

PROCESSOS DE PRODUÇÃO DE COMBUSTÍVEIS SINTÉTICOS: ANÁLISE DAS TRAJETÓRIAS TECNOLÓGICAS

Fabício B. Dunham¹, José Vitor Bomtempo², Edmar Luiz F. de Almeida³,
Ronaldo G. Bicalho³

¹ Financiadora de Estudos e Projetos – FINEP, Praia do Flamengo, 200 – Rio de Janeiro – RJ, CEP 22.221-901, fbrollo@finep.gov.br

² Escola de Química – UFRJ, Centro de Tecnologia, Bloco E, Fundão – Rio de Janeiro – RJ, CEP 21.949-900, vitor@eq.ufrj.br

³ Instituto de Economia – UFRJ, Av. Pasteur, 250 – Rio de Janeiro – RJ, CEP 22.290-240, edmar@ie.ufrj.br, bicalho@ie.ufrj.br

Resumo – O artigo apresenta a evolução das trajetórias tecnológicas em combustíveis sintéticos. São analisados os aspectos que influenciaram o desenvolvimento dos processos pioneiros de produção ao longo da Segunda Guerra Mundial, bem como os motivos que levaram ao encerramento da primeira trajetória tecnológica. Também são apontadas as razões que trazem o processo Fischer-Tropsch de volta à pauta dos programas de P&D das empresas petrolíferas e dos licenciadores de tecnologia. Por fim, são avaliados os desdobramentos desta nova trajetória tecnológica, bem como suas distinções em relação à anterior.

Palavras-Chave: trajetória tecnológica; gás natural; combustíveis sintéticos; Fischer-Tropsch; gás de síntese

Abstract – This paper describes the evolution of the technological trajectories on synthetic fuels. What has influenced on the development of the first production process during the Second World War was analyzed, as well as, the causes of the first technological trajectory ending. It also shows the reasons of returning of the Fischer-Tropsch process to the petroleum companies' and technology licensors' R&D programs. At last, the consequences of the new technological trajectory and its differences regarding to the previous one were analyzed.

Keywords: technological trajectory; natural gas; synthetic fuels; Fischer-Tropsch; synthesis gas

1. Introdução

O desenvolvimento dos motores a combustão interna no início do século XX trouxe uma ruptura com a fonte de energia até então utilizada nas máquinas a vapor, o carvão mineral. Além dos inúmeros benefícios, o uso dos motores modernos gerou a rígida necessidade de combustíveis líquidos para o seu funcionamento.

Neste contexto, aplica-se o conceito de paradigma tecnológico desenvolvido por Dosi (1988). O paradigma tecnológico pode ser interpretado como o modelo de um problema ou questão técnico-científica que define as oportunidades tecnológicas para as futuras inovações, com a canalização dos esforços de solução em certa direção, gerando opções excludentes¹.

As trajetórias tecnológicas, tema amplamente discutido por diversos autores (Utterback, 1994; Dosi, 1988; Nelson e Winter, 1977; Sahal, 1981), são as atividades do progresso técnico realizadas através das opções excludentes, tecnológicas e econômicas, definidas pelo paradigma. Para a produção de combustíveis líquidos, os processos de refino e acabamento do petróleo cru foram os pioneiros no atendimento às necessidades em curso, constituindo até hoje a trajetória tecnológica dominante. Entretanto, fatores econômicos e institucionais são importantes parâmetros de seleção dos programas de pesquisa e desenvolvimento (P&D) a serem implementados, sendo fundamentais para a definição dos recursos financeiros, materiais e humanos alocados no esforço tecnológico. Entre outros, estes fatores definem o ambiente de seleção das diferentes trajetórias tecnológicas.

Com o início da Segunda Guerra Mundial, uma nova trajetória passa a desafiar o refino do petróleo como tecnologia dominante. Diferentes programas de P&D resultam em processos de obtenção de combustíveis sintéticos², obtidos por insumos que não o óleo cru. Esta nova trajetória torna-se de fundamental importância para a Alemanha e Japão, países que não possuem jazidas de petróleo em seus territórios e durante o conflito sofreram forte embargo comercial dos países aliados. À exceção do caso Sul-Africano, a inviabilidade econômica dos processos foi decisiva para o encerramento desta trajetória no período do pós-guerra.

Mais uma vez, fatores econômicos e institucionais, ainda que absolutamente diversos dos experimentados ao longo da Segunda Grande Guerra, trazem de volta o interesse em processos de obtenção de combustíveis sintéticos, deflagrando uma nova trajetória tecnológica. Disponibilidade de reservas de gás natural, recrudescimento da legislação ambiental e a demanda por flexibilidade no transporte do gás natural têm sido os principais fatores para tal. Não obstante, esta segunda trajetória tecnológica em combustíveis sintéticos traz à pauta novos atores e programas de P&D.

Dessa forma, o objetivo do presente trabalho é identificar as características das duas trajetórias em combustíveis sintéticos, assim como os seus elementos críticos.

2. A Trajetória Tecnológica Dominante em Combustíveis Líquidos – O Refino do Petróleo

No final do século XIX, as necessidades de insumos energéticos eram supridas basicamente pela utilização do carvão mineral, atendendo plenamente ao uso doméstico (especialmente nos países mais frios, para a calefação) e industrial (em sua maior parte através da queima e produção de vapor). Entretanto, o processo de urbanização e industrialização da Europa no início do século XX tornou necessária a substituição do carvão por fontes energéticas mais eficientes e limpas. Os combustíveis líquidos derivados do petróleo atendiam plenamente aos requisitos estabelecidos, possibilitando o desenvolvimento de novos motores de combustão interna, especialmente os que operavam através do ciclo Otto e Diesel (Stranges, 1997).

Como resultado da transformação, o emprego dos motores em carros, aviões e navios, traz consigo um novo paradigma tecnológico para o setor energético: a obtenção de combustíveis líquidos (gasolina, óleo Diesel, querosene e óleo combustível). A trajetória tecnológica que predomina na solução do problema definido pelo paradigma é o refino e processamento do petróleo. Neste sentido, as primeiras décadas do século XX foram importantes para o aperfeiçoamento da indústria de refino, com o desenvolvimento de uma sólida curva de aprendizado tecnológico. Sua importância também pode ser associada ao desenvolvimento da trajetória natural de ganhos de escala, reduzindo os custos de investimento/operação e criando fortes barreiras à entrada.

Do ponto de vista técnico-científico, a essência da trajetória tecnológica do refino é o uso dos conhecimentos de termodinâmica em sistemas líquido-líquido para a separação física das moléculas de hidrocarbonetos em diferentes faixas de peso molecular. A separação é possível uma vez que a temperatura de ebulição e o peso molecular estão relacionados. O desenvolvimento das técnicas de separação envolveu uma substancial evolução dos equipamentos de refino, possibilitando maior controle dos processos e produtos de melhor qualidade.

¹ O termo “opções excludentes” será utilizado neste trabalho com o mesmo significado da expressão inglesa *trade-off*.

² De fato, o uso do termo “combustíveis sintéticos” é uma impropriedade. Como será visto ao longo do texto, nos processos LTC e de hidrogenação do carvão não há nenhuma síntese química. Entretanto, com vista a facilitar o entendimento do leitor, o termo será utilizado ao longo do trabalho em contraposição aos combustíveis derivados dos processos tradicionais de refino do petróleo.

3. Primeira Trajetória Tecnológica em Combustíveis Sintéticos

Apesar dos benefícios técnicos, a crescente dependência do petróleo como insumo energético provocou impacto negativo na balança comercial dos países que não dispunham de fontes naturais de óleo cru. Países como a Alemanha e o Japão, em fase crescente dos níveis de industrialização, foram significativamente afetados. Não obstante, a dependência de fontes externas de energia expunha estes países à falta de controle sobre suas economias e forças militares, de forma que o assunto se tornava não mais uma questão energética, mas sim de soberania nacional.

De fato, os países mais dependentes do petróleo externo dispunham sobre o seu domínio de reservas consideráveis de carvão mineral, largamente utilizado como fonte energética antes do novo paradigma tecnológico. Verifica-se então todo um esforço no sentido de aproveitar o carvão como principal fonte de carbono para a obtenção de combustíveis líquidos. A Alemanha foi o país pioneiro nas atividades de P&D em combustíveis sintéticos, contando com forte aporte de recursos estatais. Ao assumir o poder, o regime Nazista impulsionou ainda mais a indústria de combustíveis sintéticos, cujo sucesso era imperativo para viabilizar o plano de expansão militar do país.

Nasce então uma nova trajetória tecnológica, cujo objetivo era o aproveitamento e a transformação do carvão mineral em combustíveis líquidos sintéticos, que possibilitassem a manutenção dos suprimentos de insumos energéticos para a indústria e principalmente para o abastecimento das forças armadas. Os desdobramentos das atividades de P&D resultaram em três novos processos: conversão do carvão a baixa temperatura (*low temperature conversion* – LTC), hidrogenação do carvão e o processo Fischer-Tropsch (Stranges, 1997).

O processo LTC consistia basicamente no craqueamento não catalítico do carvão, na ausência de ar, a cerca de 500-700°C. Apesar de ser um dos processos tecnicamente mais simples, os rendimentos e qualidade dos produtos não justificavam os baixos custos de capital e de operação. A hidrogenação do carvão, processo desenvolvido pelo alemão Friedrich Bergius entre 1910 e 1925, foi bastante estudado durante as duas grandes guerras mundiais. O processo consistia na mistura do carvão pulverizado com um solvente adequado que, em um reator a alta pressão e a cerca de 400°C, era hidrogenado e se decompunha nos produtos de interesse.

O mais complexo dos processos, que ficou conhecido pelo nome dos seus idealizadores, os alemães Franz Fischer e Hans Tropsch, consistia na geração de uma mistura gasosa de hidrogênio (H_2) e monóxido de carbono (CO) que, em contato com um catalisador específico em condições adequadas de temperatura e pressão, se convertia numa mistura de hidrocarbonetos líquidos. A mistura H_2 / CO, insumo da conversão catalítica, era obtida por meio da passagem de vapor d'água sobre o carvão mineral em condições controladas. Desde então, a mistura H_2 / CO passou a ser denominada de gás de síntese.

O ponto central do processo Fischer-Tropsch estava relacionado à engenharia dos equipamentos, uma vez que a conversão do gás de síntese em hidrocarbonetos é altamente exotérmica. Dessa forma, o desenho de novos formatos de reatores e sistemas de resfriamento ditava o interesse das equipes de P&D. Não menos importante, a obtenção de catalisadores de alta eficiência era outro ponto central no sucesso do processo.

A nova trajetória tecnológica tem por referência o uso de conhecimentos básicos diferentes daqueles empregados nos processos de refino do petróleo bruto. Os processos de hidrogenação e Fischer-Tropsch têm sua base científica no estudo da cinética química, cujo entendimento permite avanços na configuração dos melhores catalisadores e parâmetros de processo. Além disso, para o desenvolvimento dos catalisadores, cujas estruturas são formadas por elementos metálicos, os grupos de pesquisa necessitavam de conhecimentos sólidos em química inorgânica e em ciência dos materiais.

Os avanços mais significativos foram obtidos por Alemanha, Japão e Estados Unidos, que além das atividades de P&D tiveram unidades piloto e comerciais em funcionamento. Entretanto, apesar dos intensos e significativos esforços de P&D nos três novos processos de conversão de carvão em combustíveis líquidos, todos se mostravam inviáveis do ponto de vista econômico. Os avanços experimentais e a implementação de unidades produtivas só se justificavam pelo desenrolar da Segunda Guerra Mundial. A baixa eficiência técnica e os altos investimentos em ativos fixos não justificavam a manutenção das unidades existentes. Adicionalmente, soma-se o fato da eminência da guerra fria, que sob a pressão dos países aliados, em especial do EUA, forçou o fechamento das unidades na Alemanha. No Japão, além dos baixos índices de desenvolvimento técnico dos processos, as instalações de P&D e as unidades construídas foram devastadas pelos bombardeiros aliados, sem que o país possuísse expectativa, de curto ou médio prazo, de retomar as atividades nos processos. Nos Estados Unidos, as pressões da indústria petrolífera americana, que via nas tecnologias alternativas uma ameaça aos seus negócios, se fizeram presente na descontinuidade das atividades de P&D e das plantas-piloto, ainda que as tecnologias não tivessem sido utilizadas para substituir o refino do petróleo³

4. A Continuidade da Trajetória Tecnológica em Combustíveis Sintéticos no Pós-Guerra – O Caso da África do Sul

Os fatores apontados anteriormente, inviabilidade econômica e questões políticas, foram decisivos para a descontinuidade das atividades de P&D após a década de 1950, mesmo nos países que mais se destacaram, Alemanha,

³ Cabe destacar que os EUA não tiveram o acesso a fontes de petróleo comprometido durante a guerra, de forma que a intenção do governo americano nas pesquisas em combustíveis sintéticos era manter-se na vanguarda tecnológica.

EUA e Japão. Entretanto, um caso singular de continuidade de desenvolvimentos na trajetória tecnológica de combustíveis líquidos pode ser observado na África do Sul (Pinheiro, 2002).

O governo Sul-Africano tinha como principal objetivo a transpor as dificuldades de importação de petróleo e derivados impostas pelo embargo internacional ao país em função do regime político em vigor. Além da produção de combustíveis sintéticos, o governo desejava viabilizar a produção de insumos petroquímicos básicos, tais como solventes orgânicos, monômeros para a indústria e amônia. A implantação de unidades que utilizassem a tecnologia Fischer-Tropsch se justificava pela experiência internacional no processo. Além disso, 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. Assim, como base das diretrizes de política energética do país, foi criada em 1950 a *South African Coal, Oil and Gas Corporation Limited* – Sasol, empresa que seria responsável pela produção de combustíveis líquidos sintéticos tendo como insumo o carvão mineral.

A primeira planta industrial, localizada no norte do país, teve sua construção iniciada em 1951. Após quatro anos de construção, a unidade Sasol I utilizava catalisadores de ferro-cobalto e reatores do tipo *slurry*, que operavam a baixas temperaturas. Além de combustíveis sintéticos, a unidade produzia amônia, monômeros de estireno e butadieno e solventes para tintas.

Os baixos preços do petróleo internacional tornavam a produção de combustíveis sintéticos pouco viável economicamente, justificando a necessidade da implementação de unidades de refino. No final da década de 1960 o governo Sul-Africano buscava diversificar sua atuação, iniciando as operações de importação e refino do óleo cru. Para isto, foi criada uma nova empresa que contava com a parceria da francesa *Total* e da *National Iranian Oil Company*.

Entretanto, a crise do petróleo de 1973 fez com que o governo Sul-Africano direcionasse todos os esforços para a produção de combustíveis sintéticos. Assim, em 1976 teve início a construção da segunda planta de conversão, a Sasol II. A planta, localizada em Mpumalanga, Secunda, tinha o dobro da capacidade de produção da primeira unidade e foi concluída em 1980. Diferentemente da unidade Sasol I, a planta operava a altas temperaturas e produzia principalmente combustíveis (gasolina, óleo Diesel e óleos combustíveis). Antes do término da construção da Sasol II foi iniciada a montagem da Sasol III, com a mesma tecnologia e capacidade da unidade anterior e também localizada no complexo industrial de Secunda.

5. A Segunda Trajetória Tecnológica em Combustíveis Sintéticos

Diversos fatores econômicos e institucionais têm sido identificados como elementos impulsionadores para o renascimento dos processos de conversão como uma das alternativas disponíveis na indústria petrolífera mundial. Segundo Bomtempo et al. (2002), os principais fatores são: a) o aumento das reservas disponíveis de gás natural, b) o recrudescimento da legislação ambiental, seja quanto à queima do gás encontrado em poços associado ou quanto aos níveis de emissão de poluentes dos motores, c) o aumento da demanda por flexibilidade no transporte do gás natural. Assim, o gás natural representa a introdução de um novo insumo para os processos de produção de combustíveis sintéticos, deixando em segundo plano o uso do carvão mineral. A utilização do processo Fischer-Tropsch traz a perspectiva de resposta aos novos fatores impostos, deflagrando a segunda trajetória tecnológica em combustíveis sintéticos, através da implementação de programas de P&D bem definidos.

A concretização da segunda trajetória tecnológica em combustíveis sintéticos tem início na África do Sul, com a criação de uma empresa estatal de produção de combustíveis líquidos em 1987, a MossGas. A empresa tinha como objetivo utilizar as reservas de gás natural disponíveis, produzindo gasolina, óleo Diesel, querosene e álcoois. A planta se justificava não apenas pela existência de reservas de gás, mas também por previsões pessimistas quanto ao preço do petróleo e da possibilidade do aumento das sanções comerciais e políticas em função do regime do Apartheid. A unidade de conversão de gás natural em combustíveis foi construída na região de Mossel Bay, produzindo cerca de 34.000 barris/dia de derivados. A segunda planta comercial utilizando o gás natural como insumo foi construída pela Shell em 1993, em Bitunulu, na Malásia. Com capacidade de produzir 12.500 barris/dia, a planta teve suas atividades encerradas no ano de 1997 em função de uma explosão (Pinheiro, 2002).

Apesar de representar a atual opção técnica disponível, e de existir uma planta industrial em operação, o processo Fischer-Tropsch ainda requer avanços significativos para a viabilidade econômica dos produtos obtidos. Além disso, o uso do gás amplia a necessidade do esforço inovativo, que passa a abranger não apenas o processo de conversão do gás de síntese em hidrocarbonetos, mas especialmente a obtenção do próprio 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, sendo por isto, o ponto central dos programas de P&D de curto e médio prazo.

Pelo menos cinco tipos diferentes de processos de geração de gás de síntese estão disponíveis. Entre eles destaca-se o processo de reforma autotérmica. Sendo uma combinação de processos clássicos, a reforma por vapor e a oxidação parcial do metano, o processo ocorre na presença de catalisadores, com a utilização de vapor d'água e oxigênio, a uma temperatura de cerca de 1.000°C (Rostrup-Nielsen, 1993 e 2000; Dybkjaer e Christensen, 2001). Vários esforços tecnológicos têm sido dirigidos para o aperfeiçoamento deste processo. O principal problema técnico a ser solucionado é a geração de gás de síntese em uma relação H_2/CO igual a 2. Esta relação ideal permite otimizar o processo de conversão por Fischer-Tropsch. Apesar dos indicativos em contrário, testes utilizando insumos com baixas razões de vapor/carbono, realizados pelas empresas Haldor-Topsoe e Sasol, tiveram sucesso. Estes desenvolvimentos

umentam significativamente a eficiência global do processo, melhorando a viabilidade econômica das plantas e as perspectivas de comercialização da tecnologia por estas empresas (Jager, 2001; Dybkjaer-Christensen, 2001).

Não menos importante, a Syntroleum tem concentrado seus esforços de pesquisa para o desenvolvimento de uma tecnologia que substitui o emprego de oxigênio puro por ar atmosférico, com a redução dos custos de capital das unidades de geração de gás de síntese. Na mesma direção, a Exxon Chemical está desenvolvendo um reator de leito fluidizado para a geração de gás de síntese com a utilização de ar atmosférico (Vosloo, 2001).

Nos últimos anos, uma nova tecnologia também tem despertado atenção das empresas e pesquisadores: o processo de reforma por membrana catalítica. Esse processo guarda as mesmas características básicas do processo de reforma autotérmica. Entretanto, há a substituição da planta de suprimento de oxigênio por uma membrana seletiva a este gás, reunindo a separação de ar e a oxidação parcial em uma única operação unitária. As pesquisas têm sido conduzidas por dois consórcios de empresas. O primeiro é formado pelas empresas Air Products, ARCO, Ceramtec, Eletron Research, Agonne National Laboratory, McDermott Technology, Babcock&Wilcox, Chevron, Norsk Hydro, Pacific Northwest National Laboratory, Pennsylvanian State University e University of Alaska, com um custeio de 35% por parte do U.S. Department of Energy. O segundo é formado pelas empresas BP-Amoco, Praxair, Statoil, Philips Petroleum e Sasol. A opção pela formação de consórcios, ao invés da realização de pesquisas isoladas, indica que as empresas do setor estão dispostas a dividir o risco. O desenvolvimento dessa tecnologia é apontado como uma das rotas mais promissoras na viabilidade econômica das plantas de combustíveis sintéticos (Wilhelm, 2001).

Blutke et al. (1999) identificam ainda a produção de gás de síntese através da tecnologia de plasma, seja por meio de sistemas de arcos ou de rádio frequência. A tecnologia permitiria obter o gás de síntese na razão ideal de H_2 / CO, sem a necessidade de unidades de oxigênio.

Em contraposição ao processo Fischer-Tropsch, a tecnologia de conversão direta é a transformação do gás natural nos produtos de interesse em uma única operação unitária, sem a necessidade da geração prévia do gás de síntese. A conversão direta representa a fronteira tecnológica em curso e ainda se encontra nos estágios iniciais de P&D, uma vez que as reações envolvidas são difíceis de serem desenvolvidas quimicamente, devido à alta estabilidade da molécula de metano. O sucesso deste processo representará uma inovação radical para a produção de combustíveis sintéticos, apresentado a melhor perspectiva a longo prazo. A implementação prática destes processos propiciaria total eliminação dos custos de capital associados à construção e operação das unidades de gás de síntese, que hoje representam de 40 a 50% dos investimentos nas plantas de combustíveis líquidos (Martín, 2001).

6. Características das Trajetórias em Combustíveis Líquidos

As duas trajetórias em combustíveis sintéticos diferem significativamente em vários aspectos. Um deles diz respeito às condições de emergência, fortemente presente na trajetória tecnológica desenvolvida ao longo da Segunda Guerra Mundial. A soberania dos estados nacionais e a sustentação dos efetivos militares foram os fatores que justificaram o desenvolvimento dos esforços estatais nos programas de P&D e nos subsídios à produção de combustíveis sintéticos. Ao contrário da primeira, a nova trajetória surge como uma perspectiva de monetizar as reservas de gás natural disponíveis. Suas motivações são a possibilidade de flexibilização do transporte do gás natural, que reduz o investimento em ativos específicos e rígidos (gasodutos e plantas de gás natural liquefeito), e a perspectiva de aproveitamento de pequenos campos de gás, cuja exploração não é viável economicamente com as tecnologias anteriormente disponíveis. A perspectiva de exploração de pequenos campos traz ainda a ruptura com a trajetória natural predominante na indústria petrolífera: os ganhos de escala. Desenvolver processos que possam ser utilizados em pequena escala, através de plantas embarcadas, representa uma oportunidade significativa de aproveitamento de campos considerados irrecuperáveis para os padrões atuais.

Os processos desenvolvidos ao longo da Segunda Guerra tinham como objetivo transpor a dificuldade de importação de petróleo, imposta pelo embargo naval dos países aliados, sem que houvesse a preocupação em competir com a trajetória dominante. Entretanto, a nova trajetória em combustíveis líquidos, ainda que não conteste de forma efetiva o processo de refino, traz à pauta da indústria petrolífera mundial uma forte conotação de complementaridade. A obtenção de combustíveis de baixos teores de enxofre e essencialmente livres de compostos aromáticos se encaixa perfeitamente nas pressões dos órgãos ambientais para redução das emissões de poluentes, o que abre a oportunidade para um mercado mais nobre, e possivelmente mais rentável. Adicionalmente, a trajetória possibilita reduzir os dispêndios com as taxas impostas pela queima do gás associado, ainda que a tecnologia não seja economicamente viável em sua plenitude.

Como foi detalhado na seção anterior, a mudança da matéria-prima utilizada na produção de combustíveis líquidos traz significação alteração no foco das linhas e esforços de P&D. Diferentemente da trajetória anterior, que priorizava o processo de conversão em si, há forte concentração de esforços no desenvolvimento da etapa de geração de gás de síntese. Atualmente, a viabilidade econômica do processo Fischer-Tropsch depende do sucesso na redução do custo do capital investido nas plantas de geração de gás de síntese. A tecnologia de conversão direta representa a fronteira tecnológica, situação limite onde a geração do gás de síntese passa a ser dispensável. Adicionalmente, cabe observar que o uso do gás natural como insumo também torna sem utilidade os processos LTC e de hidrogenação do carvão, implementados com relativo sucesso na primeira trajetória tecnológica em combustíveis sintéticos.

Os aspectos enumerados estão resumidos na Tabela 1.

Tabela 1. Comparação entre as trajetórias tecnológicas em combustíveis sintéticos

Característica	Primeira Trajetória	Segunda Trajetória
Motivação	Embargo econômico	Reservas crescentes de gás natural
Situação de Emergência	Falta de acesso ao petróleo cru	Restrições ambientais
	Soberania nacional	Monetização de reservas
	Sustentação de efetivos militares	
Insumo Básico	Carvão mineral	Gás natural
Foco	Processo Fischer-Tropsch	Geração de gás de síntese
Posição em Relação à Trajetória Dominante	Não competia	Complementaridade
Atores-chave	Estados nacionais	Empresas petrolíferas Licenciadores de tecnologia

Fonte: Elaboração própria

7. Conclusão

O desenvolvimento dos motores a combustão interna no início do século XX determinou um novo paradigma tecnológico, baseado no uso de combustíveis líquidos. A evolução da indústria petrolífera foi determinante para o surgimento da trajetória tecnológica de maior sucesso: o refino do óleo cru. Apesar dos avanços técnicos, a primeira trajetória tecnológica não foi capaz de contestar o refino como a tecnologia dominante. Após atender à urgência do esforço militar, justificando os expressivos recursos estatais, os processos não se sustentaram economicamente.

Entretanto, novos aspectos institucionais e econômicos trazem de volta os programas de P&D em combustíveis sintéticos, sendo o processo Fischer-Tropsch o que apresenta as melhores condições de responder às atuais expectativas. A redução do custo do capital investido, através de melhorias técnicas nas plantas de geração de gás de síntese, passa a ser a maior perspectiva de viabilização no uso do processo. A conversão direta do gás natural a combustíveis sintéticos desponta como a situação limítrofe, onde as unidades de gás de síntese passam a ser inteiramente dispensáveis.

Ainda que não conteste o domínio do processo de refino, a nova trajetória apresenta-se como complementar a este, fornecendo combustíveis limpos e possibilitando o aproveitamento de inúmeras reservas de gás tidas como irre recuperáveis pelas tecnologias anteriores. Desta forma, a segunda trajetória tecnológica em combustíveis sintéticos também aponta no sentido contrário ao das trajetórias naturais, onde a busca por plantas de pequena escala passa a ser uma excelente alternativa.

8. Referências

- BLUTKE, ANDREAS S. et al.. *Plasma technology for syngas production for offshore GTL plants*. Managing Associated Offshore Natural Gas, 1999.
- BOMTEMPO, J. V., ALMEIDA, E. L. F., DUNHAM, F. B., BICALHO, R. G.. O renascimento de uma tecnologia madura: o processo Fischer-Tropsch de conversão de gás em combustíveis líquidos. XXII Simpósio de Gestão da Inovação Tecnológica, 2002.
- DOSI, G., *Sources, procedures and microeconomics effects of innovation*. Journal of Economic Literature, vol 26, no. 3, 1120-1171, 1988.
- DYBKJAER, I. B and CHRISTENSEN, T. *Syngas for large scale conversion of natural gas to liquid fuel*. VI Natural gas conversion symposium, Alaska, USA, june 17-22, 2001.
- JAGER, B. P. et al. *Developments in Fischer-Tropsch technology and its application*. VI Natural gas conversion symposium, Alaska, USA, june 17-22, 2001.
- MARTÍN, J. P. G.. *Tecnologías de conversión de gas natural a líquidos - Parte I: producción de gas de síntesis*. Boletín de Informaciones Petroleras. Repsol-Ypf, 2001.
- NELSON, R. et WINTER, S.. *In search of useful theory of innovation*. Research Policy, vol. 6, 1977.
- PINHEIRO, B. B.. Produção de combustíveis sintéticos a partir do gás natural: evolução e perspectivas. Monografia de bacharelado, IE-UFRJ, 2002.
- ROSTRUP-NIELSEN, J.. *New aspects of syngas production and use*. Catalysis today, 63, 2000.
- SAHAL, DEVENDRA. *Alternative conceptions of technology*. Research Policy, vol. 10, 1981.
- STRANGES, A. N.. *The US Bureau of Mines synthetic fuel programme*. Annals of Science, 1997.
- UTTERBACK, J. Mastering the dynamics of innovation. Boston, Harvard Business School Press, 1994.
- VOSLOO, ANTON C.. *Fischer-Tropsch: a futuristic view*. Fuel processing technology, n. 71, 2001.
- VOSS, D., *Hitting the natural gas*. Technology Review. January/february, 2002.
- WILHELM, D.J. et al., *Syngas production for gas-to-liquids applications: technologies, issues and a outlook*. Fuel processing technology, n.71, 2001.