conversões de veículos e, portanto, levar a um aumento no consumo GNV em médio prazo;

12. O Hidrano, ao permitir a introdução diferentes conteúdos de hidrogênio obtido de recursos nacionais, reduz a dependência do gás natural em grande parte ainda importado;

13. Do ponto de vista do planejamento energético, o Hidrano demonstra ser uma boa alternativa para dar vazão a expansão das reservas e produção de gás natural, além de ser muito promissor para se reduzir as emissões de poluentes em grandes cidades.

Finalmente, tendo sido verificada a viabilidade técnica e econômica da utilização de Hidrano em veículos convencionais, comprova-se a tese de que o hidrogênio pode ser imediatamente introduzido no mercado energético brasileiro, como combustível veicular.

5.1 Sugestões para trabalhos futuros

Diversos aspectos não abordados nesta tese merecem maior atenção e podem dar origem a trabalhos futuros. Destacam-se as seguintes sugestões:

- Avaliar uma frota de veículos movidos a Hidrano comparativamente aos outros combustíveis (gasolina, etanol e GNV) considerando parâmetros como consumo de combustível (rendimento e eficiência), emissões de poluentes e gases de efeito estufa, desempenho (potência e torque) e impressões dos usuários;
- Avaliar as emissões com a utilização de Hidrano 10, 20 e 30 à luz do Proconve Fases L-V e L-VI e os possíveis impactos da introdução desse combustível;
- Avaliar a questão da potência instalada nos postos de Hidrano por conta do eletrolisador, verificando se há necessidade de investimento na infraestrutura da rede elétrica e quais seriam os ganhos da concessionária na venda de energia;
- Avaliar a possibilidade de se enquadrar essa proposta dentro do MDL para a obtenção de créditos de carbono, determinando o beneficiário desses créditos e detalhando os impactos para a introdução do Hidrano no mercado de combustíveis;
- Analisar detalhadamente qual seria incidência de mais impostos na revenda de Hidrano (classificação e carga tributária), além dos impostos que já incidem sobre o GNV e sobre os insumos utilizados na produção de hidrogênio;
- Realizar um exame detalhado da compatibilidade de materiais e do desempenho de componentes, em especial o compressor de GNV, uma vez que a proposição de que o Hidrano pode utilizar amplamente a infraestrutura para GNV pode não ser válida para alguns itens. Sabe-se que os cilindros para GNV, fabricados com ligas de aço, cromo e molibdênio permitem grandes porcentagens de hidrogênio. Entretanto, sugere-se a realização de estudos para verificar a compatibilidade de toda a infraestrutura de gás natural para Hidrano e hidrogênio;
- Avaliar a proposta de introdução do Hidrano no mercado e seus impactos quando a produção de hidrogênio é oriunda de outras fontes e processos, como a reforma de etanol;

- Realizar um estudo sobre as possíveis legislações e regulações para a introdução do Hidrano no Brasil (vide legislação da ANP para combustíveis).

6 REFERÊNCIAS

- ABNT. Critérios de projeto, montagem e operação de postos de gás combustível comprimido - Procedimento - ABNT NBR 12236:1994. . 1994.
- AKANSU, S. O.; DULGER, Z.; KAHRAMAN, N.; VEZIROGLU, T. N. Internal combustion engines fueled by natural gas - hydrogen mixtures. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 29, p. 1527-1539, 2004.
- AKANSU, S. O.; KAHRAMAN, N.; CEPER, B. Experimental study on a spark ignition engine fuelled by methane-hydrogen mixtures. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 32, p. 4279-4284, 2007.
- ANFAVEA. **Anuário da Indústria Automobilística Brasileira - 2011**. São Paulo, SP: Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores - ANFAVEA, 2011.
- ANP. Portaria ANP N° 32 de 06/03/2001. Publicada no DOU de 07/03/2001. 2001.
- ANP. Resolução ANP N° 16 de 17/06/2008. Publicado no DOU de 18/06/2008. 2008.
- ANP. Resolução ANP N° 29 de 22/09/2009. Publicada no DOU de 23/09/2009. 2009.
- ANP. **O Gás Natural Liquefeito no Brasil - Experiência da ANP na Implantação dos Projetos de Importação de GNL**. Rio de Janeiro: Agência Nacional do Petróleo Gás Natural e Biocombustíveis, 2010.
- ANP. **Anuário Estatístico Brasileiro do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis**. Rio de Janeiro: Agência Nacional do Petróleo Gás Natural e Biocombustíveis, 2011.
- ANP. **Levantamento de Preços e de Margens de Comercialização de Combustíveis**. Disponível em: <<http://www.anp.gov.br/preco/>>. Acesso em: 16 fev. 2012.
- ASLAM, M. U.; MASJUKI, H. H.; KALAM, M. A. *et al.* An experimental investigation of CNG as an alternative fuel for a retrofitted gasoline vehicle. **Fuel**, v. 85, p. 717-724, 2006.
- ASPENTECH. **Aspen HySys**. Burlington, MA, USA: AspenTech, 2011.
- ASPRO. **Compressores para GNV Aspro**. Disponível em: <<http://www.asprogn.com/productos.php?idProductoTipo=1>>. Acesso em: 15 jan. 2012.

- BAHNEMANN, W. Preço do gás natural sobe amanhã no Estado. **O Estado de São Paulo**, 30 maio 2008.
- BANCO CENTRAL DO BRASIL. **Cotação do Euro em 17/12/2010**. Disponível em: <<http://www4.bcb.gov.br/pec/conversao/conversao.asp>>. Acesso em: 10 maio. 2012.
- BASSI, A. **CNG-Hydrogen Blends Position Paper**. . Prague, Czech Republic: [s.n.]. , 20 maio 2009
- BAUER, C. G.; FOREST, T. W. Effect of hydrogen addition on the performance of methane-fueled vehicles. Part II: driving cycle simulations. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 26, p. 71-90, 2001a.
- BAUER, C. G.; FOREST, T. W. Effect of hydrogen addition on the performance of methane-fueled vehicles. Part I: effect on SI engine performance. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 26, p. 55-70, 2001b.
- BECKER, W. **Comunicação Pessoal com o Sr. William Becker (Linde Gases)**. . [S.l: s.n.]. , 2009
- BELL, S. R.; GUPTA, M. Extension of the lean operating limit for natural gas fueling of a spark ignited engine using hydrogen blending. **Combustion Science and Technology**, v. 123, p. 23-48, 1997.
- BORGES, I. **Estudo de Viabilidade Econômica e Financeira para a Implantação de um Posto de Combustível em Taquara/RS**. Novo Hamburgo, RS: Centro Universitário Feevale, 2006.
- BORSARI, V. **Caracterização das Emissões de Gases de Efeito Estufa por Veículos Automotores Leves no Estado de São Paulo**. São Paulo, SP: USP, 2009.
- BOSCH, R. **Manual de Tecnologia Automotiva**. São Paulo: Editora Edgard Blücher, 2005.
- BOSE, T. K. **Pathway for Hydrogen in Urban Transit System**. Anais do I Encontro Brasileiro de Energia do Hidrogênio. **Anais...** Rio de Janeiro e São Paulo: INT/IPEN. Disponível em: <<http://www.ebeh.int.gov.br/imagens/PDFs/Tapan%20Bose.pdf>>. Acesso em: 6 dez. 2006. , 2006
- BRANDÃO FILHO, J. E. **Previsão de Demanda por Gás Natural Veicular: Uma Modelagem Baseada em Dados de Preferência Declarada e Revelada**. Fortaleza, CE: UFC, 2005.
- BRANDIMARTI, R. Reajuste no preço do gás gera reclamações de taxistas em SP. **Folha de São Paulo - Folha.com**, p. <http://www1.folha.uol.com.br/folha/dinheiro/ult91u482906.shtml>, 24 dez 2008.

BRITO, A. Gás natural “encalha”, e estímulo ao uso do produto em automóveis pode voltar. **Folha de São Paulo - Folha.com**, p. <http://www1.folha.uol.com.br/folha/dinheiro/ult91u542333.shtml>, 29 mar 2009.

BYSVEEN, M. Engine characteristics of emissions and performance using mixtures of natural gas and hydrogen. **Energy**, v. 32, p. 482-489, 2007.

CEDAE. **Tarifas de Água e Esgoto CEDAE**. Disponível em: http://www.cedae.com.br/div/DO_30_06_2010_PAG_23_24.pdf. Acesso em: 20 mar. 2012.

CEPER, B. A.; AKANSU, S. O.; KAHRAMAN, N. Investigation of cylinder pressure for H₂/CH₄ mixtures at different loads. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 34, p. 4855-4861, 2009.

COMGAS. **A Composição do Gás Natural**. Disponível em: http://www.comgas.com.br/conheca_gasnatural/conheca/composicao.asp. Acesso em: 9 nov. 2011.

Consumo de gás cresce no país e eleva risco ao abastecimento. **Folha de São Paulo - Folha.com**, p. <http://www1.folha.uol.com.br/folha/dinheiro/ult91u361574.shtml>, 9 jan 2008.

CPFL. **Tarifas de Energia Elétrica CPFL**. Disponível em: <http://www.cpfl.com.br/Informacedilotildees/TaxaseTarifas/tabid/206/Default.aspx>. Acesso em: 20 mar. 2012.

Cronologia da crise na Bolívia. **Abril.com**, 9 dez 2008.

DIMOPOULOS, P.; BACH, C.; SOLTIC, P.; BOULOCHOS, K. Hydrogen-natural gas blends fuelling passenger car engines: Combustion, emissions and well-to-wheels assessment. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 33, p. 7224-7236, 2008.

DIMOPOULOS, P.; RECHSTEINER, C.; SOLTIC, P.; LAEMMLE, C.; BOULOCHOS, K. Increase of passenger car engine efficiency with low engine-out emissions using hydrogen-natural gas mixtures: A thermodynamic analysis. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 32, p. 3073-3083, 2007.

DONDERO, L.; GOLDEMBERG, J. Environmental implications of converting light gas vehicles: the Brazilian experience. **Energy Policy**, v. 33, p. 1703-1708, 2005.

DRAGONI, M. **Primeira Comunicação Pessoal com Sr. Mario Dragoni (Empresa H2Nitidor)**. . [S.l: s.n.]. , 15 abr 2012a

DRAGONI, M. **Segunda Comunicação Pessoal com Sr. Mario Dragoni (Empresa H2Nitidor)**. . [S.l: s.n.]. , 2 jun 2012b

- DUFOUR, J.-C. L. **Comunicação Pessoal com o Sr. Jean-Claude Louis Dufour (Empresa Engetank)**. . [S.l: s.n.]. , 3 maio 2012
- ELT ELEKTROLYSE TECHNIK. **Pressure Electrolyser Based on the LURGI System**. Disponível em: <<http://www.elektrolyse.de/vkp/modules.php?name=Content&pa=showpage&pid=3>>. Acesso em: 2 maio. 2012.
- EPE. **Plano Nacional de Energia 2030**. Brasília: Ministério de Minas e Energia - Empresa de Pesquisa Energética, 2007. v. 2
- EPE. **Plano Decenal de Expansão de Energia 2020**. Brasília: Ministério de Minas e Energia - Empresa de Pesquisa Energética, 2011a.
- EPE. **Balanco Energético Nacional 2011: Ano Base 2010**. Rio de Janeiro: Empresa de Pesquisa Energética - EPE, 2011b.
- EPE. **Balanco Energético Nacional 2012: Resultados Preliminares Ano Base 2011**. Rio de Janeiro: Empresa de Pesquisa Energética - EPE, 2012.
- FECOMBUSTÍVEIS. **Relatório Anual da Revenda de Combustíveis 2011**. . Rio de Janeiro: Federação Nacional do Comércio de Combustíveis e de Lubrificantes - Fecombustíveis. Disponível em: <<http://www.fecombustiveis.org.br/relatorio2011>>. , 2011
- FERNANDES, C. S. **Análise Estatística das Emissões de CO e HC Produzidas por Gases da Exaustão Veicular Oriundos de Gasolina, GNV e Mistura Álcool/Gasolina**. Natal, RN: UFRN, 2009.
- FERREIRA, A. L. M. **A Tributação do Gás Natural e GNV**. . São Paulo, SP: [s.n.]. , 2007
- FERREIRA, P. F. P. **Infraestrutura para Uso Energético do Hidrogênio: Estações de Abastecimento para Veículos com Células a Combustível**. Campinas, SP: Universidade Estadual de Campinas, 2007.
- FURLAN, A. L. **Análise Técnica e Econômica do Uso do Hidrogênio como Meio Armazenador de Energia Elétrica Proveniente de Fontes Eólicas**. Campinas, SP: Universidade Estadual de Campinas, 2012.
- GASNET. **O sedã boa praça**. Disponível em: <<http://www.gasnet.com.br/conteudo/616>>. Acesso em: 5 maio. 2012.
- GASNET. **Postos de GNV**. Disponível em: <http://www.gasnet.com.br/novo_postos_gnv.asp>. Acesso em: 15 dez. 2011a.

- GASNET. GNV - Índices GNV - Índice do Crescimento da Frota e Conversões Anuais. Disponível em: <<http://www.gasnet.com.br/conteudo/12970>>. Acesso em: 15 dez. 2011b.
- GASNET. Procura por gás natural veicular volta a crescer em São Paulo: em 2011, aumento no consumo foi de 23%. Disponível em: <<http://www.gasnet.com.br/conteudo/13854>>. Acesso em: 2 maio. 2012.
- GÁSPOINT. Preço de conversão de veículos para GNV - kit de 5a. geração. Disponível em: <<http://gaspoint.com.br/gnv/promocaoMatematica.asp>>. Acesso em: 1 maio. 2012.
- GENOVESE, A.; CONTRISCIANI, N.; ORTENZI, F.; CAZZOLA, V. On road experimental tests of hydrogen/natural gas blends on transit buses. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 36, p. 1775-1783, 2011.
- GOSMANN, H. L. **Gás Natural no Brasil: Política e Projeções de Aumento da Oferta**. . NIPE/Unicamp: [s.n.], 2010
- HOEKSTRA, R. L.; COLLIER, K.; MULLIGAN, N. **Demonstration of Hydrogen Mixed Gas Vehicles**. Proceedings of the 10th World Hydrogen Energy Conference. **Anais...** Cocoa Beach, Florida, U.S.A.: INTERNATIONAL ASSOCIATION FOR HYDROGEN ENERGY, 1994
- HOEKSTRA, R. L.; COLLIER, K.; MULLIGAN, N.; CHEW, L. Experimental study of a clean burning vehicle fuel. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 20, p. 737-745, 1995.
- HU, E. J.; HUANG, Z. H.; LIU, B.; ZHENG, J. J.; GU, X. L. *et al.* Experimental investigation on performance and emissions of a spark-ignition engine fuelled with natural gas-hydrogen blends combined with EGR. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 34, p. 528-539, 2009.
- HU, E. J.; HUANG, Z. H.; LIU, B.; ZHENG, J. J.; GU, X. L. Experimental study on combustion characteristics of a spark-ignition engine fueled with natural gas-hydrogen blends combining with EGR. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 34, p. 1035-1044, 2009.
- HUANG, B.; HU, E. J.; HUANG, Z. H. *et al.* Cycle-by-cycle variations in a spark ignition engine fueled with natural gas-hydrogen blends combined with EGR. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 34, p. 8405-8414, 2009.
- HUANG, Z. H.; LIU, B.; ZENG, K. *et al.* Experimental study on engine performance and emissions for an engine fueled with natural gas-hydrogen mixtures. **Energy & Fuels**, v. 20, p. 2131-2136, 2006.
- HUANG, Z. H.; LIU, B.; ZENG, K. *et al.* Combustion characteristics and heat release analysis of a spark-ignited engine fueled with natural gas-hydrogen blends. **Energy & Fuels**, v. 21, p. 2594-2599, 2007.

- HUANG, Z. H.; WANG, J. H.; LIU, B. *et al.* Combustion characteristics of a direct-injection engine fueled with natural gas-hydrogen blends under various injection timings. **Energy & Fuels**, v. 20, p. 1498-1504, 2006.
- HUANG, Z. H.; WANG, J. H.; LIU, B. *et al.* Combustion characteristics of a direct-injection engine fueled with natural gas-hydrogen blends under different ignition timings. **Fuel**, v. 86, p. 381-387, 2007.
- HYDROGEN CONSULTANTS INC.; EDEN INNOVATIONS LTD. **Hythane**. . USA: [s.n]. Disponível em: <<http://tess2.uspto.gov/bin/showfield?f=doc&state=4009:kdd7v2.2.3>>. , 1991
- HYTHANE COMPANY. **Hythane Fuel History**. Disponível em: <<http://hythane.net/hythane-fuel/hythane-fuel-history/>>.
- IBAMA. **Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores - Proconve/Promot - Vol. I**. 2^a. ed. Brasília, DF: Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis - IBAMA, 2004. v. I
- INSTITUTO CARBONO BRASIL. **O Mercado de Carbono entre 13 e 17 de dezembro de 2010**. Disponível em: <http://www.institutocarbonobrasil.org.br/analise_financeira/noticia=726656>. Acesso em: 10 maio. 2012.
- IPCC. **2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories - Vol. 2: Energy - Chapter 3: Mobile Combustion**. Japan: Institute for Global Environmental Strategies (IGES), 2006. v. 2
- IVY, J. **Summary of Electrolytic Hydrogen Production: Milestone Completion Report**. . Golden, Colorado, USA: National Renewable Energy Laboratory (NREL). Disponível em: <www.nrel.gov/hydrogen/pdfs/36734.pdf>. Acesso em: 7 ago. 2008. , 2004
- JAHIRUL, M. I.; MASJUKI, H. H.; SAIDUR, R. *et al.* Comparative engine performance and emission analysis of CNG and gasoline in a retrofitted car engine. **Applied Thermal Engineering**, v. 30, p. 2219-2226, 2010.
- JEONG, C.; KIM, T.; LEE, K.; SONG, S.; CHUN, K. M. Generating efficiency and emissions of a spark-ignition gas engine generator fuelled with biogas-hydrogen blends. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 34, p. 9620-9627, 2009.
- JUNIOR, C.; SOARES, P. Preço do GNV dispara e já supera o do álcool. **Folha de São Paulo - Folha.com**, p. <http://www1.folha.uol.com.br/folha/dinheiro/ult91u435650.shtml>, 20 ago 2008.

- KAHRAMAN, E.; OZCANLI, S. C.; OZERDEM, B. An experimental study on performance and emission characteristics of a hydrogen fuelled spark ignition engine. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 32, p. 2066-2072, 2007.
- KAHRAMAN, N.; CEPER, B.; AKANSU, S. O.; AYDIN, K. Investigation of combustion characteristics and emissions in a spark-ignition engine fuelled with natural gas-hydrogen blends. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 34, p. 1026-1034, 2009.
- KARIM, G. A.; WIERZBA, I.; ALALOUSHI, Y. Methane-hydrogen mixtures as fuels. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 21, p. 625-631, 1996.
- KARNER, D.; FRANCFORT, J. **Hydrogen/CNG Blended Fuels Performance Testing in a Ford F-150**. . Idaho Falls, Idaho: Idaho National Engineering and Environmental Laboratory - Transportation Technology and Infrastructure Department. , 2003
- LAGE, J. Políticas expansionistas para o uso de gás natural só a partir de 2010, diz Tolmasquim. **Folha de São Paulo - Folha.com**, p. <http://www1.folha.uol.com.br/folha/dinheiro/ult91u342039.shtml>, 2 nov 2007.
- LEE, S. W.; LEE, H. S.; PARK, Y. J.; CHO, Y. S. Combustion and emission characteristics of HCNG in a constant volume chamber. **Journal of Mechanical Science and Technology**, v. 25, p. 489-494, 2011.
- LEWIS, B.; ELBE, G. V. **Combustion, flames and explosions of gases**. [S.l.]: Academic Press, 1987.
- LIGHT. **Tarifas de Energia Elétrica Light**. Disponível em: <http://www.light.com.br/web/institucional/atendimento/informacoes/tarifas/tetarifas.asp?mid=868794297227722772287226>. Acesso em: 20 mar. 2012.
- LIU, B.; HUANG, Z. H.; ZENG, K. *et al.* Experimental study on emissions of a spark-ignition engine fueled with natural gas-hydrogen blends. **Energy & Fuels**, v. 22, p. 273-277, 2008.
- LYNCH, F.; FULTON, J. **Advanced Hydrogen/Methane Utilization Technology Demonstration - Final Report**. . Golden, CO, USA: National Renewable Energy Laboratory. , 1994
- MA, F. H.; DING, S. F.; WANG, Y. F. *et al.* Performance and Emission Characteristics of a Spark-Ignition (SI) Hydrogen-Enriched Compressed Natural Gas (HCNG) Engine Under Various Operating Conditions Including Idle Conditions. **Energy & Fuels**, v. 23, p. 3113-3118, 2009.
- MA, F. H.; LIU, H. Q.; WANG, Y. *et al.* Combustion and emission characteristics of a port-injection HCNG engine under various ignition timings. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 33, p. 816-822, 2008.

- MA, F. H.; WANG, J. J.; WANG, Y.; WANG, Y. F.; LI, Y. *et al.* Influence of different volume percent hydrogen/natural gas mixtures on idle performance of a CNG engine. **Energy & Fuels**, v. 22, p. 1880-1887, 2008.
- MA, F. H.; WANG, J. J.; WANG, Y.; WANG, Y. F.; ZHONG, Z. Q. *et al.* An investigation of optimum control of a spark ignition engine fueled by NG and hydrogen mixtures. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 33, p. 7592-7606, 2008.
- MA, F. H.; WANG, M. Y.; JIANG, L.; CHEN, R. Z. *et al.* Performance and emission characteristics of a turbocharged CNG engine fueled by hydrogen-enriched compressed natural gas with high hydrogen ratio. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 35, p. 6438-6447, 2010.
- MA, F. H.; WANG, M. Y.; JIANG, L.; DENG, J. A. *et al.* Performance and emission characteristics of a turbocharged spark-ignition hydrogen-enriched compressed natural gas engine under wide open throttle operating conditions. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 35, p. 12502-12509, 2010.
- MA, F. H.; WANG, Y. Study on the extension of lean operation limit through hydrogen enrichment in a natural gas spark-ignition engine. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 33, p. 1416-1424, 2008.
- MA, F. H.; WANG, Y. F.; DING, S. F.; JIANG, L. Twenty percent hydrogen-enriched natural gas transient performance research. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 34, p. 6523-6531, 2009.
- MA, F. H.; WANG, Y.; LIU, H. Q. *et al.* Experimental study on thermal efficiency and emission characteristics of a lean burn hydrogen enriched natural gas engine. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 32, p. 5067-5075, 2007.
- MA, F. H.; WANG, Y.; WANG, J. J. *et al.* Effects of combustion phasing, combustion duration, and their cyclic variations on spark-ignition (SI) engine efficiency. **Energy & Fuels**, v. 22, p. 3022-3028, 2008.
- MARIANI, A. **Comunicação Pessoal com Dr. Antonio Mariani (Istituto Motori)**. . [S.l: s.n.]. , 2 ago 2012
- MARIANI, A.; UNICH, A.; MORRONE, B. **The Impact of Natural Gas-Hydrogen Blends on Internal Combustion Engines Performance and Emissions**. Giornate Scientifiche di Ateneo 2009. **Anais...** Napoli: Seconda Università degli Studi di Napoli. , 2009
- MARTINEZ, P.; DAWIDOWSKI, L.; GOMEZ, D.; PASQUEVICH, D. Life cycle greenhouse emissions of compressed natural gas-hydrogen mixtures for transportation in Argentina. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 35, p. 5793-5798, 2010.

- MASS, P. R. DE Q. **Plano de Negócio de um Posto de Combustíveis em Navegantes-SC.** Itajaí, SC: Universidade do Vale do Itajaí, 2009.
- MCTI. **Fatores de Emissão de CO₂ pela Geração de Energia Elétrica no Sistema Interligado Nacional do Brasil.** Disponível em: <<http://www.mct.gov.br/index.php/content/view/321144.html#ancora>>. Acesso em: 9 maio. 2012.
- MILLER, M. **Hydrogen Enriched Natural Gas Technology.** Anais do I Encontro Brasileiro de Energia do Hidrogênio. **Anais...** Rio de Janeiro e São Paulo: INT/IPEN. Disponível em: <<http://www.ebeh.int.gov.br/imagens/PDFs/Marshall%20Miller2.pdf>>. Acesso em: 6 dez. 2012. , 2006
- MME. **Boletim Mensal de Acompanhamento da Indústria de Gás Natural.** . Brasília - DF: Ministério de Minas e Energia - Secretaria de Petróleo, Gás Natural e Combustíveis Renováveis - Departamento de Gás Natural. , 2011
- MOHAMMED, S. E. L.; BAHAROM, M. B.; AZIZ, A. R. A. Analysis of engine characteristics and emissions fueled by in-situ mixing of small amount of hydrogen in CNG. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 36, p. 4029-4037, 2011.
- MOHAMMED, S. E. L.; BAHAROM, M. B.; AZIZ, A. R. A.; FIRMANSYAH, (PRIMEIRO). The effects of fuel-injection timing at medium injection pressure on the engine characteristics and emissions of a CNG-DI engine fueled by a small amount of hydrogen in CNG. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 36, p. 11997-12006, 2011.
- MORRONE, B.; UNICH, A. Numerical investigation on the effects of natural gas and hydrogen blends on engine combustion. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 34, n. 10, p. 4626-4634, maio 2009.
- NAGALINGAM, B.; DUEBEL, F.; SCHMILLEN, K. Performance study using natural-gas, hydrogen-supplemented natural-gas and hydrogen in AVL research engine. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 8, p. 715-720, 1983.
- NATIONAL RESEARCH COUNCIL. **The Hydrogen Economy: Opportunities, Costs, Barriers, and R&D Needs.** Washington D.C.: National Academies Press, 2004.
- NGVA EUROPE. **Worldwide NGVs & Refuelling Stations.** Disponível em: <http://www.ngvaeurope.eu/members/CRC/5._Worldwide_NGVs_and_stations_Dec_2011.xls>. Acesso em: 24 fev. 2012.
- OLIVEIRA, E. **Comunicação Pessoal com o Sr. Edmilson de Oliveira (Empresa Cilbras).** . [S.l: s.n.], , 2 maio 2012

- OLIVEIRA, U. A. F. **Primeira Comunicação Pessoal com Sr. Ulisses A. F. Oliveira (Empresa Ipiranga)**. . [S.l: s.n.]. , 1 out 2011
- OLIVEIRA, U. A. F. **Segunda Comunicação Pessoal com Sr. Ulisses A. F. Oliveira (Empresa Ipiranga)**. . [S.l: s.n.]. , 20 mar 2012
- ORTENZI, F.; CHIESA, M.; SCARCELLI, R.; PEDE, G. **Experimental tests of blends of hydrogen and natural gas in light-duty vehicles**. . [S.l: s.n.]. , 2008
- OZCAN, H. Hydrogen enrichment effects on the second law analysis of a lean burn natural gas engine. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 35, p. 1443-1452, 2010.
- PARK, C.; KIM, C.; CHOI, Y.; WON, S.; MORIYOSHI, Y. The influences of hydrogen on the performance and emission characteristics of a heavy duty natural gas engine. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 36, p. 3739-3745, 2011.
- PARK, J.; CHA, H.; SONG, S.; CHUN, K. M. A numerical study of a methane-fueled gas engine generator with addition of hydrogen using cycle simulation and DOE method. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 36, p. 5153-5162, 2011.
- PELLIZA, G. **Análise de Veículos Convertidos para o Uso do Combustível Gás Natural**. Porto Alegre, RS: UFRGS, 2003.
- PETROBRAS. N-1704-C: Requisitos Adicionais para Vaso de Pressão em Serviço com Hidrogênio. . set. 2007.
- PINTO, C. S.; SILVA, E. P.; NEVES JR., N. P.; MIGUEL, M.; VILLASBOA, J. W. B. **Itaipu Hydroelectric Power Plant and Its Experimental Hydrogen Production Unity**. Proceedings of ECOS2009. **Anais...** Foz do Iguaçu, PR, Brazil: Associação Brasileira de Engenharia e Ciências Mecânicas - ABCM, Rio de Janeiro. , 2009
- RAMAN, V.; HANSEL, J.; FULTON, J.; LYNCH, F.; BRUDERLY, D. **Hythane - An Ultra Clean Transportation Fuel**. Proceedings of the 10th World Hydrogen Energy Conference. **Anais...** Cocoa Beach, Florida, U.S.A.: INTERNATIONAL ASSOCIATION FOR HYDROGEN ENERGY. , 1994
- RIBEIRO, A. P. Ministra diz que gás deve ser usado na indústria, não em carros. **Folha de São Paulo - Folha.com**, p. <http://www1.folha.uol.com.br/folha/dinheiro/ult91u356035.shtml>, 18 dez 2007.
- RIO DE JANEIRO. **Consumo de gás canalizado e média, segundo a classe de consumo - Município do Rio de Janeiro - 1985-2007**. Disponível em: <http://www.armazemdedados.rio.rj.gov.br/arquivos/1487_consumo%20anual%20de%20g%C3%A1s_1985_2007.XLS>. Acesso em: 2 jun. 2012.

- RIO DE JANEIRO. **Consumo mensal de energia elétrica, segundo classe de serviço - Município do Rio de Janeiro - 2002-2010**. Disponível em: <http://www.armazemdedados.rio.rj.gov.br/arquivos/1686_energ_elet_consumo_mensal_02_10.XLS>. Acesso em: 18 maio. 2012.
- RODRIGUES, D. **O Mercado de Gás Natural Veicular em Curitiba: Visão dos Taxistas**. Porto Alegre, RS: UFRGS, 2005.
- RODRIGUES, L. Ministro desaconselha conversão de carro para gás. **Folha de São Paulo - Folha.com**, p. <http://www1.folha.uol.com.br/folha/dinheiro/ult91u343567.shtml>, 7 nov 2007a.
- RODRIGUES, L. Governo quer que Estados derrubem incentivos ao gás, diz Hubner. **Folha de São Paulo - Folha.com**, p. <http://www1.folha.uol.com.br/folha/dinheiro/ult91u347019.shtml>, 20 nov 2007b.
- RUTH, M.; RAMSDEN, T. **Production Case Studies: Current Forecourt Hydrogen Production from Grid Electrolysis 1500 kg per day version 3.0**. , Systems Analysis - DOE H2A Analysis - Production. USA: National Renewable Energy Laboratory (NREL). Disponível em: <http://www.hydrogen.energy.gov/h2a_prod_studies.html>. Acesso em: 26 abr. 2012. , 2012
- RUTZ, D.; JANSSEN, R. **BioFuel Technology Handbook**. München, Germany: WIP Renewable Energies, 2007.
- SANASA. **Tarifas de Água e Esgoto SANASA**. Disponível em: <<http://www.sanasa.com.br/document/noticias/1076.pdf>>. Acesso em: 20 mar. 2012.
- SANTOS, E. M. D. **Gás Natural: Estratégias para uma Energia Nova no Brasil**. Rio de Janeiro: Annablume, 2002.
- SÃO PAULO. **Anuário Estatístico de Energéticos por Município no Estado de São Paulo 2010**. São Paulo, SP: [s.n.], 2011.
- SAUER, I. L. **Programa de Massificação do Uso do Gás Natural**. Anais do IV Congresso Brasileiro de Planejamento Energético. **Anais...** Itajubá, MG: UNIFEI/SBPE. Disponível em: <<http://www.iee.usp.br/biblioteca/producao/2004/Trabalhos/Sauer.pdf>>. Acesso em: 5 mar. 2012. , 26 mar 2004
- SEBRAE. **Posto de Gasolina e Álcool**. , Série Perfil de Projetos. Vitória, ES: SEBRAE/ES. Disponível em: <[http://www.biblioteca.sebrae.com.br/bds/BDS.nsf/299263699DF2A13103256E5B0045C7BF/\\$File/NT000020CE.pdf](http://www.biblioteca.sebrae.com.br/bds/BDS.nsf/299263699DF2A13103256E5B0045C7BF/$File/NT000020CE.pdf)>. Acesso em: 1 mar. 2012. , 1999

- SHRESTHA, S. O. B.; KARIM, G. A. Hydrogen as an additive to methane for spark ignition engine applications. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 24, p. 577-586, 1999.
- SIERENS, R.; ROSSEEL, E. Variable composition hydrogen/natural gas mixtures for increased engine efficiency and decreased emissions. **Journal of Engineering for Gas Turbines and Power-Transactions of the Asme**, v. 122, p. 135-140, 2000.
- SILVA, L. M. DA. Cláusulas “Take-or-Pay” em Contratos de Gás. **Valor Econômico**, 3 fev 2005.
- SILVEIRA, C. L. DA. **Comunicação Pessoal com o Sr. Carlos Lino da Silveira (Empresa Comaf)**. . [S.l: s.n.]. , 24 maio 2012
- THURNHEER, T.; SOLTIC, P.; EGGENSCHWILER, P. D. SI engine fuelled with gasoline, methane and methane/hydrogen blends: Heat release and loss analysis. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 34, p. 2494-2503, 2009.
- TI IDEAL. **Alíquotas do ICMS nos Estados Brasileiros**. Disponível em: <<http://www.idealsoftwares.com.br/tabelas/aliquotasicms.html>>. Acesso em: 23 fev. 2012.
- UNICH, A.; MORRONE, B.; MARIANI, A.; PRATI, M. V. **The Impact of Natural Gas-Hydrogen Blends on Internal Combustion Engines Performance and Emissions**. 9th International Conference on Engines and Vehicles Technical Papers. **Anais...** Naples, Italy: SAE International. , 2009
- VALIANTE, D. **Análise de Viabilidade Técnica, Econômica, Ambiental e Mercadológica da Instalação Original de Fábrica de Sistema de Conversão para Uso de Gás Natural em Veículos Leves Movidos a Gasolina e/ou Álcool**. São Paulo, SP: USP, 2006.
- WALLACE, J. S.; CATELLAN, A. I. **Hythane and CNG Fuelled Engine Exhaust Emission Comparison**. Proceedings of the 10th World Hydrogen Energy Conference. **Anais...** Cocoa Beach, Florida, U.S.A.: INTERNATIONAL ASSOCIATION FOR HYDROGEN ENERGY. , 1994
- WANG, J. H.; CHEN, H.; LIU, B.; HUANG, Z. H. Study of cycle-by-cycle variations of a spark ignition engine fueled with natural gas-hydrogen blends. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 33, p. 4876-4883, 2008.
- WANG, J. H.; HUANG, Z. H.; FANG, Y. *et al.* Combustion behaviors of a direct-injection engine operating on various fractions of natural gas-hydrogen blends. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 32, p. 3555-3564, 2007.
- WANG, J. H.; HUANG, Z. H.; MIAO, H. Y.; WANG, X. B.; JIANG, D. M. Characteristics of direct injection combustion fuelled by natural gas-hydrogen mixtures using a constant no volume vessel. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 33, p. 1947-1956, 2008a.

- WANG, J. H.; HUANG, Z. H.; MIAO, H. Y.; WANG, X. B.; JIANG, D. M. Study of cyclic variations of direct-injection combustion fueled with natural gas-hydrogen blends using a constant volume vessel. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 33, p. 7580-7591, 2008b.
- WANG, J. H.; HUANG, Z. H.; ZHENG, J. J.; MIAO, H. Y. Effect of partially premixed and hydrogen addition on natural gas direct-injection lean combustion. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 34, p. 9239-9247, 2009.
- WHITE MARTINS. **Gás Natural Comprimido (GNC): A Alternativa Inteligente de Energia**. Rio de Janeiro, RJ: [s.n.], 2012.
- WRIGHT, S.; PINKELMAN, A. Natural gas internal combustion engine hybrid passenger vehicle. **International Journal of Energy Research**, v. 32, p. 612-622, 2008.
- XU, J.; ZHANG, X.; LIU, J. H.; FAN, L. F. Experimental study of a single-cylinder engine fueled with natural gas-hydrogen mixtures. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 35, p. 2909-2914, 2010.
- ZHANG, C. H.; XIE, Y. L.; WANG, F. S. *et al.* Emission comparison of light-duty in-use flexible-fuel vehicles fuelled with gasoline and compressed natural gas based on the ECE 15 driving cycle. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part D-Journal of Automobile Engineering**, v. 225, p. 90-98, 2011.

APÊNDICE A

Planilha utilizada para a determinação da capacidade de produção de hidrogênio pelo eletrolisador e da quantidade de hidrogênio armazenado, de hora em hora, em um posto de Hidrano 10. Dados baseados no perfil de vendas de GNV de um posto de abastecimento de porte médio ao longo de abril de 2011 (ver rotina e fluxograma da página 42, Figura 3.2).

Hidrano10 - H2	Eletrolisador (m ³ /h)	15	Reservatório H2 (m ³)	130		
	Hora i	DHi	NRHi	Saldo	PHi	NRHf
sexta-feira 01/04/2011	0	0,00	130,00	130,00	0,00	130,00
	1	4,47	130,00	125,53	4,47	130,00
	2	2,97	130,00	127,03	2,97	130,00
	3	1,13	130,00	128,87	1,13	130,00
	4	1,13	130,00	128,87	1,13	130,00
	5	0,65	130,00	129,35	0,65	130,00
	6	6,38	130,00	123,62	6,38	130,00
	7	8,07	130,00	121,93	8,07	130,00
	8	18,80	130,00	111,20	15,00	126,20
	9	18,05	126,20	108,15	15,00	123,15
	10	29,63	123,15	93,52	15,00	108,52
	11	19,84	108,52	88,67	15,00	103,67
	12	14,93	103,67	88,74	15,00	103,74
	13	7,73	103,74	96,01	15,00	111,01
	14	12,54	111,01	98,46	15,00	113,46
	15	14,35	113,46	99,11	15,00	114,11
	16	18,42	114,11	95,69	15,00	110,69
	17	25,14	110,69	85,55	15,00	100,55
	18	24,65	100,55	75,90	15,00	90,90
	19	19,71	90,90	71,19	15,00	86,19
	20	28,34	86,19	57,85	15,00	72,85
	21	20,83	72,85	52,02	15,00	67,02
	22	19,56	67,02	47,46	15,00	62,46
23	10,83	62,46	51,63	15,00	66,63	
sábado 02/04/2011	0	8,01	66,63	58,62	15,00	73,62
	1	1,91	73,62	71,72	15,00	86,72
	2	4,36	86,72	82,36	15,00	97,36
	3	0,69	97,36	96,67	15,00	111,67
	4	0,52	111,67	111,15	15,00	126,15
	5	1,90	126,15	124,25	5,75	130,00
	6	1,90	130,00	128,10	1,90	130,00
	7	8,94	130,00	121,06	8,94	130,00
	8	14,09	130,00	115,92	14,09	130,00
	9	19,57	130,00	110,44	15,00	125,44
	10	19,36	125,44	106,08	15,00	121,08
	11	19,62	121,08	101,46	15,00	116,46
	12	19,67	116,46	96,79	15,00	111,79
	13	18,87	111,79	92,92	15,00	107,92
	14	13,96	107,92	93,96	15,00	108,96
	15	15,50	108,96	93,46	15,00	108,46
	16	19,12	108,46	89,34	15,00	104,34
	17	13,46	104,34	90,89	15,00	105,89
	18	17,26	105,89	88,62	15,00	103,62
	19	13,36	103,62	90,27	15,00	105,27
20	25,62	105,27	79,65	15,00	94,65	

	21	11,56	94,65	83,08	15,00	98,08
	22	11,09	98,08	87,00	15,00	102,00
	23	16,97	102,00	85,02	15,00	100,02
domingo 03/04/2011	0	10,63	100,02	89,40	15,00	104,40
	1	1,56	104,40	102,84	15,00	117,84
	2	5,15	117,84	112,69	15,00	127,69
	3	3,17	127,69	124,52	5,48	130,00
	4	2,52	130,00	127,48	2,52	130,00
	5	1,84	130,00	128,16	1,84	130,00
	6	1,45	130,00	128,55	1,45	130,00
	7	6,23	130,00	123,78	6,22	130,00
	8	3,23	130,00	126,77	3,23	130,00
	9	8,65	130,00	121,35	8,65	130,00
	10	18,77	130,00	111,23	15,00	126,23
	11	15,36	126,23	110,87	15,00	125,87
	12	13,86	125,87	112,01	15,00	127,01
	13	16,44	127,01	110,58	15,00	125,58
	14	19,89	125,58	105,69	15,00	120,69
	15	12,61	120,69	108,09	15,00	123,09
	16	17,38	123,09	105,71	15,00	120,71
	17	9,12	120,71	111,58	15,00	126,58
	18	10,29	126,58	116,30	13,70	130,00
	19	20,03	130,00	109,97	15,00	124,97
	20	14,28	124,97	110,70	15,00	125,70
	21	11,58	125,70	114,12	15,00	129,12
	22	7,35	129,12	121,77	8,23	130,00
	23	0,55	130,00	129,45	0,55	130,00
segunda-feira 04/04/2011	0	0,55	130,00	129,45	0,55	130,00
	1	0,55	130,00	129,45	0,55	130,00
	2	0,55	130,00	129,45	0,55	130,00
	3	0,55	130,00	129,45	0,55	130,00
	4	0,55	130,00	129,45	0,55	130,00
	5	0,55	130,00	129,45	0,55	130,00
	6	0,55	130,00	129,45	0,55	130,00
	7	10,33	130,00	119,67	10,33	130,00
	8	16,34	130,00	113,66	15,00	128,66
	9	36,99	128,66	91,67	15,00	106,67
	10	27,25	106,67	79,42	15,00	94,42
	11	26,21	94,42	68,21	15,00	83,21
	12	15,76	83,21	67,45	15,00	82,45
	13	19,45	82,45	63,00	15,00	78,00
	14	25,07	78,00	52,93	15,00	67,93
	15	27,34	67,93	40,60	15,00	55,60
	16	19,38	55,60	36,22	15,00	51,22
	17	18,31	51,22	32,91	15,00	47,91
	18	18,61	47,91	29,30	15,00	44,30
	19	15,99	44,30	28,31	15,00	43,31
	20	12,29	43,31	31,02	15,00	46,02
	21	10,29	46,02	35,73	15,00	50,73
	22	14,31	50,73	36,42	15,00	51,42
	23	10,85	51,42	40,57	15,00	55,57
terça-feira 05/04/2011	0	4,91	55,57	50,66	15,00	65,66
	1	3,43	65,66	62,23	15,00	77,23
	2	1,37	77,23	75,86	15,00	90,86
	3	1,37	90,86	89,48	15,00	104,48
	4	1,37	104,48	103,11	15,00	118,11
	5	1,37	118,11	116,74	13,26	130,00
	6	1,37	130,00	128,63	1,37	130,00
	7	12,67	130,00	117,33	12,67	130,00
	8	17,08	130,00	112,92	15,00	127,92
	9	24,55	127,92	103,37	15,00	118,37
	10	30,17	118,37	88,20	15,00	103,20
	11	22,15	103,20	81,06	15,00	96,06
	12	16,83	96,06	79,23	15,00	94,23
	13	20,28	94,23	73,95	15,00	88,95
	14	13,17	88,95	75,78	15,00	90,78
	15	12,97	90,78	77,81	15,00	92,81
	16	11,85	92,81	80,97	15,00	95,97
	17	19,11	95,97	76,86	15,00	91,86
	18	22,46	91,86	69,41	15,00	84,41

	19	20,06	84,41	64,34	15,00	79,34
	20	32,92	79,34	46,42	15,00	61,42
	21	15,18	61,42	46,24	15,00	61,24
	22	15,09	61,24	46,16	15,00	61,16
	23	12,26	61,16	48,90	15,00	63,90
quarta-feira 06/04/2011	0	4,13	63,90	59,77	15,00	74,77
	1	0,33	74,77	74,44	15,00	89,44
	2	1,82	89,44	87,62	15,00	102,62
	3	3,48	102,62	99,14	15,00	114,14
	4	1,52	114,14	112,62	15,00	127,62
	5	1,52	127,62	126,10	3,90	130,00
	6	10,40	130,00	119,61	10,40	130,00
	7	15,35	130,00	114,65	15,00	129,65
	8	18,98	129,65	110,67	15,00	125,67
	9	18,62	125,67	107,06	15,00	122,06
	10	21,84	122,06	100,22	15,00	115,22
	11	12,41	115,22	102,80	15,00	117,80
	12	16,82	117,80	100,98	15,00	115,98
	13	12,15	115,98	103,83	15,00	118,83
	14	11,37	118,83	107,47	15,00	122,47
	15	17,96	122,47	104,50	15,00	119,50
	16	12,17	119,50	107,33	15,00	122,33
	17	13,81	122,33	108,52	15,00	123,52
	18	14,54	123,52	108,99	15,00	123,99
	19	17,40	123,99	106,59	15,00	121,59
	20	11,76	121,59	109,83	15,00	124,83
	21	18,17	124,83	106,66	15,00	121,66
	22	9,95	121,66	111,71	15,00	126,71
	23	18,73	126,71	107,98	15,00	122,98
quinta-feira 07/04/2011	0	3,09	122,98	119,89	10,11	130,00
	1	0,52	130,00	129,48	0,52	130,00
	2	0,52	130,00	129,48	0,52	130,00
	3	1,31	130,00	128,69	1,31	130,00
	4	1,31	130,00	128,69	1,31	130,00
	5	1,31	130,00	128,69	1,31	130,00
	6	1,31	130,00	128,69	1,31	130,00
	7	13,19	130,00	116,81	13,19	130,00
	8	24,96	130,00	105,04	15,00	120,04
	9	19,71	120,04	100,33	15,00	115,33
	10	29,35	115,33	85,98	15,00	100,98
	11	34,39	100,98	66,59	15,00	81,59
	12	16,51	81,59	65,08	15,00	80,08
	13	21,21	80,08	58,87	15,00	73,87
	14	18,79	73,87	55,08	15,00	70,08
	15	18,11	70,08	51,97	15,00	66,97
	16	18,11	66,97	48,85	15,00	63,85
	17	18,11	63,85	45,74	15,00	60,74
	18	18,11	60,74	42,63	15,00	57,63
	19	18,11	57,63	39,51	15,00	54,51
	20	18,11	54,51	36,40	15,00	51,40
	21	18,11	51,40	33,29	15,00	48,29
	22	18,11	48,29	30,17	15,00	45,17
	23	18,11	45,17	27,06	15,00	42,06
sexta-feira 08/04/2011	0	18,11	42,06	23,95	15,00	38,95
	1	4,28	38,95	34,67	15,00	49,67
	2	0,77	49,67	48,90	15,00	63,90
	3	1,16	63,90	62,74	15,00	77,74
	4	4,00	77,74	73,74	15,00	88,74
	5	4,00	88,74	84,73	15,00	99,73
	6	4,00	99,73	95,73	15,00	110,73
	7	16,23	110,73	94,50	15,00	109,50
	8	16,10	109,50	93,40	15,00	108,40
	9	25,53	108,40	82,88	15,00	97,88
	10	22,71	97,88	75,17	15,00	90,17
	11	16,37	90,17	73,80	15,00	88,80
	12	15,25	88,80	73,56	15,00	88,56
	13	8,32	88,56	80,23	15,00	95,23
	14	16,27	95,23	78,97	15,00	93,97
	15	17,07	93,97	76,90	15,00	91,90
	16	4,55	91,90	87,35	15,00	102,35

	17	20,78	102,35	81,57	15,00	96,57
	18	17,43	96,57	79,14	15,00	94,14
	19	23,93	94,14	70,21	15,00	85,21
	20	25,51	85,21	59,70	15,00	74,70
	21	28,76	74,70	45,94	15,00	60,94
	22	20,85	60,94	40,10	15,00	55,10
	23	19,56	55,10	35,54	15,00	50,54
sábado 09/04/2011	0	11,39	50,54	39,15	15,00	54,15
	1	1,11	54,15	53,04	15,00	68,04
	2	4,65	68,04	63,39	15,00	78,39
	3	2,22	78,39	76,17	15,00	91,17
	4	0,39	91,17	90,78	15,00	105,78
	5	0,39	105,78	105,40	15,00	120,40
	6	5,60	120,40	114,80	15,00	129,80
	7	2,43	129,80	127,37	2,63	130,00
	8	13,70	130,00	116,30	13,70	130,00
	9	26,53	130,00	103,47	15,00	118,47
	10	18,63	118,47	99,84	15,00	114,84
	11	17,56	114,84	97,28	15,00	112,28
	12	20,04	112,28	92,24	15,00	107,24
	13	21,16	107,24	86,08	15,00	101,08
	14	21,57	101,08	79,51	15,00	94,51
	15	19,29	94,51	75,23	15,00	90,23
	16	25,55	90,23	64,68	15,00	79,68
	17	22,01	79,68	57,67	15,00	72,67
	18	18,35	72,67	54,32	15,00	69,32
	19	14,36	69,32	54,97	15,00	69,97
	20	27,53	69,97	42,44	15,00	57,44
	21	18,86	57,44	38,58	15,00	53,58
	22	11,08	53,58	42,50	15,00	57,50
	23	9,87	57,50	47,63	15,00	62,63
domingo 10/04/2011	0	9,20	62,63	53,43	15,00	68,43
	1	2,54	68,43	65,89	15,00	80,89
	2	2,40	80,89	78,50	15,00	93,50
	3	2,15	93,50	91,34	15,00	106,34
	4	1,11	106,34	105,23	15,00	120,23
	5	2,56	120,23	117,67	12,33	130,00
	6	3,52	130,00	126,48	3,52	130,00
	7	5,68	130,00	124,32	5,68	130,00
	8	10,69	130,00	119,31	10,69	130,00
	9	11,55	130,00	118,45	11,55	130,00
	10	8,97	130,00	121,03	8,97	130,00
	11	19,11	130,00	110,89	15,00	125,89
	12	20,26	125,89	105,63	15,00	120,63
	13	12,06	120,63	108,57	15,00	123,57
	14	4,21	123,57	119,36	10,64	130,00
	15	4,33	130,00	125,67	4,33	130,00
	16	16,72	130,00	113,28	15,00	128,28
	17	13,49	128,28	114,79	15,00	129,79
	18	18,33	129,79	111,46	15,00	126,46
	19	11,64	126,46	114,83	15,00	129,83
	20	11,58	129,83	118,25	11,75	130,00
	21	9,83	130,00	120,17	9,83	130,00
	22	20,67	130,00	109,33	15,00	124,33
	23	1,07	124,33	123,26	6,74	130,00
segunda-feira 11/04/2011	0	1,07	130,00	128,93	1,07	130,00
	1	1,07	130,00	128,93	1,07	130,00
	2	1,07	130,00	128,93	1,07	130,00
	3	1,07	130,00	128,93	1,07	130,00
	4	1,07	130,00	128,93	1,07	130,00
	5	1,07	130,00	128,93	1,07	130,00
	6	1,07	130,00	128,93	1,07	130,00
	7	15,52	130,00	114,49	15,00	129,49
	8	20,07	129,49	109,42	15,00	124,42
	9	23,94	124,42	100,48	15,00	115,48
	10	27,38	115,48	88,10	15,00	103,10
	11	19,35	103,10	83,75	15,00	98,75
	12	11,46	98,75	87,29	15,00	102,29
	13	18,33	102,29	83,97	15,00	98,97
	14	17,75	98,97	81,21	15,00	96,21

	15	17,08	96,21	79,14	15,00	94,14
	16	20,93	94,14	73,21	15,00	88,21
	17	14,16	88,21	74,05	15,00	89,05
	18	13,45	89,05	75,60	15,00	90,60
	19	22,21	90,60	68,39	15,00	83,39
	20	16,79	83,39	66,60	15,00	81,60
	21	7,30	81,60	74,30	15,00	89,30
	22	18,99	89,30	70,31	15,00	85,31
	23	13,32	85,31	71,99	15,00	86,99
terça-feira	0	4,63	86,99	82,36	15,00	97,36
12/04/2011	1	4,03	97,36	93,33	15,00	108,33
	2	1,70	108,33	106,63	15,00	121,63
	3	0,94	121,63	120,69	9,32	130,00
	4	0,58	130,00	129,42	0,58	130,00
	5	3,85	130,00	126,15	3,85	130,00
	6	6,13	130,00	123,87	6,13	130,00
	7	13,36	130,00	116,65	13,36	130,00
	8	27,82	130,00	102,18	15,00	117,18
	9	21,85	117,18	95,32	15,00	110,32
	10	31,21	110,32	79,11	15,00	94,11
	11	25,85	94,11	68,26	15,00	83,26
	12	25,73	83,26	57,53	15,00	72,53
	13	13,48	72,53	59,05	15,00	74,05
	14	9,19	74,05	64,85	15,00	79,85
	15	13,13	79,85	66,72	15,00	81,72
	16	17,07	81,72	64,66	15,00	79,66
	17	16,51	79,66	63,14	15,00	78,14
	18	16,39	78,14	61,76	15,00	76,76
	19	9,47	76,76	67,29	15,00	82,29
	20	27,76	82,29	54,52	15,00	69,52
	21	15,85	69,52	53,68	15,00	68,68
	22	14,07	68,68	54,60	15,00	69,60
	23	13,73	69,60	55,88	15,00	70,88
quarta-feira	0	1,88	70,88	69,00	15,00	84,00
13/04/2011	1	1,83	84,00	82,17	15,00	97,17
	2	1,82	97,17	95,34	15,00	110,34
	3	1,53	110,34	108,81	15,00	123,81
	4	1,41	123,81	122,41	7,59	130,00
	5	3,51	130,00	126,49	3,51	130,00
	6	3,51	130,00	126,49	3,51	130,00
	7	15,44	130,00	114,56	15,00	129,56
	8	19,96	129,56	109,60	15,00	124,60
	9	28,17	124,60	96,42	15,00	111,42
	10	17,55	111,42	93,87	15,00	108,87
	11	24,37	108,87	84,51	15,00	99,51
	12	18,19	99,51	81,32	15,00	96,32
	13	16,12	96,32	80,21	15,00	95,21
	14	14,97	95,21	80,24	15,00	95,24
	15	13,21	95,24	82,02	15,00	97,02
	16	23,49	97,02	73,53	15,00	88,53
	17	15,84	88,53	72,70	15,00	87,70
	18	16,45	87,70	71,25	15,00	86,25
	19	11,49	86,25	74,76	15,00	89,76
	20	14,64	89,76	75,12	15,00	90,12
	21	15,46	90,12	74,66	15,00	89,66
	22	11,93	89,66	77,73	15,00	92,73
	23	7,66	92,73	85,06	15,00	100,06
quinta-feira	0	3,80	100,06	96,26	15,00	111,26
14/04/2011	1	0,91	111,26	110,35	15,00	125,35
	2	1,57	125,35	123,78	6,22	130,00
	3	0,37	130,00	129,63	0,37	130,00
	4	0,37	130,00	129,63	0,37	130,00
	5	1,92	130,00	128,08	1,92	130,00
	6	14,11	130,00	115,89	14,11	130,00
	7	12,44	130,00	117,56	12,44	130,00
	8	16,05	130,00	113,95	15,00	128,95
	9	35,35	128,95	93,60	15,00	108,60
	10	25,16	108,60	83,44	15,00	98,44
	11	32,21	98,44	66,23	15,00	81,23
	12	23,93	81,23	57,30	15,00	72,30

	13	7,51	72,30	64,79	15,00	79,79
	14	22,75	79,79	57,04	15,00	72,04
	15	12,87	72,04	59,17	15,00	74,17
	16	13,23	74,17	60,94	15,00	75,94
	17	14,42	75,94	61,53	15,00	76,53
	18	17,55	76,53	58,97	15,00	73,97
	19	16,94	73,97	57,03	15,00	72,03
	20	15,47	72,03	56,56	15,00	71,56
	21	20,62	71,56	50,94	15,00	65,94
	22	16,61	65,94	49,34	15,00	64,34
	23	12,49	64,34	51,85	15,00	66,85
sexta-feira 15/04/2011	0	6,28	66,85	60,57	15,00	75,57
	1	1,74	75,57	73,83	15,00	88,83
	2	4,64	88,83	84,20	15,00	99,20
	3	0,57	99,20	98,63	15,00	113,63
	4	0,57	113,63	113,06	15,00	128,06
	5	1,54	128,06	126,52	3,48	130,00
	6	10,73	130,00	119,27	10,73	130,00
	7	14,63	130,00	115,37	14,63	130,00
	8	19,00	130,00	111,00	15,00	126,00
	9	27,16	126,00	98,84	15,00	113,84
	10	32,90	113,84	80,94	15,00	95,94
	11	27,79	95,94	68,15	15,00	83,15
	12	20,59	83,15	62,57	15,00	77,57
	13	10,17	77,57	67,40	15,00	82,40
	14	21,84	82,40	60,56	15,00	75,56
	15	25,61	75,56	49,95	15,00	64,95
	16	12,10	64,95	52,85	15,00	67,85
	17	14,77	67,85	53,08	15,00	68,08
	18	18,34	68,08	49,74	15,00	64,74
	19	19,59	64,74	45,16	15,00	60,16
	20	19,50	60,16	40,65	15,00	55,65
	21	22,91	55,65	32,74	15,00	47,74
	22	20,71	47,74	27,04	15,00	42,04
	23	12,32	42,04	29,71	15,00	44,71
sábado 16/04/2011	0	5,89	44,71	38,82	15,00	53,82
	1	7,38	53,82	46,44	15,00	61,44
	2	4,56	61,44	56,88	15,00	71,88
	3	1,06	71,88	70,82	15,00	85,82
	4	5,40	85,82	80,42	15,00	95,42
	5	0,61	95,42	94,81	15,00	109,81
	6	0,73	109,81	109,08	15,00	124,08
	7	8,27	124,08	115,81	14,19	130,00
	8	8,81	130,00	121,19	8,81	130,00
	9	18,87	130,00	111,13	15,00	126,13
	10	20,16	126,13	105,97	15,00	120,97
	11	20,82	120,97	100,15	15,00	115,15
	12	17,49	115,15	97,67	15,00	112,67
	13	20,20	112,67	92,47	15,00	107,47
	14	15,58	107,47	91,89	15,00	106,89
	15	19,73	106,89	87,16	15,00	102,16
	16	10,80	102,16	91,37	15,00	106,37
	17	16,85	106,37	89,52	15,00	104,52
	18	14,47	104,52	90,05	15,00	105,05
	19	17,59	105,05	87,46	15,00	102,46
	20	18,86	102,46	83,61	15,00	98,61
	21	16,32	98,61	82,28	15,00	97,28
	22	12,03	97,28	85,25	15,00	100,25
	23	12,35	100,25	87,90	15,00	102,90
domingo 17/04/2011	0	5,38	102,90	97,52	15,00	112,52
	1	1,70	112,52	110,82	15,00	125,82
	2	2,31	125,82	123,51	6,49	130,00
	3	5,02	130,00	124,98	5,02	130,00
	4	0,60	130,00	129,40	0,60	130,00
	5	2,04	130,00	127,96	2,04	130,00
	6	2,04	130,00	127,96	2,04	130,00
	7	5,62	130,00	124,38	5,62	130,00
	8	7,31	130,00	122,69	7,31	130,00
	9	9,38	130,00	120,62	9,38	130,00
	10	8,80	130,00	121,20	8,80	130,00

	11	15,88	130,00	114,12	15,00	129,12
	12	12,36	129,12	116,76	13,24	130,00
	13	10,87	130,00	119,13	10,87	130,00
	14	8,55	130,00	121,45	8,55	130,00
	15	12,28	130,00	117,73	12,28	130,00
	16	8,72	130,00	121,28	8,72	130,00
	17	15,76	130,00	114,24	15,00	129,24
	18	11,77	129,24	117,47	12,53	130,00
	19	17,47	130,00	112,53	15,00	127,53
	20	18,33	127,53	109,19	15,00	124,19
	21	18,73	124,19	105,46	15,00	120,46
	22	12,98	120,46	107,48	15,00	122,48
	23	2,20	122,48	120,28	9,72	130,00
segunda-feira	0	0,16	130,00	129,84	0,16	130,00
18/04/2011	1	0,16	130,00	129,84	0,16	130,00
	2	0,16	130,00	129,84	0,16	130,00
	3	0,16	130,00	129,84	0,16	130,00
	4	0,16	130,00	129,84	0,16	130,00
	5	0,16	130,00	129,84	0,16	130,00
	6	0,16	130,00	129,84	0,16	130,00
	7	12,39	130,00	117,61	12,39	130,00
	8	25,46	130,00	104,54	15,00	119,54
	9	20,67	119,54	98,87	15,00	113,87
	10	22,88	113,87	90,98	15,00	105,98
	11	21,80	105,98	84,18	15,00	99,18
	12	19,34	99,18	79,84	15,00	94,84
	13	19,91	94,84	74,93	15,00	89,93
	14	14,49	89,93	75,44	15,00	90,44
	15	13,31	90,44	77,13	15,00	92,13
	16	13,70	92,13	78,43	15,00	93,43
	17	14,86	93,43	78,57	15,00	93,57
	18	19,48	93,57	74,09	15,00	89,09
	19	19,58	89,09	69,51	15,00	84,51
	20	14,92	84,51	69,59	15,00	84,59
	21	15,23	84,59	69,36	15,00	84,36
	22	12,07	84,36	72,29	15,00	87,29
	23	6,59	87,29	80,71	15,00	95,71
terça-feira	0	5,61	95,71	90,10	15,00	105,10
19/04/2011	1	2,81	105,10	102,28	15,00	117,28
	2	2,64	117,28	114,64	15,00	129,64
	3	1,94	129,64	127,71	2,30	130,00
	4	1,43	130,00	128,57	1,43	130,00
	5	2,99	130,00	127,01	2,99	130,00
	6	4,15	130,00	125,85	4,15	130,00
	7	11,06	130,00	118,95	11,06	130,00
	8	18,85	130,00	111,15	15,00	126,15
	9	24,70	126,15	101,45	15,00	116,45
	10	26,38	116,45	90,07	15,00	105,07
	11	16,99	105,07	88,09	15,00	103,09
	12	23,08	103,09	80,01	15,00	95,01
	13	14,46	95,01	80,55	15,00	95,55
	14	21,92	95,55	73,63	15,00	88,63
	15	15,33	88,63	73,30	15,00	88,30
	16	14,70	88,30	73,60	15,00	88,60
	17	14,13	88,60	74,48	15,00	89,48
	18	22,27	89,48	67,21	15,00	82,21
	19	16,96	82,21	65,26	15,00	80,26
	20	11,75	80,26	68,50	15,00	83,50
	21	16,67	83,50	66,84	15,00	81,84
	22	16,27	81,84	65,57	15,00	80,57
	23	14,35	80,57	66,21	15,00	81,21
quarta-feira	0	1,77	81,21	79,45	15,00	94,45
20/04/2011	1	2,86	94,45	91,58	15,00	106,58
	2	2,40	106,58	104,18	15,00	119,18
	3	1,25	119,18	117,94	12,07	130,00
	4	1,25	130,00	128,75	1,25	130,00
	5	1,63	130,00	128,37	1,63	130,00
	6	5,62	130,00	124,38	5,62	130,00
	7	15,74	130,00	114,26	15,00	129,26
	8	13,71	129,26	115,55	14,45	130,00

	9	29,71	130,00	100,30	15,00	115,30
	10	15,90	115,30	99,40	15,00	114,40
	11	31,18	114,40	83,22	15,00	98,22
	12	31,18	98,22	67,04	15,00	82,04
	13	6,22	82,04	75,82	15,00	90,82
	14	6,22	90,82	84,61	15,00	99,61
	15	22,10	99,61	77,51	15,00	92,51
	16	13,02	92,51	79,49	15,00	94,49
	17	24,34	94,49	70,15	15,00	85,15
	18	21,91	85,15	63,24	15,00	78,24
	19	25,55	78,24	52,68	15,00	67,68
	20	19,72	67,68	47,96	15,00	62,96
	21	27,60	62,96	35,36	15,00	50,36
	22	21,29	50,36	29,07	15,00	44,07
	23	16,18	44,07	27,89	15,00	42,89
quinta-feira 21/04/2011	0	9,12	42,89	33,77	15,00	48,77
	1	9,48	48,77	39,29	15,00	54,29
	2	5,87	54,29	48,42	15,00	63,42
	3	6,89	63,42	56,53	15,00	71,53
	4	1,56	71,53	69,96	15,00	84,96
	5	1,15	84,96	83,81	15,00	98,81
	6	5,23	98,81	93,58	15,00	108,58
	7	10,32	108,58	98,26	15,00	113,26
	8	12,57	113,26	100,69	15,00	115,69
	9	12,34	115,69	103,34	15,00	118,34
	10	14,21	118,34	104,13	15,00	119,13
	11	27,41	119,13	91,73	15,00	106,73
	12	27,98	106,73	78,75	15,00	93,75
	13	12,95	93,75	80,80	15,00	95,80
	14	21,59	95,80	74,21	15,00	89,21
	15	5,46	89,21	83,76	15,00	98,76
	16	10,39	98,76	88,37	15,00	103,37
	17	9,99	103,37	93,38	15,00	108,38
	18	16,38	108,38	92,01	15,00	107,01
	19	15,97	107,01	91,04	15,00	106,04
	20	13,77	106,04	92,27	15,00	107,27
	21	13,37	107,27	93,91	15,00	108,91
	22	7,40	108,91	101,51	15,00	116,51
	23	8,02	116,51	108,48	15,00	123,48
sexta-feira 22/04/2011	0	4,44	123,48	119,04	10,96	130,00
	1	6,54	130,00	123,46	6,54	130,00
	2	2,06	130,00	127,94	2,06	130,00
	3	0,81	130,00	129,20	0,81	130,00
	4	0,81	130,00	129,20	0,81	130,00
	5	0,81	130,00	129,20	0,81	130,00
	6	1,19	130,00	128,81	1,19	130,00
	7	0,59	130,00	129,41	0,59	130,00
	8	5,84	130,00	124,16	5,84	130,00
	9	12,59	130,00	117,42	12,59	130,00
	10	17,21	130,00	112,79	15,00	127,79
	11	22,31	127,79	105,48	15,00	120,48
	12	13,83	120,48	106,65	15,00	121,65
	13	10,46	121,65	111,19	15,00	126,19
	14	8,39	126,19	117,81	12,19	130,00
	15	9,79	130,00	120,21	9,79	130,00
	16	10,10	130,00	119,90	10,10	130,00
	17	8,16	130,00	121,84	8,16	130,00
	18	12,02	130,00	117,99	12,02	130,00
	19	12,50	130,00	117,50	12,50	130,00
	20	15,54	130,00	114,46	15,00	129,46
	21	7,89	129,46	121,57	8,43	130,00
	22	10,95	130,00	119,05	10,95	130,00
	23	5,82	130,00	124,18	5,82	130,00
sábado 23/04/2011	0	5,67	130,00	124,33	5,67	130,00
	1	0,29	130,00	129,71	0,29	130,00
	2	0,29	130,00	129,71	0,29	130,00
	3	2,08	130,00	127,92	2,08	130,00
	4	0,74	130,00	129,27	0,74	130,00
	5	0,74	130,00	129,27	0,74	130,00
	6	7,23	130,00	122,77	7,23	130,00

	7	6,42	130,00	123,58	6,42	130,00
	8	6,42	130,00	123,58	6,42	130,00
	9	11,21	130,00	118,79	11,21	130,00
	10	22,56	130,00	107,45	15,00	122,45
	11	18,45	122,45	104,00	15,00	119,00
	12	22,15	119,00	96,85	15,00	111,85
	13	10,28	111,85	101,57	15,00	116,57
	14	12,56	116,57	104,01	15,00	119,01
	15	12,56	119,01	106,45	15,00	121,45
	16	7,49	121,45	113,97	15,00	128,97
	17	7,49	128,97	121,48	8,52	130,00
	18	10,50	130,00	119,50	10,50	130,00
	19	10,50	130,00	119,50	10,50	130,00
	20	10,31	130,00	119,69	10,31	130,00
	21	10,31	130,00	119,69	10,31	130,00
	22	14,58	130,00	115,42	14,58	130,00
	23	2,96	130,00	127,04	2,96	130,00
domingo 24/04/2011	0	2,96	130,00	127,04	2,96	130,00
	1	3,45	130,00	126,55	3,45	130,00
	2	3,45	130,00	126,55	3,45	130,00
	3	2,49	130,00	127,51	2,49	130,00
	4	2,49	130,00	127,51	2,49	130,00
	5	2,31	130,00	127,69	2,31	130,00
	6	2,31	130,00	127,69	2,31	130,00
	7	2,33	130,00	127,67	2,33	130,00
	8	2,42	130,00	127,58	2,42	130,00
	9	6,49	130,00	123,51	6,49	130,00
	10	9,81	130,00	120,19	9,81	130,00
	11	8,48	130,00	121,53	8,47	130,00
	12	14,07	130,00	115,93	14,07	130,00
	13	17,19	130,00	112,82	15,00	127,82
	14	10,50	127,82	117,31	12,69	130,00
	15	13,18	130,00	116,82	13,18	130,00
	16	19,81	130,00	110,19	15,00	125,19
	17	10,47	125,19	114,73	15,00	129,73
	18	11,68	129,73	118,05	11,95	130,00
	19	22,17	130,00	107,83	15,00	122,83
	20	12,99	122,83	109,84	15,00	124,84
	21	9,84	124,84	115,00	15,00	130,00
	22	17,63	130,00	112,38	15,00	127,38
	23	1,98	127,38	125,40	4,60	130,00
segunda-feira 25/04/2011	0	0,21	130,00	129,79	0,21	130,00
	1	0,21	130,00	129,79	0,21	130,00
	2	0,21	130,00	129,79	0,21	130,00
	3	0,21	130,00	129,79	0,21	130,00
	4	0,21	130,00	129,79	0,21	130,00
	5	0,21	130,00	129,79	0,21	130,00
	6	0,21	130,00	129,79	0,21	130,00
	7	24,77	130,00	105,23	15,00	120,23
	8	24,77	120,23	95,45	15,00	110,45
	9	24,77	110,45	85,68	15,00	100,68
	10	24,77	100,68	75,91	15,00	90,91
	11	25,87	90,91	65,04	15,00	80,04
	12	25,87	80,04	54,16	15,00	69,16
	13	3,80	69,16	65,36	15,00	80,36
	14	15,39	80,36	64,98	15,00	79,98
	15	20,03	79,98	59,95	15,00	74,95
	16	11,00	74,95	63,95	15,00	78,95
	17	18,53	78,95	60,42	15,00	75,42
	18	14,65	75,42	60,78	15,00	75,78
	19	15,61	75,78	60,17	15,00	75,17
	20	26,74	75,17	48,44	15,00	63,44
	21	9,53	63,44	53,91	15,00	68,91
	22	9,53	68,91	59,38	15,00	74,38
	23	13,49	74,38	60,89	15,00	75,89
terça-feira 26/04/2011	0	2,06	75,89	73,82	15,00	88,82
	1	2,99	88,82	85,83	15,00	100,83
	2	0,98	100,83	99,85	15,00	114,85
	3	0,58	114,85	114,27	15,00	129,27
	4	0,58	129,27	128,70	1,30	130,00

	5	2,40	130,00	127,61	2,40	130,00
	6	2,40	130,00	127,61	2,40	130,00
	7	17,00	130,00	113,00	15,00	128,00
	8	19,73	128,00	108,27	15,00	123,27
	9	30,25	123,27	93,02	15,00	108,02
	10	15,55	108,02	92,48	15,00	107,48
	11	15,55	107,48	91,93	15,00	106,93
	12	27,99	106,93	78,94	15,00	93,94
	13	13,62	93,94	80,31	15,00	95,31
	14	19,24	95,31	76,07	15,00	91,07
	15	7,16	91,07	83,91	15,00	98,91
	16	14,00	98,91	84,91	15,00	99,91
	17	18,62	99,91	81,29	15,00	96,29
	18	19,43	96,29	76,86	15,00	91,86
	19	13,24	91,86	78,62	15,00	93,62
	20	27,84	93,62	65,78	15,00	80,78
	21	16,16	80,78	64,62	15,00	79,62
	22	6,52	79,62	73,09	15,00	88,09
	23	4,64	88,09	83,46	15,00	98,46
quarta-feira	0	3,99	98,46	94,47	15,00	109,47
27/04/2011	1	0,59	109,47	108,88	15,00	123,88
	2	0,59	123,88	123,29	6,71	130,00
	3	2,15	130,00	127,85	2,15	130,00
	4	0,52	130,00	129,48	0,52	130,00
	5	0,77	130,00	129,23	0,77	130,00
	6	3,26	130,00	126,74	3,26	130,00
	7	12,38	130,00	117,62	12,38	130,00
	8	15,23	130,00	114,77	15,00	129,77
	9	30,83	129,77	98,94	15,00	113,94
	10	13,17	113,94	100,77	15,00	115,77
	11	18,91	115,77	96,87	15,00	111,87
	12	15,93	111,87	95,94	15,00	110,94
	13	11,55	110,94	99,38	15,00	114,38
	14	18,12	114,38	96,27	15,00	111,27
	15	16,00	111,27	95,27	15,00	110,27
	16	11,90	110,27	98,36	15,00	113,36
	17	20,70	113,36	92,66	15,00	107,66
	18	10,15	107,66	97,51	15,00	112,51
	19	14,36	112,51	98,15	15,00	113,15
	20	12,63	113,15	100,52	15,00	115,52
	21	17,89	115,52	97,63	15,00	112,63
	22	13,56	112,63	99,07	15,00	114,07
	23	5,17	114,07	108,90	15,00	123,90
quinta-feira	0	5,17	123,90	118,72	11,28	130,00
28/04/2011	1	0,90	130,00	129,10	0,90	130,00
	2	2,87	130,00	127,13	2,87	130,00
	3	0,95	130,00	129,05	0,95	130,00
	4	1,39	130,00	128,61	1,39	130,00
	5	2,61	130,00	127,39	2,61	130,00
	6	2,61	130,00	127,39	2,61	130,00
	7	10,19	130,00	119,81	10,19	130,00
	8	21,72	130,00	108,29	15,00	123,29
	9	20,59	123,29	102,70	15,00	117,70
	10	16,98	117,70	100,71	15,00	115,71
	11	23,02	115,71	92,70	15,00	107,70
	12	11,50	107,70	96,19	15,00	111,19
	13	17,30	111,19	93,90	15,00	108,90
	14	23,26	108,90	85,63	15,00	100,63
	15	14,25	100,63	86,38	15,00	101,38
	16	18,51	101,38	82,88	15,00	97,88
	17	19,49	97,88	78,39	15,00	93,39
	18	19,49	93,39	73,89	15,00	88,89
	19	19,49	88,89	69,40	15,00	84,40
	20	19,49	84,40	64,91	15,00	79,91
	21	19,49	79,91	60,42	15,00	75,42
	22	19,49	75,42	55,93	15,00	70,93
	23	6,36	70,93	64,57	15,00	79,57
sexta-feira	0	3,64	79,57	75,93	15,00	90,93
29/04/2011	1	1,24	90,93	89,69	15,00	104,69
	2	0,75	104,69	103,93	15,00	118,93

	3	0,38	118,93	118,55	11,45	130,00
	4	0,77	130,00	129,23	0,77	130,00
	5	0,47	130,00	129,53	0,47	130,00
	6	6,16	130,00	123,84	6,16	130,00
	7	24,00	130,00	106,00	15,00	121,00
	8	20,15	121,00	100,85	15,00	115,85
	9	20,15	115,85	95,70	15,00	110,70
	10	19,50	110,70	91,21	15,00	106,21
	11	11,11	106,21	95,10	15,00	110,10
	12	17,95	110,10	92,15	15,00	107,15
	13	17,95	107,15	89,20	15,00	104,20
	14	8,92	104,20	95,28	15,00	110,28
	15	13,97	110,28	96,31	15,00	111,31
	16	17,42	111,31	93,90	15,00	108,90
	17	22,12	108,90	86,78	15,00	101,78
	18	13,74	101,78	88,03	15,00	103,03
	19	18,21	103,03	84,82	15,00	99,82
	20	20,69	99,82	79,13	15,00	94,13
	21	14,82	94,13	79,32	15,00	94,32
	22	18,33	94,32	75,99	15,00	90,99
	23	14,01	90,99	76,97	15,00	91,97
sábado	0	8,75	91,97	83,23	15,00	98,23
30/04/2011	1	4,91	98,23	93,32	15,00	108,32
	2	0,57	108,32	107,75	15,00	122,75
	3	0,57	122,75	122,18	7,82	130,00
	4	1,38	130,00	128,62	1,38	130,00
	5	1,38	130,00	128,62	1,38	130,00
	6	0,97	130,00	129,03	0,97	130,00
	7	6,52	130,00	123,49	6,52	130,00
	8	10,33	130,00	119,67	10,33	130,00
	9	21,79	130,00	108,21	15,00	123,21
	10	27,84	123,21	95,37	15,00	110,37
	11	26,50	110,37	83,87	15,00	98,87
	12	13,82	98,87	85,05	15,00	100,05
	13	17,65	100,05	82,40	15,00	97,40
	14	13,59	97,40	83,82	15,00	98,82
	15	26,59	98,82	72,22	15,00	87,22
	16	21,79	87,22	65,44	15,00	80,44
	17	17,65	80,44	62,78	15,00	77,78
	18	13,86	77,78	63,92	15,00	78,92
	19	16,35	78,92	62,57	15,00	77,57
	20	14,05	77,57	63,52	15,00	78,52
	21	25,41	78,52	53,11	15,00	68,11
	22	16,26	68,11	51,85	15,00	66,85
	23	13,65	66,85	53,20	15,00	68,20