

Trajetórias Tecnológicas em Combustíveis Sintéticos: Análise dos Mecanismos de Seleção e Indução*

Fabrcio Brollo Dunham

Analista de Projetos da Financiadora de Estudos e Projetos – FINEP

José Vitor Bomtempo

Professor de Gestão e Inovação Tecnológica do Programa de Pós-Graduação em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos da Escola de Química da UFRJ

Edmar Luiz Fagundes de Almeida

Professor Adjunto do Instituto de Economia da UFRJ

Recebido: 14/9/2005 Aprovado: 20/3/2006

RESUMO

O artigo identifica e delimita a existência de duas trajetórias tecnológicas em combustíveis líquidos sintéticos. O conceito de trajetória tecnológica é delimitado em função do ambiente de seleção e dos programas de pesquisa tecnológica, sendo aplicável ao nível das tecnologias. A primeira trajetória tecnológica tem por ambiente de seleção as limitações econômicas e militares observadas pelos países não-produtores de petróleo, o que culminou com os embargos da Segunda Guerra Mundial. Os programas de pesquisa buscavam desenvolver as tecnologias Fischer-Tropsch, hidrogenação em alta pressão e LTC (*low temperature carbonization*). O ambiente de seleção da segunda trajetória é delimitado pelo aumento das reservas de gás natural, pelas restrições ambientais e pela demanda por flexibilidade na cadeia de gás e energia. Os programas de pesquisa têm por objeto de estudo o

* Os autores agradecem à Financiadora de Estudos e Projetos – FINEP pelo apoio recebido na elaboração deste trabalho. Também agradecemos aos dois anônimos revisores que muito contribuíram com críticas e sugestões ao artigo.

processo de produção do gás de síntese necessário ao processo Fischer-Tropsch. A conversão direta do gás natural para combustíveis líquidos sintéticos apresenta-se como a promessa de uma inovação radical. Por fim, o artigo compara as duas trajetórias, identificando aspectos comuns e diferenças entre elas.

PALAVRAS-CHAVE | Trajetória Tecnológica; Gás Natural; Combustíveis Sintéticos; Fischer-Tropsch; Gás de Síntese

CÓDIGOS JEL | O33

ABSTRACT

This article identifies and bounds the existence of two technological trajectories on synthetic liquid fuels. This technological trajectory concept is bounded concerning the selection environment and the programs for technological research. It is applicable at technological levels. The selection environment of the first technological trajectory was bounded by the economical and army limitations observed by the countries that did not produce oil. This situation reached its limit at the beginning of the Second World War. The research programs aimed the development of the Fischer-Tropsch process, high-pressure hydrogenation and low temperature carbonization (LTC). The selection environment of the second technological trajectory is bounded by the increase of natural gas reserves, by the environmental restrictions and by the demand for flexibility in the gas and energy chains. The research programs have as objective the production process for the synthesis gas, which is necessary to the Fischer-Tropsch process. The direct conversion of natural gas into synthetic liquid fuels represents the promise of a radical innovation. Finally, the article compares the two trajectories, identifying similarities and differences between them.

KEYWORDS | Technological Trajectory; Natural Gas; Synthetic Fuels; Fischer-Tropsch; Synthesis Gas

JEL-CODES | O33

1. Introdução

O desenvolvimento dos motores de combustão interna alterou o uso das fontes de energia empregadas até o início século XX. O carvão mineral foi progressivamente substituído por combustíveis líquidos,¹ provocando uma demanda crescente por este insumo energético. O refino do petróleo bruto firmou-se como a melhor resposta para a necessidade de produção de combustíveis líquidos. Entretanto, ao longo da história, observam-se importantes movimentos na busca de combustíveis obtidos por processos alternativos à trajetória dominante. Os combustíveis líquidos sintéticos² surgem como alternativa ao processo de refino do petróleo, atendendo a circunstâncias específicas.

O presente trabalho explora a obtenção de combustíveis sintéticos por meio do processo Fischer-Tropsch, utilizado à época da Segunda Guerra Mundial a partir de carvão como matéria-prima. Nos últimos anos, observa-se a renovação do interesse no processo Fischer-Tropsch para a transformação do gás natural em combustíveis sintéticos. A utilização do gás natural poderia ser interpretada como o renascimento de uma tecnologia madura (Dunham *et al.*, 2002), o que configuraria a retomada de uma trajetória tecnológica abandonada no pós-guerra. Entretanto, o trabalho postula que duas trajetórias tecnológicas diferentes podem ser identificadas e delimitadas. A identificação das duas trajetórias permite compreender o processo de inovação segundo uma perspectiva que se mostra interessante para interpretar e orientar as políticas e estratégias de produção de combustíveis sintéticos a partir de gás natural.

A primeira trajetória está relacionada à Segunda Guerra Mundial. O ambiente de seleção foi moldado por três fatores principais: o impacto da importação de petróleo na balança de comércio exterior dos países não produtores, a busca pela independência energética e a obstrução do acesso ao petróleo com o início da guerra. Por sua importância o assunto era tratado como uma questão de soberania nacional. Os programas de pesquisa tecnológica mais expressivos foram

¹ A expressão “combustíveis líquidos” compreende apenas os derivados de petróleo, como gasolina e diesel. A comparação com outros combustíveis líquidos (álcool e biodiesel, por exemplo) não foi objeto deste trabalho.

² O termo “combustíveis líquidos sintéticos” denota propriedades físico-químicas similares aos combustíveis líquidos produzidos a partir do refino do petróleo (gasolina, querosene de aviação, diesel, óleo combustível e outros). A diferença fundamental está na forma de produção, que requer processos e/ou reações químicas que não estão presentes no refino do petróleo. Para dar fluidez ao texto, o termo “combustíveis sintéticos” passa a ser utilizado no contexto do termo “combustíveis líquidos sintéticos”.

implementados pela Alemanha, Estados Unidos e Japão. As tecnologias Fischer-Tropsch, de hidrogenao e LTC (*low temperature carbonization*), todas usando o carvão mineral como matéria-prima, caracterizam o esforço tecnológico da primeira trajetória.

A segunda trajetória explora a transformao química de gás natural em combustíveis sintéticos. O ambiente de seleo  formado pelo volume crescente de reservas de gás natural, pela existência de reservas irrecuperáveis de gás natural,³ pela demanda por flexibilidade no transporte do gás, pelo aumento da demanda por flexibilidade na cadeia de insumos energéticos, pelo recrudescimento na legislao ambiental na queima do gás associado⁴ e pela imposio de parâmetros ambientais mais severos na produo de combustíveis limpos. Esse novo ambiente impulsiona os programas de pesquisa tecnológica, onde os desafios são aumentar a eficiência da produo do gás de síntese utilizado na reao de Fischer-Tropsch e desenvolver novas rotas de conversão direta do gás natural em combustíveis líquidos.

Neste contexto, o objetivo do trabalho  identificar os ambientes de seleo e os programas de pesquisa que caracterizam as duas trajetórias tecnológicas em combustíveis sintéticos.⁵ As trajetórias serão analisadas e comparadas quanto a estas duas dimensões. Que fatores induziram a escolha em uma direo particular, em vez de outras? Até que ponto estas direes são determinísticas e geram opes excludentes? Em que pontos as trajetórias tecnológicas identificadas são semelhantes ou diferentes entre si?

A abordagem destas questões tem início com uma breve revisão dos fundamentos teóricos na seo 2, definindo o conceito de trajetória tecnológica a ser utilizado na análise. A seo 3 contextualiza o refino do petróleo como a trajetória tecnológica dominante na produo de combustíveis líquidos. As sees 4 e 5 apresentam os elementos que caracterizam, respectivamente, a primeira e a segunda trajetória em combustíveis sintéticos. A análise comparativa das duas trajetórias tem lugar na seo 6. Por fim, o trabalho conclui pelo inter-relacionamento entre as tecnologias que delimitam a segunda trajetória.

³ Reservas irrecuperáveis  um termo corrente para designar reservas provadas/certificadas pelas empresas e cujo aproveitamento comercial, com as tecnologias tradicionais, encontra dificuldade econômica de viabilizar sua explorao.

⁴ A expressão gás associado identifica as reservas de gás natural que ocorrem em conjunto com petróleo, ou seja, num mesmo campo encontra-se petróleo e gás natural.

⁵ A indústria do petróleo  marcada por influências econmicas e geopolíticas na escolha das tecnologias de produo, sendo o preço do petróleo um importante parâmetro nas decisões. Entretanto, a análise detalhada destas influências foge aos objetivos do trabalho.

O artigo traz elementos que podem auxiliar na definição das estratégias de investimentos em programas de pesquisa tecnológica em combustíveis sintéticos. A discussão do conceito de trajetória tecnológica é aplicável à indústria de combustíveis líquidos em geral.

2. Constituição de paradigmas e trajetórias tecnológicas

2.1. Paradigma tecnológico

Dosi (1982) define paradigma tecnológico como o modelo ou esquema de solução de um problema técnico selecionado.⁶ O paradigma tecnológico define e contextualiza as necessidades que devem ser plenamente atendidas, influenciando nas oportunidades tecnológicas para futuras inovações e nos procedimentos básicos para sua exploração. O paradigma tecnológico incorpora uma forte prescrição na direção das mudanças técnicas que serão implementadas e das que serão negligenciadas.

2.2. Trajetórias tecnológicas

Da noção de *path-dependence* surgiu a noção de trajetória natural, proposta inicialmente por Nelson e Winter (1977) e posteriormente explorada por Dosi (1982) no conceito de trajetória tecnológica. Conforme sugere Tidd *et al.* (1997), o conceito de trajetória tecnológica pode ser aplicado às tecnologias, controladas pelos limites do conhecimento, ou às empresas, controladas pelos limites cognitivos.

Dosi (1982), define trajetória tecnológica como o conjunto de atividades implementadas para a solução de um problema definido no âmbito do paradigma tecnológico. As promessas de solução organizam-se na forma de programas de pesquisa tecnológica. Os programas de pesquisa procuram reduzir o desequilíbrio entre as dimensões técnica e econômica das tecnologias em investigação. Avançar ao longo de uma trajetória tecnológica significa aperfeiçoar os atributos técnicos e econômicos desejáveis de um certo produto, equipamento, ferramenta ou dispositivo, reduzindo as opções excludentes entre esses dois atributos.

⁶ Deve-se notar a diferença na abrangência dos conceitos de Freeman & Perez (1986) e Dosi (1982). Freeman & Perez (1986) definem o conceito de paradigma técnico-científico para descrever as tecnologias que influenciaram no comportamento e na conduta das indústrias por meio do sistema econômico. O conceito de paradigma técnico-científico possui uma abrangência maior do que o conceito de paradigma tecnológico proposto por Dosi (1982).

Os fatores macroeconmicos, institucionais e sociais também devem ser considerados na definio das opoes excludentes relevantes (Dosi, 1982). Estes fatores constituem o conceito de ambiente de seleo, que influencia a escolha das tecnológicas e a alocao dos recursos (financeiros, científicos e técnicos) nos programas de pesquisa. Alteraoes no ambiente de seleo implicam na redefinio das tecnologias capazes de atender ao paradigma tecnológico.

Assim, o conceito de trajetória tecnológica está delimitado pelos programas de pesquisa tecnológica e pelo ambiente de seleo que direcionam a resposta ao paradigma tecnológico. As duas trajetórias tecnológicas apresentadas neste artigo serão caracterizadas em funo deste conceito.

Para a identificao das forças e circunstâncias que levaram ao desenvolvimento de duas trajetórias tecnológicas em combustíveis sintéticos  relevante indagar: Quais fatores determinaram a escolha do refino como principal opoa para a produo de combustíveis líquidos? Quais alteraoes no ambiente de seleo impulsionaram o desenvolvimento das duas trajetórias em combustíveis sintéticos? Em que aspectos os ambientes de seleo de cada trajetória seriam diferentes ou semelhantes entre si? Como  possível definir a existência de duas trajetórias tecnológicas se o processo Fischer-Tropsch  comum a ambas?

2.3. Mecanismos de induo das mudanças tecnológicas

Rosenberg (1976) aborda que a mudança tecnológica  um processo mais cumulativo e espontâneo do que muitos economistas reconhecem. Os incentivos de natureza econômica para a reduo de custos sempre existiram em operaoes e negócios. Precisamente por isto, estes incentivos tão bem difundidos, não explicam de forma eficaz a seqncia e o tempo da atividade inovativa.

Para melhor explorar os mecanismos de induo das mudanças tecnológicas, Rosenberg (1976) identifica três situaoes distintas: 1) substituio do trabalho humano por máquinas e equipamentos; 2) interdependência entre sistemas e processos; 3) restrioes ao acesso ou uso de insumos. Essas condioes contribuem fortemente para a focalizao do esforço tecnológico, dando-lhe determinadas direoes que seriam inerentes  sua própria lógica.

Cabe indagar se o ambiente de seleo das duas trajetórias tecnológicas em

combustíveis líquidos seguiu os mesmos fatores de indução propostos por Rosenberg (1976). Existiriam outros fatores capazes de induzir as mudanças tecnológicas?

3. Formação da trajetória tecnológica dominante

A indústria de refino do petróleo é anterior à difusão em larga escala dos veículos automotores, tendo iniciado suas atividades ainda no século XIX. Na época o principal produto era o querosene, utilizado para a iluminação em geral. Com o advento dos sistemas de iluminação elétrica, o querosene perdeu mercado e o refino do petróleo ficou tecnologicamente estagnado (Enos, 1962).

A expansão da indústria automotiva no início do século XX aumentou a demanda por combustíveis, dando novo impulso à indústria de refino. As refinarias implementaram significativos esforços para desenvolver tecnologias que atendessem ao novo contexto (Enos, 1962). Foram introduzidas inovações que resultaram em produtos de melhor desempenho e redução de custos, sobretudo pela exploração dos ganhos de escala de produção. Novas técnicas de exploração e produção de petróleo bruto também foram desenvolvidas, aumentando a probabilidade de sucesso nas perfurações e melhorando a produtividade dos campos (Rosenberg, 1998).

A importância do refino como trajetória dominante no atendimento à demanda por combustíveis líquidos também está associada ao desenvolvimento da trajetória natural (Nelson & Winter, 1977) de ganhos de escala, onde os processos em regime de batelada foram gradualmente substituídos por processos contínuos, reduzindo os custos de investimento e de operação.

O refino do petróleo firmou-se como a trajetória tecnológica dominante para responder à necessidade de produção de combustíveis líquidos.

4. Primeira trajetória tecnológica em combustíveis sintéticos

Nesta seção serão apresentados os elementos que caracterizam a primeira trajetória tecnológica em combustíveis sintéticos. Os trabalhos de Stranges (1993, 1997, 2000) são a principal fonte de informações técnicas e históricas sobre o período que compreende as décadas de 1910 e 1950.

4.1. Ambiente de seleção para o desenvolvimento dos processos de produção de combustíveis sintéticos

Muitos países não possuem depósitos expressivos de petróleo, o que não era tido como um problema energético antes do século XX. O carvão mineral atendia plenamente às necessidades industriais e militares, cuja base eram os sistemas de vapor.

Com a difusão do uso dos motores de combustão interna os países industrializados passaram a ser cada vez mais dependentes da importação de combustíveis líquidos. As importações produziam efeitos negativos em suas balanças comerciais e economias. Adicionalmente, a dependência externa para o suprimento de recursos energéticos causava forte sentimento de insegurança, especialmente quanto ao abastecimento das forças militares. A produção de combustíveis líquidos deixou de ser uma questão energética para se tornar uma questão de soberania nacional. A transformação dos fatores institucionais alterou o ambiente de seleção das tecnologias, impulsionando a busca por fontes e processos alternativos ao refino do petróleo.

Nesse contexto, verificam-se esforços de P&D em processos de produção de combustíveis sintéticos em vários países, com destaque para Alemanha, Estados Unidos e Japão. Estes três países promoveram os mais significativos programas de pesquisa, com desdobramentos em plantas-piloto e unidades industriais. O estudo de caso destes três países é representativo para delimitar o ambiente de seleção da primeira trajetória tecnológica em combustíveis sintéticos, surgindo como alternativa ao refino do petróleo.

Na Alemanha, o desenvolvimento dos processos de produção de combustíveis sintéticos está intrinsecamente relacionado com as políticas do governo nazista, implementadas nas décadas de 1930 e 1940. O esforço de P&D e os incentivos à criação de uma indústria local eram parte central do planejamento estratégico daquele governo, que tinha objetivos militares bem definidos. Os alemães implementaram uma série de medidas com o objetivo de tornar o país independente das fontes externas de petróleo, passando a ser auto-suficiente na produção de combustíveis.

A dependência da importação de combustíveis líquidos, aliada às grandes reservas de carvão, já havia impulsionado os cientistas e engenheiros alemães no desenvolvimento de dois novos processos de produção de com-

bustíveis sintéticos. O primeiro, o processo de hidrogenação (ou liquefação) do carvão a alta pressão, foi desenvolvido pelo pesquisador Friedrich Bergius entre 1910 e 1925. O segundo processo consistia na conversão de monóxido de carbono e hidrogênio em hidrocarbonetos. Seu desenvolvimento se deu a partir de 1914, e ficou conhecido pelo nome de seus idealizadores: processo Fischer-Tropsch.

Para viabilizar economicamente a indústria de combustíveis sintéticos, o governo nazista estabeleceu uma política de incentivos tarifários, subsídios diretos e associações comerciais que resultavam em contratos com baixo nível de risco para o setor privado. A política de fomento aos combustíveis sintéticos incluía garantias de reembolso nos períodos em que o preço de mercado fosse inferior aos custos, além de assegurar a compra dos volumes excedentes caso o mercado não absorvesse toda a produção. Na época, o custo dos produtos sintéticos era cerca de três vezes maior do que o preço dos combustíveis derivados do petróleo no mercado internacional.

O governo japonês adotou uma estratégia similar no ano de 1933, oferecendo uma série de subsídios para a construção de uma indústria de combustíveis sintéticos. A incorporação da Manchúria, com suas expressivas reservas de carvão mineral, deu um impulso extra ao processo.

Em 1937, o governo japonês lançou um plano estratégico de sete anos para a produção de combustíveis sintéticos. Foram publicadas duas leis para a implementação do plano, prevendo a construção de 87 plantas no Japão e na Manchúria, que deveriam produzir em 1944 um volume total de um milhão de kL/ano de combustíveis. Das 87 plantas, dez seriam de hidrogenação, 11 de tecnologia Fischer-Tropsch e 66 com tecnologia LTC.

A história do programa norte-americano de produção de combustíveis líquidos tem início com a criação do Bureau of Mines, em 1910. Entre as razões para a inclusão de pesquisas em combustíveis sintéticos no programa do Bureau of Mines, estava a preocupação do governo americano com as estimativas de produção de óleo cru. Uma série de relatórios sobre o assunto, publicados entre 1908 e 1914, estimava que as reservas norte-americanas de petróleo estariam esgotadas em menos de 30 anos. Com a entrada dos Estados Unidos na Segunda Guerra Mundial, em dezembro de 1941, o governo considerava o desenvolvimento dos processos de combustíveis sintéticos como uma questão de segurança nacional.

Em abril de 1944 o congresso norte-americano publicou o *Synthetic Liquid Fuels Act*, uma resolução que destinou US\$ 30 milhões, ao longo de cinco anos, para que o Bureau of Mines desenvolvesse plantas semicomerciais em hidrogenação de carvão e síntese por Fischer-Tropsch. O objetivo era produzir conhecimento técnico suficiente para estimular a iniciativa privada a produzir combustíveis sintéticos. Em setembro de 1950, o congresso autorizou a continuação do programa até 1955 e aumentou o orçamento para US\$ 87,6 milhões.

Além dos recursos financeiros disponíveis, os norte-americanos também queriam utilizar os documentos capturados nos meses finais da Segunda Guerra Mundial pela Technical Oil Mission (TOM), contendo a experiência alemã na produção de combustíveis sintéticos. A TOM realizou uma detalhada investigação das características técnicas e operacionais das plantas de combustíveis sintéticos. A partir dos documentos recolhidos, foram identificados os principais responsáveis pelo conhecimento nas plantas de hidrogenação e Fischer-Tropsch. O governo norte-americano decidiu trazer os especialistas para os Estados Unidos, fato mantido sob severa confidencialidade. Ao todo, sete cientistas especializados na produção de combustíveis sintéticos foram levados da Alemanha para trabalhar nos projetos do Bureau of Mines.

4.2. O desafio tecnológico dos programas de pesquisa

Os programas de pesquisa implementados durante a primeira trajetória tecnológica em combustíveis sintéticos tinham por objeto os seguintes processos: hidrogenação, Fischer-Tropsch e LTC. Todos utilizavam o carvão mineral como fonte de carbono alternativa ao petróleo. O texto a seguir, baseado em Stranges (1993, 1997, 2000), descreve sumariamente os desafios tecnológicos de cada um destes programas.

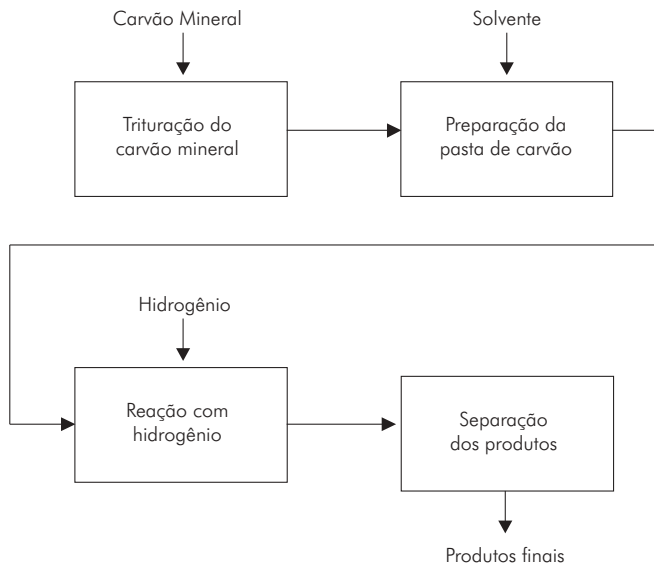
4.2.1. Desenvolvimento do processo de hidrogenação do carvão mineral

O processo de hidrogenação do carvão a altas pressões consiste em três etapas principais: a formação da pasta de carvão, a hidrogenação a alta pressão e a separação dos produtos.

O processo se inicia com a trituração do carvão mineral, que adicionado a um solvente (benzeno, por exemplo), proporciona uma pasta de alta viscosidade. A mistura é introduzida em um reator, onde entra em contato com o hidrogênio. A reação se processa a cerca de 400°C e a 200-300 atmosferas de pressão, na presença de um catalisador (em grande parte dos processos foram utilizados catalisadores de cobalto).

No reator a estrutura química do carvão é quebrada, obtendo-se uma mistura de hidrocarbonetos de menor peso molecular. Após a reação, a mistura é separada em seus constituintes, por meio de destilação. O processo permite a obtenção de combustíveis sintéticos equivalentes aos do refino do petróleo (gasolina, óleo diesel e óleo combustível). A Figura 1 apresenta o fluxograma que resume o processo.

FIGURA 1
Fluxograma simplificado do processo de hidrogenação do carvão a alta temperatura



Fonte: elaboração própria.

O alemão Friedrich Bergius foi o maior especialista no assunto e iniciou seus experimentos de hidrogenao do carvão em uma pequena planta, em Hanover, com carvão vegetal artificialmente preparado. No verão de 1913 ele obteve sucesso na hidrogenao do carvão vegetal, sendo o primeiro a produzir “petróleo sinttico”, ou seja, uma mistura de hidrocarbonetos líquidos. Em 1915, foi iniciada a construo de uma nova planta-piloto em Rheinau-Mannheim, sob a supervisão de Bergius. Os estudos demonstraram que a hidrogenao do carvão apresentava limitaoes inerentes ao processo e aos materiais utilizados como catalisadores.

A hidrogenao do carvão envolvia trabalhos em altas pressoes com solidos, líquidos de alta viscosidade e hidrogênio, o que aumentava a necessidade de estudos sobre o comportamento dos materiais no reator. O desafio tecnológico se voltava para o desenvolvimento de um catalisador que aumentasse a taxa de reao e, ao mesmo tempo, favorecesse a hidrogenao frente às demais reaoes secundárias. Outro problema objeto das pesquisas era o envenenamento do catalisador com o enxofre presente no carvão.

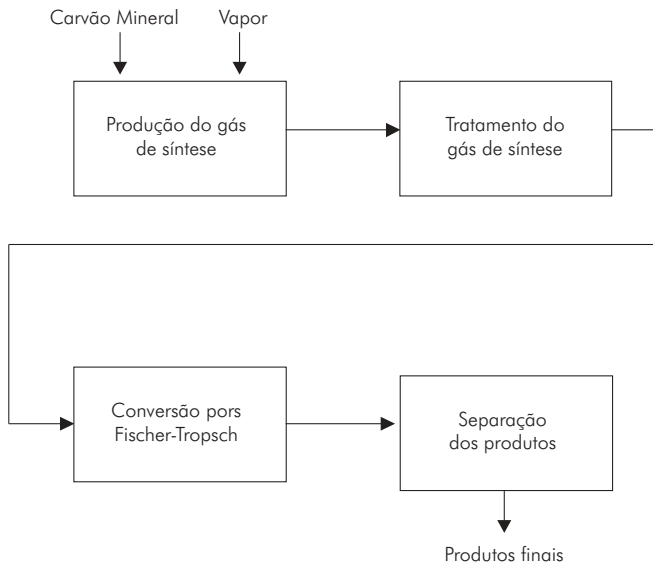
Estados Unidos e Japão têm implementaram programas de pesquisa no processo de hidrogenao do carvão, mas sem a mesma densidade do programa alemão. A avaliao de catalisadores e dos tipos de carvão disponíveis em suas jazidas constituíram a base do esforço norte-americano e japonês.

4.2.2. Desenvolvimento do processo Fischer-Tropsch

Dos três processos que constituíram a primeira trajetória tecnológica em combustíveis líquidos, a síntese por Fischer-Tropsch era o mais complexo. O processo tinha início com a passagem de vapor sobre o carvão mineral, formando a mistura de monóxido de carbono e hidrogênio, o gás de síntese. Depois de tratado, o gás de síntese era convertido em hidrocarbonetos líquidos em um reator de leito fixo, onde se encontrava o catalisador da reao. A Figura 2 apresenta o diagrama resumido do processo.

O desenvolvimento do processo teve por referência uma patente. Franz Fischer e Hans Tropsch decidiram testar a tecnologia de reduo catalítica desenvolvida pela BASF em 1913. Trabalhando no Instituto Kaiser-Wilhelm de Pesquisas em Carvão, os pesquisadores alteraram o processo variando as con-

FIGURA 2
Fluxograma simplificado do processo Fischer-Tropsch



Fonte: elaboração própria.

dições de temperatura e pressão. A primeira reação com sucesso foi realizada em 1923 e a melhor configuração foi obtida em 1928.

Após os primeiros avanços, o esforço tecnológico concentrou-se na reação de conversão, especialmente pela dificuldade de se remover a grande quantidade de calor produzida. O calor em excesso reduzia a vida útil do catalisador de níquel, o que aumentaria os custos do processo e as paradas de manutenção das plantas industriais projetadas. Ainda na Alemanha, pesquisas com pressões na faixa de 5-15 atm demonstraram um pequeno aumento na conversão do gás de síntese, quando comparada com pressões próximas à atmosférica.

Nos Estados Unidos as pesquisas no processo Fischer-Tropsch foram realizadas pelo Massachusetts Institute of Technology-MIT e pelos laboratórios do Bureau of Mines. O Bureau of Mines concentrou esforços na engenharia dos conversores, testando dois sistemas. O primeiro era um conversor com circulação de óleo que passava através de um leito fixo, utilizando catalisadores de ferro. O sistema permitia um bom controle da temperatura interna do reator,

a produção de uma variedade de produtos e um maior tempo de vida útil. No segundo tipo de conversor, de leite fluidizado, o gás de síntese era borbulhado através de uma massa de catalisador em rápida circulação, sendo utilizado um óleo não volátil para a remoção do calor da reação. Ambos os reatores operavam entre 20-40 atm, com uma temperatura máxima de 315C. Os sistemas representavam um importante avanço em relação aos caros sistemas alemães de refrigeração externa, que limitavam as taxas de conversão de gás de síntese em produtos.

No Japão as pesquisas no processo Fischer-Tropsch concentraram-se numa pequena planta-piloto, de 200kg/da. Sua capacidade de produção nunca passou de 30%. Os engenheiros japoneses identificaram problemas com o catalisador de níquel-cobalto e com o sistema de controle da temperatura de reação. Sem conseguir superar estes problemas na fase piloto, os japoneses decidiram concentrar os esforços no processo LTC.

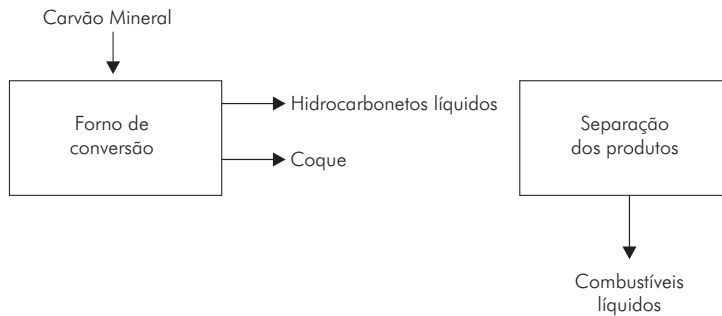
4.2.3. Desenvolvimento do processo LTC (Low Temperature Conversion)

Das três tecnologias de conversão, a LTC era a mais simples e antiga, não requerendo catalisadores e dispendiosos equipamentos de alta pressão. De fato, a tecnologia LTC não representava um processo sinttico, mas sim a decomposição térmica do carvão na ausência de ar, a cerca de 500-700C. Os produtos resultantes eram o coque e hidrocarbonetos líquidos, além de diversos gases. A Figura 3 apresenta o fluxo do processo.

No Japão, os estudos na tecnologia LTC tiveram início em 1921, como parte do programa geral do Instituto Imperial de Pesquisas em Combustíveis, em Kawaguchi. A decisão fundamentava-se no fato de que o processo LTC apresenta os menores requisitos tecnológicos entre os processos de produção de combustíveis sintéticos. O custo do capital investido também era menor. Uma planta de LTC custava entre 1/5 e 1/7 do custo de construção de uma planta Fischer-Tropsch de mesma capacidade. Entretanto, o processo LTC  o que apresentava o menor rendimento de hidrocarbonetos líquidos, cerca de 6% a 10%.

Apesar das limitações, o processo LTC tornou-se o de maior sucesso no Japão, produzindo mais combustíveis líquidos do que os processos de

FIGURA 3
Fluxograma simplificado do processo de conversão
do carvão mineral a baixas temperaturas



Fonte: elaboração própria.

hidrogenação e Fischer-Tropsch juntos. A maior parte das plantas utilizava fornos desenvolvidos na Alemanha, especialmente os das Lurgi Spiilgas e Thyssen. Os engenheiros japoneses também desenvolveram um projeto de forno, com orientação horizontal e contínuos. Apesar de terem sido utilizados em plantas comerciais, os fornos japoneses nunca funcionaram de forma satisfatória. A razão do sucesso dos fornos alemães deve-se muito mais ao projeto e à construção dos equipamentos do que da orientação da queima. Os modelos japoneses demandavam por mais tempo de manutenção do que os dos alemães, ocasionando perdas de processo.

Estados Unidos e Alemanha não implementaram programas de pesquisa significativos no processo LTC.

4.3. As razões para o encerramento das atividades de P&D em combustíveis sintéticos

Apesar de todos os esforços para o desenvolvimento e aperfeiçoamento dos processos de produção de combustíveis sintéticos, estes ainda eram mais caros do que os combustíveis derivados do refino do petróleo. Os processos de obtenção de combustíveis sintéticos possuíam viabilidade técnica relativa, uma

vez que a eficiência da produção era menor do que as expectativas teóricas. Os problemas estavam relacionados ao projeto dos equipamentos e ao uso de catalisadores.

A sustentação desta indústria deu-se em função dos elevados dispêndios estatais, seja para a instalação dos ativos fixos ou para cobrir os custos de operação. A medida se justificava pelo esforço de guerra, quando os embargos navais impediam o acesso ao petróleo bruto. Em tempos de paz tais dispêndios passaram a não se justificar economicamente. Os efeitos da guerra foram decisivos para o fechamento das unidades industriais, seja por motivos físicos ou por razões políticas.

Com a eminência da Guerra Fria e a divisão da Alemanha em dois blocos, os países aliados, especialmente os Estados Unidos, pressionaram pelo fechamento das unidades que ainda tinham condições de operar. No Japão, as instalações de P&D e as unidades industriais foram devastadas pelos bombardeiros aliados, sem que o país possuísse expectativas de retomar as atividades no curto ou médio prazo. Nos Estados Unidos, a indústria petrolífera americana via nas tecnologias alternativas uma ameaça aos seus negócios, o que culminou em pressões políticas que levaram ao encerramento das atividades em combustíveis sintéticos.

4.4. A experiência sul-africana em combustíveis sintéticos: a transição entre a primeira e a segunda trajetória tecnológica em combustíveis sintéticos

Os esforços da África do Sul em viabilizar a exploração do carvão mineral datam de 1938, quando Etienne Rousseau assumiu o cargo de engenheiro de pesquisas da South African Torbanite Mining and Refining Company (SATMAR), com a missão de viabilizar a produção de combustíveis sintéticos. Rousseau acreditava que era necessário investigar o desenvolvimento obtido pelos alemães no processo Fischer-Tropsch, o que culminou com a obtenção da licença de uso do processo de produção de gás de síntese e de conversão via Fischer-Tropsch, tendo-se como insumo o carvão mineral. Fisher visitou a África do Sul em 1938 para auxiliar a implantação do empreendimento. No entanto, a Segunda Guerra Mundial interveio nos planos, adiando a realização dos

investimentos programados (Historical Overview of the South African Chemical Industry 1896-1998).

Em 1947 o governo sul-africano retomou o programa de produção de combustíveis sintéticos com a publicação do *South Africa's Liquid Fuel and Oil Act*, estabelecendo as diretrizes da política energética do país. Foi criado um órgão estatal (Liquid Fuel and Oil Industry Advisory Board) para o controle e implementação do objetivo de tornar o país auto-suficiente em insumos energéticos. Três anos depois, foi fundada a empresa responsável pela produção dos combustíveis sintéticos, a South African Coal, Oil and Gas Corporation Limited (Sasol), tendo como um de seus mentores Etienne Rousseau.

O objetivo do governo sul-africano na produção de combustíveis sintéticos era transpor as dificuldades econômicas geradas pela importação de petróleo e derivados. Não havia nesse caso qualquer relação com esforço de guerra. A implantação de unidades que utilizassem o processo Fischer-Tropsch justificava-se pela experiência internacional já desenvolvida. A África do Sul não possuía reservas relevantes de óleo cru que fossem capazes de suprir as demandas internas do país mas detinha em seu território uma abundante reserva de carvão mineral, o que reforçava o argumento em favor dos combustíveis sintéticos.

A primeira planta industrial, localizada no norte do país, na cidade de Sasolburg, teve sua construção iniciada em 1951. Após quatro anos de construção, a unidade Sasol I tinha capacidade para produzir 5.600 barris/dia de combustíveis sintéticos a partir de carvão mineral. A unidade utilizava catalisadores de ferro-cobalto e reatores de leito fixo, que operavam a baixas temperaturas. Além de combustíveis sintéticos, a unidade produzia amônia, monômeros de estireno e butadieno e solventes para tintas. (www.sasol.com.br)

No final da década de 1960 o governo sul-africano busca diversificar sua atuação, iniciando as operações de importação e refino do óleo cru, uma vez que os baixos preços do petróleo internacional tornavam a produção de combustíveis sintéticos pouco viável economicamente. Entretanto, a crise do petróleo de 1973, desencadeada pela Organização dos Países Produtores de Petróleo (OPEP), foi uma oportunidade para que o governo sul-africano direcionasse todos os esforços na produção de combustíveis sintéticos. Cabe mencionar ainda que a África do Sul passava por fortes restrições ao comércio internacional durante a década de 1980, em vista o embargo econômico imposto pelas Organizações

das Naoes Unidas ao regime do *apartheid*. A situaao política também colaborou com a decisão de produzir combustíveis sintéticos.

Assim, em 1976, teve início a construçao da segunda planta de conversão, a Sasol II. A planta, localizada em Mpumalanga, Secunda, foi concluída em 1980. Antes do término da construçao da Sasol II, foi iniciada a montagem da Sasol III, com a mesma tecnologia da unidade anterior e também localizada no complexo industrial de Secunda. A Sasol III entrou em operaao em 1982. A capacidade das unidades Sasol II e III soma 124.000 barris/dias e ambas as plantas utilizavam carvão mineral como matéria-prima do processo (Corke, 1998; Rahmim, 2005).

5. Segunda trajetória em combustíveis sintéticos

5.1. O início da segunda trajetória em combustíveis sintéticos

Além da Sasol, uma segunda empresa estatal de produçao de combustíveis líquido foi criada, em 1987, na África do Sul, a Mossgas. A empresa tinha como objetivo utilizar as reservas disponíveis de gás natural, produzindo combustíveis sintéticos e álcoois. A planta justificava-se pelas previsoes pessimistas quanto ao preço futuro do petróleo. A unidade de conversão de gás natural em combustíveis sintéticos foi construída na região de Mossel Bay, tendo suas atividades iniciadas em 1993. A planta tem capacidade para produzir cerca de 22.500 barris/dia de gasolina e diesel (Corke, 1998).

A passagem da primeira trajetória para a segunda só foi possível em funao dos investimentos em P&D e da capacitaao técnica da Sasol. A Sasol desenvolveu duas novas geraoes de reatores Fischer-Tropsch. A evoluao tecnológica teve como objetivo principal a reduao dos custos do capital, além de melhorias no controle operacional das unidades, especialmente no que se refere  temperatura de refrigeraao do reator (Corke, 1998; Bakhtiari, 2001)

A segunda planta comercial utilizando o gás natural como insumo foi construída pela Shell em 1993, em Bintulu, na Malásia. A Shell manteve atividades em P&D em tecnologias Fischer-Tropsch desde o final dos anos 1940, o que levou ao desenvolvimento da tecnologia SMDS (Shell Middle Distillate Synthesis) voltada para a produçao de destilados médios, principalmente que-

rosene e solventes. A planta caracterizava-se por uma grande flexibilidade quanto aos produtos, variando entre nafta, óleo diesel, querosene, solventes, gasolina e até mesmo graxas refinadas. Com capacidade de 12.500 barris/dia, a planta teve suas atividades encerradas em dezembro de 1997, em função de uma explosão ocorrida na unidade de separação de ar. A unidade foi reconstruída e vem operando normalmente desde o ano 2000, produzindo 12.000 barris/dia de produtos especiais (Hartog, 2001).

Além das plantas já citadas, outras unidades de produção de combustíveis sintéticos a partir de gás natural estão em operação ou tiveram seus projetos anunciados. A Tabela 1 apresenta um resumo dos principais empreendimentos.

TABELA 1
Plantas e projetos de produção de combustíveis sintéticos

Plantas/Projetos	Localização	Capacidade (em barris/dia)	Observações
Sasol I	Sasolburg África do Sul	5.600	Construída em 1955 Insumo: carvão
Sasol II e III	Secunda África do Sul	124.000	Construídas em 1980 Insumo: carvão
Mossgas	Mossel Bay África do Sul	22.500	Construída em 1993 Insumo: gás natural
Shell MDS	Bintululu Malásia	12.000	Reformada em 2000 Insumo: gás natural
Consórcio Sasol, Chevron e Texaco	Escravos Nigéria	34.000	Prevista para 2006 Insumo: gás natural
Consórcio Sasol e Chevron	Rås Laffan Qatar	33.700	Prevista para 2006 Insumo: gás natural

Fonte: Corke, 1998; Hartog, 2001; Rahmim, 2005.

5.2. O novo ambiente de seleção

A segunda trajetória tecnológica em combustíveis sintéticos é moldada por um novo ambiente de seleção. Seis são os fatores que delimitam este novo ambiente: 1) aumento das reservas de gás natural; 2) existência de reservas de gás irrecuperáveis com as atuais tecnologias; 3) aumento da demanda por flexibilidade no transporte do gás natural; 4) aumento da demanda por flexibilidade na cadeia de insumos energéticos; 5) recrudescimento da legislação ambiental na atividade de exploração; 6) restrições ambientais quanto à qualidade dos combustíveis (Dunham *et al.*; 2002).

Após o primeiro choque do preço do petróleo ocorrido em 1973, um grande esforço mundial tem sido observado na descoberta de novas fronteiras exploratórias, alternativas aos grandes produtores do Oriente Médio. O esforço na busca de reservas alternativas para o petróleo árabe teve um grande impacto no aumento das reservas provadas de gás, que saltaram de 84,4 trilhões de m³, em 1980, para 175,5 trilhões de m³, em 2003. A relação reservas/produção aumentou de 58 anos, em 1980, para 67 anos, em 2003 (British Petroleum, 2005).

Apesar do aumento das reservas provadas de gás, várias destas reservas são consideradas irrecuperáveis com as tecnologias convencionais de aproveitamento, em especial o transporte por gasodutos ou a liquefação do gás natural. As tecnologias tradicionais requerem altos investimentos em ativos fixos, que só se justificam se associados com elevados volumes de gás natural. As tecnologias de conversão de gás natural em combustíveis sintéticos podem representar uma oportunidade para o aproveitamento destas reservas. Pequenas plantas Fischer-Tropsch embarcadas podem ser deslocadas entre os campos produtores, reduzindo o volume de investimentos e a especificidade dos ativos (Relatório IEA – 1994).

A trajetória tecnológica de transporte do gás natural por dutos ou via cadeia do gás natural liquefeito (GNL), caracterizada pela exploração de economias de escala, gera uma grande rigidez na interação entre os agentes econômicos. Os gasodutos, plantas de liquefação e navios metaneiros representam ativos específicos na medida em que são dedicados a transações econômicas bastante particulares. As decisões dos agentes operacionais e investidores dão-se em

um contexto marcado pela interdependência. A construção de um equilíbrio operacional e econômico ao longo de toda a cadeia do gás natural demanda da existência de algum tipo de coordenação que viabilize a operação desse conjunto de atividades. Nesse contexto, a de conversão química do gás natural em combustíveis sintéticos representa uma opção relevante. A possibilidade de transportar um líquido estável permite a utilização de toda a infraestrutura já existente para petróleo e derivados, com a redução dos custos de transação (Peebles, 1980).

Flexibilizar a transformação do gás natural também cria novas oportunidades para as empresas de energia, permitindo operar com um conjunto de recursos e mercados muito mais amplo. Uma carteira de ativos (reservas e plantas) com capacidade de adaptação às mudanças no ambiente de negócios é um fator altamente desejável. A tecnologia de conversão do gás natural em combustíveis sintéticos abre caminhos para realizar a mediação entre os recursos disponíveis e a demanda existente de energia (Hill, 1998).

Tanto a queima quanto a ventilação do gás natural representam significativos impactos ao meio-ambiente. O gás não aproveitado é uma importante fonte de emissão de gás carbônico, contribuindo para o efeito estufa. Estes problemas ambientais têm impulsionado vários países a adotarem restrições à ventilação e à queima do gás associado. Um importante estímulo foi dado pelo Protocolo de Kioto, assinado em 1998, e que condenou o crescimento das emissões de carbono na atmosfera (Dunham *et al.*, 2002; Shell Gas&Power, 2002).

As restrições ambientais impostas à qualidade dos combustíveis são outro parâmetro de formação de um ambiente de seleção favorável aos processos de produção de combustíveis sintéticos. Em função dos problemas ambientais nas grandes cidades, verifica-se uma mudança no padrão de comportamento dos governos e das agências ambientais quanto ao padrão de qualidade dos combustíveis. Há todo um esforço no sentido de se estabelecerem especificações que reduzam os efeitos maléficos do uso dos combustíveis fósseis. Os produtos sintéticos obtidos a partir do gás natural são mais limpos do que os derivados de petróleo e podem atender esta demanda por qualidade. Os contaminantes de enxofre, por exemplo, podem ser removidos mais facilmente do gás natural do que no petróleo cru (Snyder, 2000).

5.3. O novo desafio dos programas de pesquisa tecnológica

Os programas de pesquisa que caracterizam a segunda trajetória tecnológica em combustíveis sintéticos são diferentes dos programas implementado na primeira trajetória. O uso do gás natural como insumo altera o conjunto de tecnologias capazes de responder às novas demandas do novo ambiente de seleção. O processo Fischer-Tropsch desponta como a tecnologia capaz de oferecer as melhores respostas ao novo ambiente de seleção, mas o enfoque dos programas de pesquisa nesta tecnologia difere entre as duas trajetórias.

O enfoque dos programas de pesquisa da segunda trajetória está na etapa de produção do gás de síntese. Os esforços de P&D estão concentrados na redução dos custos de capital das unidades de gás de síntese. As plantas de geração de gás de síntese correspondem a cerca de 50% dos custos de capital das unidades de produção de combustíveis líquidos (Dybkjaer, 1982). Reduzir os custos de capital aumenta a viabilidade econômica das novas plantas, permitindo a difusão da tecnologia em larga escala.

Diversas tecnologias de geração de gás de síntese estão sendo estudadas nos programas de pesquisa das empresas e instituições. As tecnologias mais representativas e as empresas que as desenvolvem são apresentadas na Tabela 2.

Existem programas de P&D específicos para o desenvolvimento de plantas embarcadas, de pequena escala (de 2.000 a 10.000 barris/dia). A Syntroleum tem destinado esforços de pesquisa neste campo (Schubert *et al.*, 2001; Agee, 1999).

Adicionalmente ao uso do processo Fischer-Tropsch, o gás natural abre a oportunidade da sua conversão direta em produtos de interesse, sem a necessidade da produção do gás de síntese como intermediário. O processo de conversão direta do gás natural em combustíveis sintéticos apresenta as melhores perspectivas de longo prazo pois reduz significativamente os custos de capital das unidades. O desafio da tecnologia de conversão direta do gás natural está no desenvolvimento dos catalisadores do processo (Dunham *et al.*, 2003; Hill, 1998; Voss, 2002).

TABELA 2
Tecnologias de geração de gás de síntese e as principais empresas/instituições que as desenvolvem para uso em processos de combustíveis líquidos

Tecnologia	Empresas e Instituições
Reforma por vapor do metano	Foster Wheeler Corp., Haldor Topsoe AS, Kinetics Technology International BV, Lurgi AG e Uhde GmbH
Oxidação parcial	Royal Dutch Shell e Texaco Inc.
Oxidação parcial catalítica	Haldor Topsoe AS
Reforma autotérmica	Haldor Topsoe AS, Luigi AG e Syntroleum
Reforma por membrana catalítica	Primeiro consórcio de pesquisa: Air Products, ARCO, Ceramatec, Eletron Research, Agonne National Laboratory, McDermott Technology, Babcock&Wilcox, Chevron, Norsk Hydro, Pacific Northwest National Laboratory, Pennsylvanic State University e University of Alaska
Geração de gás de síntese por reator de plasma	Segundo consórcio de pesquisa: BP-Amoco, Praxair, Statoil, Philips Petroleum e Sasol. Thermal Conversion Corp

Fonte: Arnonne, 2002; Bennett & Dyer, 2000; Blutke, Bohn & Vavruska, 1999; Corke, 1998; Parkyns, Warburton & E. Wilson, 1993; Rostrup-Nielsen, 1993, 2000; Zaman, 1999; Wakatsuki, 2001; Wilhelm *et al.*, 2001.

6. Análise das duas trajetórias tecnológicas em combustíveis sintéticos

Conforme o ferramental teórico construído, as trajetórias tecnológicas se caracterizam em função dos programas de pesquisa e do ambiente de seleção que as delimita. Avançar ao longo de uma trajetória significa reduzir o desequilíbrio entre a dimensão técnica e a dimensão econômica das tecnologias em investigação.

A primeira trajetória é delimitada por um ambiente de seleção que restringia o acesso ao petróleo bruto. Os países não produtores, como a Alemanha e o Japão, sofriam efeitos negativos em suas balanças comerciais. A falta de uma fonte própria de energia limitava o crescimento econômico e colocava em risco o abastecimento das forças militares. Para os países produtores, com destaque para os Estados Unidos, as perspectivas de médio prazo apontavam para escassez de petróleo. Em ambos os casos, a falta de petróleo comprometia a economia e até mesmo a soberania dos Estados Nacionais. O início da Segunda Guerra leva o ambiente de seleção ao extremo, justificando fortes investimentos nas tecnologias e nos subsídios para tornar viável a produção de combustíveis sintéticos.

Os programas de pesquisa da primeira trajetória em combustíveis sintéticos tinham como objeto o estudo de equipamentos, processos de alta pressão e catalisadores. A base científica era a cinética das reações e as ciências dos materiais. O objetivo era o desenvolvimento de processos mais eficientes e menos dispendiosos. Os processos de hidrogenação, Fischer-Tropsch e LTC representavam as melhores alternativas para responder à demanda por combustíveis líquidos.

Terminada a Segunda Guerra, a primeira trajetória tecnológica em combustíveis sintéticos também se encerra. O retorno à normalidade econômica, as pressões políticas contras os processos sintéticos e a descoberta de novos campos exploratórios impedem a manutenção dos esforços em P&D. Assim, a primeira trajetória não chegou a contestar o refino do petróleo como solução dominante para a produção de combustíveis líquidos. A primeira trajetória este restrita às décadas de 1930 e 1940, coexistindo com a trajetória dominante (o refino do petróleo).

A formação de um novo ambiente de seleção traz de volta o interesse por combustíveis sintéticos. Os fatores que delimitam este novo ambiente são: o aumento das reservas de gás natural, a existência de reservas irrecuperáveis pelas atuais tecnologias, o aumento da demanda por flexibilidade na cadeia de transporte do gás e nas cadeias de insumos energéticos, as restrições ambientais na queima do gás e a exigência de altos padrões de qualidade dos combustíveis.

O interesse por combustíveis sintéticos também traz de volta o processo Fischer-Tropsch à pauta de discussão. Entretanto, a análise do renascimento do interesse pelo processo Fischer-Tropsch, agora a partir do gás natural, demonstra

a existência de uma nova trajetória tecnológica e não a retomada da trajetória anterior.

A segunda trajetória traz diferenças no ambiente de seleção e no conjunto de programas de pesquisa. O processo Fischer-Tropsch é comum a ambas as trajetórias, mas uso do gás como matéria-prima alterou significativamente o objeto de estudo. O atual interesse não está mais no processo Fischer-Tropsch em si, tal como ocorria na primeira trajetória. O programas de pesquisa da segunda trajetória dedicam esforços na etapa de produção do gás de síntese. O objetivo é reduzir o custo do capital investido, assegurando a viabilidade econômica da tecnologia. O uso do gás abre oportunidade para o desenvolvimento de processos de conversão direta do gás natural para combustíveis sintéticos, o que seria uma inovação radical em relação ao processo Fischer-Tropsch. O objeto das pesquisas em conversão direta é o desenvolvimento de catalisadores específicos e de alto rendimento. Em função destas duas frentes de pesquisa (produção do gás de síntese e conversão direta), a base científica é bastante diversificada.

A análise comparativa do ambiente de seleção das duas trajetórias tecnológicas permite verificar a restrição ao uso do petróleo bruto como fonte de energia. A restrição ao uso de matérias-primas é um dos fatores de indução de inovações segundo a abordagem de Rosenberg (1976) e é aplicável em ambas as trajetórias. Entretanto, foi a disponibilidade de matérias-primas alternativas que norteou as duas trajetórias em combustíveis sintéticos. O carvão mineral, na primeira trajetória, e o gás natural, na segunda trajetória, delimitaram os programas de pesquisa que tentavam reduzir os desequilíbrio entre os atributos técnico e econômico das tecnologias em estudo. A existência de matérias-primas alternativas não definiu qualquer das duas trajetórias, mas teve forte influência na delimitação dos programas de pesquisa.

Os desafios de cada programa de pesquisa resultam em diferenças na base científica utilizada em cada trajetória tecnológica. A primeira trajetória utilizou conhecimentos de cinética e ciência dos materiais. Na segunda trajetória, a base de conhecimentos científicos é mais larga, incluindo engenharia de equipamentos, física avançada, biotecnologia, novos materiais, catálise e outras áreas.

As duas trajetórias identificadas são distintas quanto ao esforço de reduzir o desequilíbrio existente entre a dimensão técnica e econômica, conforme o conceito apresentado por Dosi (1982). A primeira trajetória apresentou uma forte

conotaao de emergencia, ou seja, a constante necessidade de ter acesso a fontes de energia durante o período da Segunda Guerra Mundial. Neste ambiente, a viabilidade economica torna-se uma questao secundaria, sendo imperativo apenas que os processos sejam tecnicamente viaveis. Na segunda trajetoria a dimensao economica  presente pois os processos devem ser competitivos com o refino do petroleo, a trajetoria tecnologica dominante na produçao de combustiveis líquidos.

Entretanto, a segunda trajetoria tecnologica em combustiveis sinteticos rompe com a trajetoria natural de ganhos de escala (Nelson & Winter, 1977), muito presente nos processos de refino. O ambiente de seleao permite o posicionamento das tecnologias de conversao tanto para o aproveitamento de grandes reservas como de campos considerados inviaveis pelas tecnologias hoje disponiveis. A exploraao de inumeros campos de gás torna-se possivel com a construçao de pequenas plantas embarcadas. A escala das plantas apresenta-se como uma dimensao importante para o posicionamento estrategico no mercado de combustiveis líquidos sinteticos (Bomtempo, Almeida & Bicalho, 2004).

A escala das plantas  uma dimensao importante na definiçao das estrategias de pesquisa das empresas que investem na segunda trajetoria tecnologica em combustiveis sinteticos. Algumas empresas se posicionam na busca de escalas maiores, visando a reduzir o custo de produçao e justificar os investimentos exigidos. As grandes empresas de petroleo que possuem significativas reservas de gás natural (Shell e ExxonMobil, por exemplo) são as mais interessadas nas grandes escalas. Por outro lado, empresas especializadas em exploraao buscam plantas eficientes em escalas menores (abaixo dos 10.000 barris/dia), capazes de explorar um grande numero de pequenos campos de gás natural irrecuperaveis. A Tabela 3 faz uma síntese comparativa das principais características das duas trajetorias.

As duas trajetorias são distintas quanto  posicao em relaao  trajetoria dominante de obtenao de combustiveis líquidos. A primeira trajetoria surge como uma soluao de emergencia, substituindo apenas de forma localizada, no espaço e no tempo, a trajetoria dominante. A segunda trajetoria, por sua vez,  complementar  trajetoria dominante pois atende às demandas do ambiente de seleao, sem que isso signifique substituir completamente os combustiveis obtidos a partir do refino do petroleo.

TABELA 3
Quadro comparativo entre as trajetórias tecnológicas em combustíveis sintéticos

Característica	Primeira trajetória em combustíveis sintéticos	Segunda trajetória em combustíveis sintéticos
Ambiente de Seleção	Efeitos econômicos negativos na balança comercial com a importação de petróleo	Aumento das reservas de gás natural
	Soberania energética nacional	Reservas de gás irrecuperáveis com as atuais tecnologias
	Perspectiva de falta de petróleo no médio prazo	Aumento da demanda por flexibilidade no transporte do gás natural
	Falta de acesso ao petróleo cru (Segunda Guerra)	Aumento da demanda por flexibilidade na cadeia de insumos energéticos
		Recrudescimento da legislação ambiental na atividade de exploração
		Restrições ambientais quanto à qualidade dos combustíveis
Foco dos programas de pesquisa	Processos Fischer-Tropsch (conversão)	Geração de gás de síntese para o processo Fischer-Tropsch
	Hidrogenação em alta pressão	Conversão direta
	LTC	
Base científica	Cinética e ciência dos materiais	Diversificada
Matéria-prima	Carvão mineral	Gás natural
Posição em relação à trajetória dominante	Substituição temporal do refino	Complementaridade ao refino do petróleo
Atores-chave	Estados Nacionais	Empresas petrolíferas, licenciadores de tecnologia

Fonte: elaboração própria.

Finalmente, na primeira trajetória os atores chave são os estados nacionais: Alemanha, em primeiro lugar e também EUA e Japão, sem deixar de mencionar a África do Sul. Na segunda trajetória, entretanto, os atores chave são as empresas de petróleo e gás ao lado de empresas de desenvolvimento e licenciamento de tecnologia.

6. Conclusão

O desenvolvimento dos motores a combustão interna no início do século XX estabeleceu o paradigma da produo de combustíveis líquidos para abastecer os motores de combustão interna. O refino de petróleo foi a trajetória tecnológica que melhor respondeu às necessidades importas pelo paradigma, sendo ainda hoje sua principal resposta.

No artigo o conceito de trajetória tecnológica foi definido em funo do ambiente de seleo e dos programas de pesquisa. Consideramos que este conceito melhora o entendimento do mercado de combustíveis líquidos e se constitui como uma ferramenta útil às empresas e instituies que buscam alternativas energéticas aos combustíveis fósseis. A delimitao dos ambientes de seleo e dos programas de pesquisa permite uma visão mais clara das oportunidades e limitaes para as estratégias de negócios das empresas do setor.

O trabalho também demonstrou que o atual interesse pelo processo Fischer-Tropsch para a produo de combustíveis sintéticos não resgata a trajetória abandonada no pós-guerra. O conceito de trajetória tecnológica utilizado permitiu a identificao e caracterizao de duas trajetórias tecnológicas em combustíveis sintéticos, alternativas ao refino do petróleo. A identificao de duas trajetórias  relevante para a compreensão dos processos de inovao e pode ajudar a superar os gargalos tecnológicos na produo de combustíveis sintéticos. O artigo aponta para a necessidade de estudos mais aprofundados na base de conhecimento científico empregado na segunda trajetória.

Por fim, acreditamos que a clara delimitao das trajetórias tecnológicas podem ajudar as empresas que investem em combustíveis sintéticos, assim como aos formuladores de políticas de inovao para o setor.

Referências Bibliográficas

- ARGONNE NATIONAL LABORATORY, “Extracting Oxygen from Air: Argonne-Amoco Research Boost Natural-Gas Based Fuels”, disponível em: <<http://www.anl.gov>>. Acesso em: 9/10/2002.
- Bakhtiari, A.M.S., “Gas-to-Liquids: Much Smoke, Little Fire”, in *Hydrocarbon Processing*, dez, p.19-21, 2001.
- Bennett, D.; Dyer, P.N., “Ionic Transport Membrane Technology for Gas-To-Liquids Processing”, in *Air Products & Chemicals Report*, 2000.
- Blutke, A.S.; Bohn, E.M.; Vavruska, J.S., “Plasma Technology for Syngas Production for Offshore GTL Plants”, in *Managing Associated Offshore Natural Gas*, Houston, 1999.
- Bomtempo, J.V.; Almeida, E.; Bicalho, R., 2004, “The selection environment for Gas to Liquids Technology and the Technological Strategies: Challenging the Natural Trajectory”, in *International Schumpeter Society Conference*, Milão, 2004.
- British Petroleum, “Putting energy in the spotlight – BP Statistical Review of World Energy 2005”, disponível em: <<http://www.bp.com>>. Acesso: 24/2/06
- Corke, M.J., “GTL Technologies Focus on Lowering Costs”, in *Oil & Gas Journal*, set., p.71-77, 1998.
- Dosi, G., “Technological Paradigms and Technological Trajectories” in *Research Policy*, v.11, p.147-162, 1982.
- _____, “The Nature of the Innovative Process”, in *Technical Change and Economic Theory*, Londres: Printer Pub, 1988.
- Dunham, F.B., “Trajetórias Tecnológicas em Combustíveis Sintéticos: Análise dos Mecanismos de Seleção e Indução” Tese de Mestrado, Escola de Química, Rio de Janeiro: UFRJ, 2003.
- Dunham, F.B. *et al.*, “O Renascimento de uma Tecnologia Madura: O Processo Fischer-Tropsch de Conversão de Gás Natural em Combustíveis Líquidos”, in *Simpósio de Gestão da Inovação Tecnológica*, Salvador, 2002.

- , “Processos de Produção de Combustíveis Sintéticos: Análise das Trajetórias Tecnológicas”, in *Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás*, Rio de Janeiro, 2003.
- Dybkjaer, I.B.; Christensen, T., “Syngas for Large Scale Conversion of Natural Gas to Liquid Fuel”, in *Natural Gas Conversion Symposium*, Alaska, 2001.
- Enos, J., “Petroleum Process and Profits: A History of Process Innovation”, Cambridge: MIT Press, 1962.
- Freeman, C.; Perez, C., “The diffusion of technical innovation and changes of technoeconomic paradigm”, in *Conference on Innovation Diffusion*, Veneza, 1986.
- Hartog, M., “Latest Developments in GTL”, in *Hydrocarbon Asia*, out., p.46-49, 2001.
- Hill, C., “What Makes a Natural Gas-to-Liquid Fuels Project Viable?”, in *Middle East Petroleum & Gas Conference*, Dubai, 1998.
- Historical Overview of the South African Chemical Industry 1896-1998, in *Chemistry International*, v.21-03, disponível em: <<http://www.iupac.org>>. Acesso: 15/5/2003.
- Martín, J.P.G., “Tecnologías de Conversión de Gas Natural a Líquidos – Parte I: Producción de Gas de Síntesis” in *Boletín de Informaciones Petroleras*, Repsol-YPF, set., p.101-110, 2001.
- Nelson, R.R.; Winter, S.; “In Search of a Useful Theory of Innovations”, in *Research Policy*, v.6, p.36-76, 1977.
- Parkyns, N.D., Warburton, C.I., Wilson, J.D., “Natural Gas Conversion to Liquid Fuels and Chemicals: Where Does It Stand?”, in *Catalysis Today*, v.18, p.385-442, 1993.
- Peebles, M.W.H., “Evolution of the Gas Industry”, Hong Kong: The MacMillan Press LTD, 1980.
- Rahmim, I.I., “Stranded gas, diesel needs push GTL work”, in *Oil & Gas Journal*, mar., 2005.
- Rosenberg, N., “Perspectives on Technology”, Cambridge: Cambridge University Press, 1976.

- _____, “Technology Change in Chemicals: The Role of University-Industry Relations”, in *Chemicals and Long-Term Economic Growth – Insights from the Chemical Industry*, Londres: John Wiley & Sons, 1998.
- Rostrup-Nielsen, J.R., “Production of Synthesis Gas”, in *Catalysis Today*, v.18, p.305-324, 1993.
- _____, “New Aspects of Syngas Production and Use”, in *Catalysis Today*, v.63, p.159-164, 2000.
- SHELL GAS&POWER, “Gas to Liquids: Shell Middle Destillate Synthesis and the Environment”, disponível em: <<http://www.shell.com.my>>. Acesso: 20/3/2003.
- Snyder, P.V.; Russell, B. J.; Schubert, P.F., “Syntroleum Publication”, in *Clean Fuels Meeting*, San Diego, 2000.
- Stranges, A.N., “Synthetic Fuel Production in Prewar and World War II Japan: A Case Study in Technological Failure”, in *Annals of Science*, v.50, p.229-265, 1993.
- _____, “Germany’s Synthetic Fuel Industry, 1927-1945”, in Lesch, J.E., *The German Chemical Industry in the Twentieth Century*, Holanda: Kluwer Academic Publishers, 2000.
- _____, “The US Bureau of Mine’s Synthetic Fuel Programme, 1920-1950s: German Connection and American Advances”, in *Annals of Science*, v.54, p.29-68, 1997.
- Thackeray, F., “Revolutionary GTL Technology for Small Plants”, in *Oil & Gas Bulletin LNG/GTL Alert*, jul., 2003.
- Tidd, D.; Bessant, A.; Pavitt, K., *Managing Innovation*, Londres: John Wiley, 1997.
- Zaman, J., “Oxidative Processes in Natural Gas Conversion”, in *Fuel Processing Technology*, v.58, p.61-81, 1999.
- Wakatsuki, T. *et al.*, “Development of a High Efficiency GTL Process Based on CO₂ Steam Reforming of Natural Gas and Slurry Phase FT Synthesis”, in *Natural Gas Conversion Symposium*, Alaska, 2001.
- Wilhelm, D.J. *et al.*, “Syngas Production for Gas-to-Liquids Applications: Technologies, Issues and an Outlook”, in *Fuel Processing Technology*, v.71, p.139-148, 2001.