

Turbina a Gás: Oportunidades e Desafios

*Ronaldo Goulart Bicalho
Edmar Luiz Fagundes de Almeida**

1 – Introdução

O lançamento do Programa Emergencial de Centrais Térmicas pelo governo brasileiro representa uma mudança radical na trajetória tecnológica do Sistema Elétrico Brasileiro; tradicionalmente hidráulico. A adesão à opção térmica, no momento atual, implica na adoção de uma dada tecnologia: a turbina a gás. Para se obter uma avaliação adequada dos impactos dessa escolha é necessário compreender o atual estágio de desenvolvimento dessa tecnologia e as expectativas acerca das melhorias e aperfeiçoamentos esperados nesse equipamento; assim como as barreiras a serem superadas na tarefa de alcançá-los.

A turbina a gás tem desempenhado um papel relevante na evolução tecnológica recente da indústria de eletricidade. As plantas que utilizam essa tecnologia de geração são mais eficientes, menos intensivas em capital e apresentam um tempo de construção menor. Além disso, são economicamente competitivas, em relação às centrais convencionais, em escalas menores e têm um desempenho compatível com a severidade crescente das normas ambientais.

No entanto, esses atributos técnico-econômicos da turbina a gás resultam, essencialmente, do desenvolvimento tecnológico passado, no qual o papel da indústria elétrica na definição da agenda de melhorias e aperfeiçoamentos desse equipamento era secundário. Na medida em que a turbina a gás assume uma nova função na geração de eletricidade, essa agenda se modifica, incorporando novos desafios tecnológicos, de natureza diversa daqueles presentes na agenda passada.

Há uma ampla gama de problemas tecnológicos que precisam ser resolvidos para que a turbina a gás possa desempenhar o papel de tecnologia principal na geração elétrica no longo prazo. A introdução da flexibilidade em relação aos seus insumos energéticos (hoje restritos, basicamente, ao gás natural), o aumento da eficiência, a redução das emissões e a manutenção dos graus de confiabilidade e disponibilidade das plantas constituem barreiras tecnológicas importantes a serem ultrapassadas. Nesse sentido, a turbina a gás é uma tecnologia em transição e não apenas uma tecnologia para a fase de transição do mercado elétrico. Este fato introduz uma incerteza significativa acerca da evolução dessa tecnologia e, portanto, sobre a evolução do mercado elétrico no longo prazo.

Desse modo, o futuro da indústria de eletricidade vai depender da evolução dos esforços inovativos que estão sendo realizados hoje para superar as barreiras vigentes para o desenvolvimento da turbina a gás. Conhecer esses esforços, sua direção e intensidade, é fundamental na delimitação não só do futuro da indústria elétrica no mundo, como também, das possibilidades e restrições ao desenvolvimento da indústria elétrica brasileira.

2 – A trajetória tecnológica tradicional da turbina a gás

O desenvolvimento tecnológico passado da turbina a gás foi marcado pelas necessidades de melhorias e aperfeiçoamentos no equipamento geradas por um grupo circunscrito de usuários tradicionais: indústria aeronáutica (civil e militar); indústria de petróleo e gás; indústria petroquímica; indústria siderúrgica, etc¹.

Em função disso, a evolução da turbina a gás, até os anos oitenta, foi fruto, essencialmente, da implementação de um programa de pesquisa tecnológica que focalizou a melhoria de certos *trade-offs* importantes para as indústrias que utilizavam, de forma relevante, esse equipamento². Esse programa de pesquisa contemplava dois atributos que tornaram essa tecnologia muito adequada ao contexto econômico-regulatório dos anos oitenta: compacidade e flexibilidade. Nessa fase, as demandas de aperfeiçoamento geradas a partir da indústria elétrica desempenharam uma função menor na definição dos itens essenciais da agenda de pesquisa tecnológica da turbina a gás³.

O ciclo combinado resultou de um longo processo de aprendizado no setor industrial e elétrico, no qual construtores e usuários incorporaram as experiências adquiridas na concepção, construção e utilização de turbinas a gás em uma ampla gama de usos. Nesse processo, a turbina a gás começou desempenhando um papel de auxiliar na melhoria do rendimento térmico do ciclo baseado na turbina a vapor e terminou como o equipamento principal⁴.

A central de geração que surge a partir desse processo de concorrência e complementaridade entre duas tecnologias apresenta atributos técnico-econômicos bastante adequados a ambientes que apresentam incerteza crescente: Compacidade: custo de capital e tempo de construção menores;

Simplicidade: custos de manutenção e operação mais baixos;

Modularidade e divisibilidade: flexibilidade na operação e expansão da atividade de geração;

Eficiência: gastos com combustíveis menores;

Limpeza e baixo impacto visual: adequação às novas e severas normas ambientais e localização facilitada junto aos centros de consumo.

É no ambiente incerto da transição da indústria elétrica - no qual o modelo antigo termina o seu ciclo de vida e o novo ensaia começar o seu - que a turbina a gás, plena de flexibilidade, irá construir a sua trajetória de expansão no coração da geração. Nesse momento, ela constitui uma resposta que se demonstra bastante adequada ao aumento da incerteza do ambiente e da complexidade das decisões relativas à expansão da indústria elétrica⁵.

No entanto, para que a turbina a gás não seja apenas uma resposta de curto prazo a um ambiente incerto, é necessário que ela desenvolva novos atributos técnico-econômicos que atendam às demandas associadas ao seu novo papel no, também novo, mercado elétrico. Esse desenvolvimento implica uma nova conformação do esforço inovativo que, agora, deve privilegiar a melhoria e o aperfeiçoamento daqueles atributos que interessam, especificamente, à indústria elétrica e, mais do que isso, a uma indústria elétrica em transformação.

3 – Os novos desafios da turbina a gás

O movimento da turbina a gás para o centro do palco das opções técnicas de geração de eletricidade representa um processo de transição no desenvolvimento desse equipamento e coloca desafios tecnológicos significativos. O deslocamento em direção à geração de base implica mudança nas condições operacionais tradicionais da turbina. Esta mudança requer a conquista de novos atributos que permitam alcançar um desempenho que a qualifique positivamente na competição com outras técnicas de geração. No entanto, a questão não se resume a uma simples troca de papéis em um quadro estático. A indústria de eletricidade se encontra no meio de um processo de transformações profundas e isto amplia o conjunto de questões tecnológicas que precisam ser enfrentadas:

- I. Eficiência: a demanda por um aumento crescente na eficiência do equipamento, por parte de um mercado gerador de eletricidade cada vez mais competitivo.

- II. Flexibilidade: a busca de uma maior flexibilidade, em termos dos combustíveis utilizados, que se constitui em uma variável chave para superar as restrições à ampla difusão dessa técnica de geração.
- III. Meio Ambiente: a necessidade de melhora crescente do desempenho ambiental para fazer face a uma regulação cada vez mais severa.
- IV. Disponibilidade/Confiabilidade: a exigência de manter os níveis de disponibilidade/confiabilidade desse equipamento, agora submetido a condições operacionais mais agressivas e extensas no tempo.
- V. Escalas: a necessidade de reduzir continuamente os patamares de escala mínima, para atender a demanda crescente de flexibilidade, sem elevar os custos.

Esse conjunto de questões apresenta uma série de *trade-offs* internos que não são de fácil solução. O avanço em cada uma dessas frentes não pode ser feito à custa do retrocesso em outras. Dessa forma, a natureza do desafio tecnológico se apresenta de forma bastante complexa. Complexidade que se traduz em termos de incerteza quanto aos resultados desse esforço inovativo, tanto no que diz respeito aos resultados técnicos quanto aos resultados econômicos.

3.1 – Os *trade-offs* principais

Quando o ciclo combinado é introduzido, de forma significativa, na geração de eletricidade, nos anos oitenta, a sua melhor eficiência, em um primeiro momento, é saudada como um avanço importante no aumento da produtividade dessa atividade⁶. Contudo, em um segundo momento, surgem fortes pressões para a melhoria dessa eficiência. Essas pressões nascem da nova configuração do mercado de geração que deixou de ser monopólio para se tornar competitivo. Nesse novo mercado, o gasto com combustível é uma variável chave no desempenho concorrencial dos geradores. Nesse sentido, uma turbina mais eficiente é um produto que leva vantagens significativas no mercado de equipamentos elétricos. Isto explica os esforços das empresas que produzem turbinas na busca da ultrapassagem da barreira dos 60 % de eficiência⁷. Alcançar esse objetivo significa adquirir uma vantagem competitiva relevante nesse mercado. Entretanto, a tentativa de acelerar o processo de aprendizado tem enfrentado problemas que acabam rebatendo sobre a confiabilidade do equipamento. Enfim, o que se ganha com a melhora projetada da eficiência se perde com a diminuição imprevista da disponibilidade real do equipamento. Em outras palavras, a nova safra de turbinas a gás acaba não apresentando o desempenho projetado⁸.

A flexibilidade no uso dos combustíveis surge como o desafio tecnológico mais importante, no longo prazo, para a difusão da turbina a gás. Em contrapartida, é aquele que apresenta maiores dificuldades de compatibilização com os outros atributos desejáveis e, por conseguinte, o que introduz as pressões mais significativas no interior da agenda de pesquisa. A flexibilidade, hoje, implica, de imediato, impactos negativos sobre a eficiência, o desempenho ambiental e a confiabilidade/disponibilidade do equipamento. Melhorar esses *trade-offs* é um esforço tecnológico de natureza totalmente distinta daquele realizado até hoje no desenvolvimento da turbina a gás. Este é um problema que se manteve praticamente fora da agenda de pesquisa, no entanto, do seu equacionamento irá depender, em grande parte, a evolução futura da turbina a gás e do mercado de geração.

A favor da flexibilidade jogam três conjuntos de pressões relevantes:

- I. A necessidade de dissociar a evolução da turbina a gás da disponibilidade do gás natural, desenhando um horizonte de uso compatível com a ampla diversidade das dotações de recursos naturais existentes;

- II. A necessidade de ampliar a utilização de combustíveis que hoje enfrentam restrições – principalmente de natureza ambiental, de tal forma a garantir, por um lado, a segurança e a continuidade do fornecimento de energia e, por outro, a melhor utilização dos recursos energéticos disponíveis e, com isso, a geração de renda e emprego associada a essa utilização;
- III. A necessidade de reduzir os riscos associados à disponibilidade de um único combustível, de maneira a ampliar a gama de opções de insumos energéticos e reduzir a dependência a uma única fonte e, portanto, a um único mercado.

O primeiro conjunto está relacionado às estratégias das empresas produtoras de equipamentos elétricos e diz respeito ao aumento da escala de produção da turbina a gás, com todos os benefícios ligados a essa ampliação. O segundo conjunto diz respeito a estratégias que nascem de políticas públicas que buscam soluções que contemplem objetivos socioeconômicos associados à segurança, ao desenvolvimento e ao bem-estar. E, finalmente, o último conjunto se refere às estratégias das empresas geradoras que resultam da tentativa de criar mecanismos que permitam lidar melhor com as incertezas e os riscos associados aos gastos com combustível, procurando, dessa forma, assegurar uma maior margem de manobra na realização das expectativas acerca da rentabilidade esperada dos seus ativos.

A conjugação desses interesses, em torno da flexibilização da turbina a gás, viabiliza a configuração de um esforço inovativo que contemple esse atributo como um objetivo a ser alcançado. Este fato introduz na agenda de pesquisa da turbina a gás um problema tecnológico cuja solução implica numa forte pressão sobre outros atributos desejáveis – principalmente eficiência e desempenho ambiental.

Os fatores importantes para a escolha das tecnologias das plantas de geração, tradicionalmente, variam em função das zonas da curva de carga em que irão operar essas plantas. O custo operacional e a confiabilidade/disponibilidade das plantas são fatores importantes para as que irão operar na base. Custo de capital e flexibilidade na partida são fatores importantes para aquelas que vão trabalhar no pico e na zona intermediária. Em geral, as tecnologias que atendem a um dos conjuntos de requisitos não atendem ao outro; configurando, dessa forma, espaços (“nichos”) privilegiados e especializados para certas tecnologias no interior do campo, heterogêneo, da geração elétrica.

Quando a turbina a gás migra para a zona de base da curva de carga, ela precisa fortalecer certos atributos que não eram essenciais quando ela estava na periferia do sistema. A confiabilidade e a disponibilidade da planta tornam-se fatores decisivos no seu desempenho que têm conseqüências relevantes no funcionamento do sistema elétrico como um todo. Principalmente, considerando-se a expectativa de ampliação da participação dessa tecnologia na geração de eletricidade. Assim, cada vez mais, parte significativa da confiabilidade do sistema irá repousar sobre a confiabilidade dessas plantas.

A experiência inglesa tem demonstrado que esse quesito de desempenho das turbinas a gás em seu novo papel no sistema elétrico deve ser olhado com cuidado⁹. A competição acirrada entre os principais fornecedores globais de equipamentos elétricos, em conjunto com o forte desejo dos geradores de reduzir os seus gastos com combustíveis, criou uma situação na qual gerações sucessivas de plantas são lançadas sem que a geração anterior seja adequadamente testada. Nesse processo, independente do produtor, os novos projetos de ciclo combinado têm apresentado falhas associadas a problemas de confiabilidade que se traduzem em atrasos no cronograma de construção/operação e paradas imprevistas das plantas¹⁰.

Assim, a operação das turbinas a gás em condições diferentes introduz pressões para que ela adquira novos atributos relativos à resistência e robustez que permitam o seu uso intenso no tempo. Essas pressões são ampliadas a partir da necessidade de melhorar o rendimento do equipamento. Essa melhoria exige aumentar a pressão e a temperatura em que operam as turbinas. Esse aumento gera condições de operação mais severas¹¹ do que aquelas que a turbina pode, de fato, suportar, refletindo-

se negativamente na disponibilidade do equipamento e nos seus custos e escalas de manutenção. Desse modo, a compatibilização desses dois atributos gera uma forte tensão interna na agenda de melhorias desejáveis na turbina a gás.

As pressões por novos atributos também se refletem no desempenho ambiental. Quando a turbina a gás é introduzida, ela representa um progresso nesse quesito, porém as restrições ambientais vão se tornando cada vez mais rigorosas. Essa pressão ambiental vai se somar às anteriores, acirrando as pressões internas à agenda de pesquisa que deve gerar os novos atributos das novas turbinas¹².

A operação em escalas maiores, associada ao novo papel na base da geração, abre à turbina a gás a possibilidade de exploração de economias latentes de escala, que se constitui em uma trajetória tecnológica clássica. No entanto, as limitações nas condições de financiamento continuam pressionando no sentido da redução do custo de capital dos equipamentos. A resposta a esse constrangimento é recorrer às turbinas aeroderivadas que, no atual estágio de desenvolvimento, são mais compactas, porém menos robustas. Desse modo, o que se ganha em termos de compacidade se perde em robustez e, portanto, em disponibilidade e confiabilidade.

Aqui, cabe chamar a atenção que, nesse caso, a compactação não é uma tendência tecnológica inexorável, e sim, uma redefinição necessária dos patamares a partir dos quais se dará a exploração de economias latentes de escala. Nesse processo, a dificuldade é definir compromissos, por um lado, entre exploração de escala e restrições financeiras e, por outro, entre compacidade e resistência.

Em suma, mais do que uma tecnologia para a transição, a turbina a gás é uma tecnologia em transição. Essa transição nasce das pressões para que essa tecnologia de geração adquira atributos pertinentes ao seu novo papel na geração de eletricidade. No entanto, a aquisição desses novos atributos implica na implementação de um novo programa de pesquisa distinto do anterior. Nesse sentido, esse movimento significa uma mudança no esforço inovativo que até hoje vinha sendo desenvolvido. Esse novo esforço envolve uma mobilização de recursos mais ampla, custosa e de resultados (tecnológicos e econômicos) incertos. O recurso às inovações incrementais, seguindo a antiga trajetória tecnológica, não é suficiente para responder aos desafios colocados pelo atual contexto tecnológico – econômico - regulatório. Assim, o desafio tecnológico não só mudou de natureza, como também, de patamar, demandando uma nova estruturação dos programas e um novo arranjo entre os atores.

4 - Um novo esforço tecnológico

A dotação de novos atributos às turbinas a gás representa um novo patamar de complexidade para o esforço tecnológico empregado no desenvolvimento desse equipamento. O grau de incerteza (técnica e econômica) desse empreendimento coloca limitações expressivas ao envolvimento dos agentes econômicos. O processo de reestruturação regulatória amplia, sobremaneira, essa incerteza, realçando a amplitude e os riscos do salto necessário à ultrapassagem das atuais barreiras tecnológicas.

A resposta a esse quadro de incerteza e complexidade tem sido dada através de dois movimentos: o primeiro diz respeito a um forte rearranjo no quadro das alianças entre as empresas produtoras de equipamentos elétricos; e o segundo se refere a configuração de fortes articulações institucionais que envolvem atores e políticas públicas.

4.1 – As novas alianças

A exaustão do paradigma tecnológico anterior, representado pela turbina a vapor, a privatização, a introdução da competição no mercado elétrico, a existência de sobre-capacidade, a estagnação dos mercados elétricos nos países desenvolvidos e a globalização mudaram o quadro da indústria de equipamentos.

O primeiro grande movimento já acontece na década de oitenta com a fusão de duas grandes empresas, a Brown Boveri e a Asea, para formar a ABB (Asea-Brown Boveri). Ainda nessa mesma

década, a Westinghouse, uma das líderes do mercado até então, vende a sua divisão de equipamentos de transmissão e distribuição para a ABB. Em 1998, a mesma Westinghouse sai totalmente do negócio de equipamentos elétricos pesados, vendendo a sua divisão de equipamentos de geração convencional para a Siemens, que forma a Siemens-Westinghouse, e sua divisão nuclear para a americana Morrison Knudsen e a inglesa BNFL. A década de noventa se encerra com a *joint venture* de duas grandes companhias européias, a Alstom e a ABB, formando, em 1999, a ABB-Alstom Power Generation. Contudo, essa parceria na área de equipamentos de geração irá durar menos de um ano; em maio de 2000, a ABB vende a sua participação na ABB-Alstom para a própria Alstom.

A partir dessas fusões e aquisições, a indústria de equipamentos para a geração de eletricidade passa ser dominada por três grandes “players” mundiais: dois europeus – Alstom e Siemens¹³ e um americano – General Electric. As japonesas Toshiba e Hitachi são parceiras da General Electric e a Mitsubishi, após perder o seu aliado tradicional a Westinghouse, luta para ser um dos grandes *players* mundiais.

O domínio da tecnologia do ciclo combinado envolve a capacitação em três áreas: turbina a gás (principalmente aeroderivadas¹⁴), turbina a vapor e caldeiras. Nesse sentido, os produtores que hoje dominam o mercado são os mesmos citados acima: General Electric; Alstom; Siemens e Mitsubishi.

A lógica das alianças para vencer as barreiras tecnológicas tem duas faces que podem ser bem explicitadas no caso japonês. A GE se especializou no desenvolvimento e na fabricação de turbinas a gás que são o coração do ciclo combinado. A Toshiba apresenta uma qualificação muito forte no desenvolvimento e produção de caldeiras. Na medida em que o sistema do ciclo combinado é extremamente integrado, o avanço tecnológico em uma das partes exige um avanço complementar nas outras. Nesse sentido, a construção de uma cooperação que integre as experiências e capacitações nas diversas áreas em uma estrutura organizacional que acelere o processo de aprendizado é fundamental para o avanço tecnológico no ciclo combinado. Por outro lado, a Mitsubishi maneja todas as tecnologias envolvidas no ciclo combinado e considera que isto torna o desenvolvimento mais rápido do que aquele configurado pela conjugação de esforços de empresas distintas¹⁵. Enfim, são duas soluções organizacionais diferentes que procuram reduzir os custos de transação e intensificar o aprendizado.

Assim, o mercado de equipamentos para a geração de eletricidade e, em particular, o de turbina a gás, se revela bastante competitivo, apesar do número reduzido de produtores¹⁶. O que importa, aqui, é, principalmente, o reconhecimento da existência do enfrentamento e, mais do que isso, a identificação da sua natureza radical. As empresas se enfrentam no mercado global e a inovação tecnológica constitui uma vantagem competitiva decisiva nesse embate. Isto tem implicações significativas para as empresas elétricas.

Considerando que o atual estágio de desenvolvimento da turbina a gás implica em um intenso processo de aprendizado que demanda uma forte interação entre o produtor e o usuário do equipamento, a coordenação dos esforços inovativos e a criação de estruturas de gestão de informações tornam-se fundamentais para o sucesso do novo empreendimento ligado à introdução das inovações necessárias ao desenvolvimento dessa técnica de geração¹⁷.

Nesse sentido, a construção de uma relação privilegiada de compromissos de longo prazo entre o gerador e o seu fornecedor de equipamentos representa, hoje, uma fonte de vantagem competitiva crucial no enfrentamento entre as empresas nos mercados elétrico e de equipamentos.

Ademais, a transição vivida pela tecnologia de geração traz incertezas e riscos tecnológicos e econômicos significativos. Nesse contexto, a decisão de aquisição de um novo equipamento, em franco processo de mutação, envolve uma complexidade expressiva. Na medida em que ocorre um fluxo contínuo na introdução de inovações significativas na turbina a gás, o padrão de desempenho do equipamento está sendo constantemente redefinido. Neste caso, a construção de uma relação de longo prazo com o fornecedor de equipamentos que permita uma atualização continuada da planta, a custos

reduzidos, pode trazer a complexidade da decisão para patamares possíveis de serem administrados e que possibilitem a concretização da decisão de investimento.

A incerteza e os riscos envolvidos no esforço tecnológico associado ao desenvolvimento da nova geração de turbinas a gás exigem não só uma forte reconfiguração organizacional que envolve as empresas de equipamentos e as empresas elétricas, como também, a construção de arranjos na esfera das políticas públicas, em particular, das políticas industriais e tecnológicas.

4.2 – O papel das instituições

A necessidade de mitigar os riscos envolvidos no novo esforço tecnológico e garantir uma coordenação ampla de extensos e custosos recursos fazem com que a dimensão institucional adquira relevância no desenvolvimento da turbina a gás.

A experiência americana se enquadra nesse tipo de solução, onde a parceria entre os setores privado e público procura fornecer uma base institucional que possibilite lidar com os problemas do desenvolvimento da nova geração de turbina a gás.

O programa de desenvolvimento de turbinas avançadas do Governo Americano constitui, hoje, o esforço mais importante e do qual se espera que surjam as soluções tecnológicas que irão permitir o nascimento de uma nova geração de turbinas a gás. É no reconhecimento da necessidade, por um lado, e das dificuldades, por outro, da ruptura representada pelas características desejáveis dessas novas turbinas que repousa a justificativa para o envolvimento direto do Governo Americano nesse empreendimento.

O programa de pesquisa do DOE (USA Department Of Energy) é bastante ambicioso e, de fato, ultrapassa os restritos limites do desenvolvimento da turbina a gás, incorporando-se a uma perspectiva da produção e utilização de energia mais ampla e que está presente na chamada Visão 21. O objetivo desse programa é gerar plantas de transformação de energia que não apenas apresentem eficiências energéticas e desempenhos ambientais muito elevados, como também, um grau de flexibilidade que permita a essas plantas serem multi-insumos e multi-produtos. Desse modo, as unidades que irão surgir a partir desse esforço tecnológico irão produzir eletricidade, combustíveis líquidos e produtos químicos a partir do carvão, do gás natural e da biomassa, com alta eficiência e níveis de poluição próximos de zero¹⁸.

Em síntese, os sistemas baseados na visão 21:

Serão capazes de produzir eletricidade a uma eficiência maior do que 60 %, usando carvão, e acima de 75 %, usando gás; a custos que serão de 10 a 20 % menores do que os dos sistemas atuais ;

Oferecerão a opção de se produzir economicamente combustíveis líquidos e produtos químicos de alto valor agregado;

Terão emissões de SO₂, Nox e particulados próximas de zero;

Serão flexíveis em termos de combustíveis;

Serão modulares e integráveis.

Essa lista de características desejáveis representa um nível respeitável de dificuldades e, portanto, um aprendizado longo e custoso. No entanto, os avanços na tecnologia de informação transformam a natureza desse desafio. O recurso intenso à utilização de modelos de simulação permite que esse aprendizado ocorra em prazos e a custos menores. Dessa maneira, os programas de pesquisa

tecnológica ligados aos sistemas da visão 21 procuram aproveitar ao máximo as novas possibilidades abertas pela tecnologia da informação na redução do tempo, dos gastos e dos riscos no desenvolvimento de novos produtos. Esse encurtamento do aprendizado, viabilizado pelos modelos que procuram simular as condições de operação, desde a escala de laboratório até escala industrial, torna possível a configuração dessa agenda de pesquisa ambiciosa e que apresenta barreiras nada desprezíveis.

A compatibilização das soluções dos problemas tecnológicos envolvidos na conquista do conjunto de predicados desejáveis para os sistemas da visão 21 torna o esforço inovativo bastante complexo. A primeira questão importante é que esse esforço não se restringe ao desenvolvimento da turbina a gás. Na medida em que a concepção que governa a estruturação dos sistemas é marcada pela busca da construção de módulos integráveis, o desenvolvimento de cada parte do sistema tem que estar consoante com o desenvolvimento das outras partes. Isto implica que as soluções que estão sendo dadas a problemas relativos a um módulo têm que ser compatíveis com as soluções que estão sendo encontradas para os outros módulos. Considerando que cada módulo apresenta um conjunto de elementos que interagem entre si, chega-se a um grau de complexidade respeitável, que, de uma parte, demanda o uso intenso da tecnologia da informação para se lidar com esse tipo de interação fortemente sistêmica e, de outra, introduz incertezas pesadas acerca do desempenho do conjunto, quando em operação. Nesse sentido, por mais que a tecnologia da informação contribua para lidar com esse nível de complexidade associado à interação sistêmica, ela não consegue eliminar uma dimensão dessa complexidade geradora de incertezas que, pela sua própria natureza, é difícil de ser abstraída.

Introduzir uma turbina a gás de alta eficiência, com níveis de emissão baixíssimos e capaz de utilizar vários combustíveis implica resolver problemas tecnológicos em três grandes áreas: a) materiais; b) transferência de calor e aerodinâmica; c) combustão¹⁹.

Na primeira grande área encontram-se todos os esforços relacionados à proteção dos elementos que compõem a turbina às condições cada vez mais severas de operação, trazidas pelo aumento da pressão e da temperatura, necessário ao incremento da eficiência, e pela utilização de uma gama de combustíveis mais ampla, exigida pelo aumento da flexibilidade. Vencer esses desafios significa produzir revestimentos que têm uma grande resistência térmica e à corrosão, uma longa vida útil e para os quais estão disponíveis métodos práticos e relativamente baratos de monitorização, previsão de durabilidade e de reparos "in situ". Em síntese, a evolução tecnológica, nesse caso, é dotar os revestimentos térmicos desses atributos sem aumentar, de forma significativa, os custos de capital, de operação e manutenção a eles associados.

A segunda área envolve os problemas tecnológicos ligados à transferência de calor e à aerodinâmica, cuja solução envolve esforços multidisciplinares que permitam uma otimização que incorpore, de forma integrada: aerodinâmica, transferência de calor, estruturas e dinâmicas. Por outro lado, é necessário reduzir as incertezas na passagem do laboratório para o projeto, que implica no desenvolvimento de novos modelos, métodos e técnicas de medida para a simulação e a análise do desempenho previsto do equipamento. Neste caso, os avanços computacionais são ferramentas importantes para a incorporação e a integração de um conjunto de conhecimentos e experiências científicas e tecnológicas complexas que permita encontrar soluções que viabilizem a aquisição dos atributos desejáveis em termos de eficiência, flexibilidade e desempenho ambiental.

A terceira área – combustão – tem surgido como um componente crítico no desenvolvimento da nova geração de turbinas a gás de alta eficiência e de baixas taxas de emissão. Os avanços conquistados até agora, em termos de eficiência térmica e ambiental, têm sido alcançados a expensas do aumento dos custos de capital, de operação e manutenção e da redução da flexibilidade em termos de combustíveis. Os *trade-offs* presentes na compatibilização de atributos diferentes se apresentam mais fortes nessa área. Pressões e temperaturas elevadas contribuem para aumentar a eficiência da turbina, porém causam tremendas dificuldades para se manter emissões em níveis baixos; disponibilidade/confiabilidade em patamares altos e flexibilidade desejável de combustíveis.

4.3– Um programa nacional

No dia 18 de Fevereiro de 2000, em Greenville na Carolina do Sul, foi lançada a mais avançada turbina a gás disponível no mundo. A “H System TM gas turbine” é fruto do esforço conjunto de desenvolvimento tecnológico da General Electric e do Departamento de Energia. Após terminar a fase de testes críticos dos seus componentes, ela está sendo transferida para uma planta de geração em New York, de propriedade da Sithe Energies, um dos maiores produtores independentes do mundo, para os testes com carga, que se constituem no último obstáculo à sua comercialização. Quando o projeto de desenvolvimento dessa turbina estiver terminado, o DOE terá gasto 100 milhões de dólares e a General Electric 500 milhões - 200 milhões diretamente no programa governamental e 300 milhões no desenvolvimento de tecnologias relacionadas. Isto significa um gasto total de 600 milhões de dólares em um projeto que começou no início da década de noventa²⁰.

Projetada para operar em uma planta de ciclo combinado, a nova turbina, espera-se, será a primeira a ultrapassar a barreira dos 60 % de eficiência. Os ganhos na eficiência resultam das elevadas temperaturas (1426 graus Celsius) nas quais ela trabalha, graças ao emprego de avançadas técnicas de resfriamento e ao uso de novas ligas na sua construção. Emitindo metade do nível de Nox das atuais turbinas e produzindo muito menos CO₂ do que qualquer turbina que funciona atualmente, a H System TM representa um avanço significativo no desempenho ambiental da turbina a gás.

A turbina da GE resulta de uma política do Departamento de Estado de Energia para o desenvolvimento, em parceria com a iniciativa privada, de uma nova geração de turbinas. Nos últimos dez anos, foram destinados para o programa *Coal and Power Systems* um volume de recursos federais correspondentes à 2,3 bilhões de dólares, sem contabilizar a contrapartida privada. Isto corresponde à, aproximadamente, 60 % dos recursos destinados à P&D na área de energias fósseis pelo DOE²¹.

A racionalidade da política industrial que sustenta a alocação desses fundos baseia-se no reconhecimento de que a indústria privada está limitando, de forma significativa, os seus investimentos em P&D de longo prazo na área de energia, em função das incertezas ligadas à futura regulação. Essas incertezas aumentam a aversão ao risco das empresas geradoras que relutam em comprometer um volume significativo de recursos em novos investimentos de longo prazo. Assim, como resultado das incertezas trazidas pela transformação de um mercado monopólico em um mercado competitivo, a indústria elétrica resiste a se envolver em investimentos de longo prazo mais arriscados em novas plantas de geração, especialmente aquelas associadas a altos custos de capital, mesmo que elas apresentem maior eficiência e desempenho ambiental. Nesse sentido, é necessário criar mecanismos que superem as barreiras à introdução dessas novas tecnologias. Por outro lado, a introdução de concorrência no mercado de energia deve gerar fortes pressões para a redução de custos sobre os produtores de eletricidade, gerando necessidade de soluções que tenham viabilidade não só tecnológica, como também, econômica. Ao mesmo tempo, as grandes companhias de eletricidade, gás e petróleo estão se fundindo em grandes unidades de negócio que estão investindo cada vez menos em pesquisa, preocupadas em reduzir custos e rentabilizar, no curto prazo, o novo conjunto de ativos²².

Neste sentido, os programas do DOE procuram alavancar os limitados recursos privados, coordenando um amplo conjunto de recursos cuja mobilização seria muito difícil e custosa fora do âmbito institucional.

De acordo com as avaliações do DOE, 80 % da nova capacidade de geração a ser instalada nos Estados Unidos, nos próximos quinze anos, irão utilizar turbinas a gás. Em termos de mercado mundial, a demanda por essa tecnologia de geração pode alcançar na próxima década valores que chegam a 100 bilhões de dólares. Os esforços tecnológicos desenvolvidos visam produzir um equipamento que capture uma parte significativa da renda e dos empregos que serão gerados a partir dessa expansão esperada. Isto significa empregos para os trabalhadores americanos e mercado para as empresas de

equipamentos americanas. Dessa forma, esta é uma política nacional que procurar trazer benefícios que possam ser apropriados nacionalmente.

A partir do momento em que consideramos que a opção de Pesquisa & Desenvolvimento na área de energia, no caso europeu, é marcada pela opção nuclear²³, pode-se afirmar que, hoje, o grande esforço institucional organizado em torno do desenvolvimento da turbina a gás é americano. Dessa maneira, pode-se identificar duas opções estratégicas distintas entre americanos e europeus, em termos de desenvolvimento tecnológico institucionalizado. Embora possa ocorrer mudanças nessas apostas e nos cacifes alocados em cada uma delas, não se deve deixar de levar em conta que o atraso nessa área dos europeus, ao longo da década de noventa, pode pesar desfavoravelmente na evolução futura da indústria de equipamento desse continente.

A competição no mercado de equipamentos não ocorre apenas entre empresas, mas, também, entre países. Assim, desenha-se uma competição extremamente acirrada entre grandes blocos de empresas/países em um mercado globalizado, onde a vantagem competitiva decisiva é a inovação tecnológica. Em outras palavras, um jogo para grandes jogadores, onde os países em desenvolvimento têm, inicialmente, apenas um papel: mercado consumidor de equipamento. Dessa forma, se no início da crise, o amadurecimento da tecnologia convencional abria “janelas de oportunidades” para a entrada de novos jogadores, de linhagem menor, no restrito grupos de “players”, a aceleração do jogo dentro do novo paradigma tecnológico da geração torna a colocá-los na velha e conhecida posição de dependência.

5 – Conclusão

Na medida em que o Brasil ensaia uma inflexão na sua trajetória tecnológica de geração de eletricidade em direção às térmicas, em particular, às turbinas a gás, cabe chamar a atenção sobre alguns aspectos do atual estágio de desenvolvimento dessa tecnologia:

A turbina a gás é uma tecnologia em transição, ainda distante da maturidade. Isto significa que há um longo e custoso processo de aprendizado para ser desenvolvido na configuração da nova geração de turbina. Associações entre produtores de equipamento e empresas geradoras tornam-se um recurso estratégico importante nessa fase do desenvolvimento dessa tecnologia.

Dado o atual estágio de desenvolvimento tecnológico, as possibilidades, no curto prazo, para que essas turbinas sejam fabricadas pela indústria nacional são bastante limitadas.

O atual momento representa um forte e inédito *lock-in* no desenvolvimento tecnológico das técnicas de geração que tem conseqüências. A principal delas diz respeito à cristalização da expectativa de que os grandes avanços tecnológicos na área de geração de eletricidade irão surgir, a princípio, nessa tecnologia específica. O que introduz não só um forte viés térmico à escolha tecnológica na geração elétrica, mas, mais importante do que isso, um viés que favorece uma dada tecnologia térmica: a turbina a gás. Para países que apresentam uma grande disponibilidade de recursos hidráulicos, este fato tem profundas implicações sobre a viabilidade do aproveitamento, através de decisões de mercado, desses recursos.

E, por último, o esforço tecnológico hoje desenvolvido aponta claramente na direção da construção de plantas de transformação de energia multi-insumos e multi-produtos. Isto significa que a convergência de negócios observada a partir do movimento das empresas energéticas na direção de estarem presentes em distintas cadeias energéticas (gás, eletricidade, petróleo, carvão, etc.) se sustenta, no longo prazo, em uma convergência tecnológica de fato, através da qual os limites técnicos das cadeias vão se diluindo e configurando-se uma verdadeira indústria de energia, que utiliza uma ampla gama de insumos energéticos e produz uma ampla gama de produtos energéticos.

6 - Bibliografia

- Bicalho, R.G. (1997). “A Formação de Regularidades Tecnológicas na Indústria de Eletricidade”. Tese de Doutorado, IE/UFRJ.
- Guéry, B., Husson, J.P., Marin, N., Montgolfier, P (1999). “Energy Policy and Energy R&D in European Union Convergence or Divergence? – A 2010 – 2020 Perspective. In: The Shared Analysis Project Economic Foundations for Energy Policy, Paris, France.
- Kaneko, K. (1999) – “Next-Generation, High efficiency Thermal Power Generation”. In: Japan: Nikkei Business, pg.76.
- Islas, J. (1994). “De la Turbine à Vapeur à la Turbine à Gaz Électrique: Compétition Technologique et Formation d’un Nouveau Paradigme”. Tese de Doutorado, IEPE, Grenoble, France.
- Watson, J. (1998). “Advanced Fossil – Fuel Technologies for the UK Power Industry”. A submission to the Government’s review of energy Sources for power generation. SPRU, Sussex, UK.
- US Department of Energy (a) - Office of Fossil Energy (2000). “World’s Most Advanced Gas Turbine Now Ready To Cross Commercial Threshold”. In DOE Fossil Energy Techline. Em linha: <http://www.doe.gov/>
- US Department of Energy (b) - Office of Fossil Energy (2000). “Budget in Brief – Fiscal Year 2001. Em linha: <http://www.doe.gov/>
- US Department of Energy (a) - Office of Fossil Energy (1999). Coal & Power Systems: Strategic Plan & Multi-Year Program Plans. Washington, DC.
- US Department of Energy (b) - Office of Fossil Energy (1999). “Budget in Brief – Fiscal Year 2000. Em linha: <http://www.doe.gov/>
- US Department of Energy – Federal Energy Technology Center (1999). Developing the Next Generation of Gas Turbine Power Systems Program – A National Partnership. Washington, DC.
- US Department of Energy - Office of Fossil Energy (1998). “Budget in Brief – Fiscal Year 1999. Em linha: <http://www.doe.gov/>

Professores colaboradores do Instituto de Economia da UFRJ.

¹ Ao longo do tempo, face às especificidades de cada tipo de usuário, foram gerados dois conjuntos distintos de turbinas: as aeroderivadas e as industriais.

² Para a indústria aeronáutica um *trade-off* importante é aquele associado ao aumento da potência *versus* o aumento de peso da turbina. Isto configura uma trajetória tecnológica caracterizada pela compactação crescente do equipamento. Já no caso da utilização industrial das turbinas a gás, o que caracteriza o seu uso é a grande heterogeneidade na aplicação desse equipamento nas atividades industriais. A trajetória tecnológica, aqui, gira em torno do aumento da adaptabilidade desse equipamento aos diversos usos, sem sacrificar o seu desempenho técnico-econômico.

³ Desde 1939, quando foi comercializada a primeira turbina elétrica a gás, até os anos oitenta, o papel desempenhado por essa tecnologia na indústria elétrica foi marginal – centrais de segurança, de reserva e, posteriormente, de pico; com o coração do sistema de geração sendo ocupado pela turbina a vapor.

⁴ Ver Islas Sampério (1994).

⁵ Ver Bicalho (1997)

⁶ Enquanto as melhores turbinas a vapor patinavam em torno de uma eficiência de 38 %, os ciclos combinados que entravam em operação na década de oitenta já alcançavam uma eficiência entre 40 e 45 %, com fortes perspectivas de melhoras.

⁷ A Segunda geração de ciclos combinados que chega ao mercado nos anos noventa já alcança, com relativa facilidade, eficiências de 48 e 49 % e aponta na direção da superação imediata da barreira dos 50 %. No entanto, a entrada dos rendimentos térmicos na faixa dos 50 % vem acompanhada de uma série de percalços que transforma a chegada aos 60 % de eficiência em

uma barreira ao desenvolvimento da turbina a gás; cuja superação passa a significar uma demonstração incontestável de liderança tecnológica.

⁸ Cabe notar que um outro fator a pressionar na direção da melhoria da eficiência é a necessidade de reduzir a emissão de CO₂ (protocolo de Kyoto), o que pode ser alcançado através da redução do consumo específico de combustível por meio do aumento da eficiência da conversão.

⁹ Ver Watson (1998)

¹⁰ Uma das turbinas a gás da central de Keadby (Inglaterra), em 1997, simplesmente saltou das suas fundações, a partir de problemas no compressor (ver Watson, op.cit.).

¹¹ Quando se passa de um rendimento de, aproximadamente, 40 % para um rendimento em torno de 48 %, a temperatura salta 1000 C para 1300 C, para se alcançar 60 % é preciso atingir temperaturas da ordem de 1400 C.

¹² Ao longo da década de noventa, nos Estados Unidos, as pressões ambientais e os requerimentos regulatórios reduziram os níveis de emissão de Nox, em algumas aplicações, para patamares menores do que as metas de desempenho ambiental que estavam previstas no início dos anos noventa, pelo programa de turbinas avançadas desenvolvido pelo Departamento de Energia.

¹³ A Siemens através da Siemens Power Generation Group (KWU) controla 100 % da Siemens-Westinghouse.

¹⁴ Daí a importância de alguns produtores tradicionais de turbinas (Pratt & Whitney e Rolls Royce) no desenvolvimento da nova safra de turbinas e no jogo das alianças entre os grandes produtores de equipamentos de geração elétrica.

¹⁵ Ver Kaneko (1999).

¹⁶ Nesse sentido, o aquecimento do mercado observado nos dois últimos anos, em função de uma situação particular da demanda americana por turbinas a gás, não deve ser considerado como manifestação de uma tendência de longo prazo. A saída da ABB da produção de equipamentos de grande porte para a geração elétrica explicita as expectativas negativas associadas à intensificação da concorrência e à redução da rentabilidade nesse mercado.

¹⁷ Quando o mercado elétrico era monopólio essa questão não tinha importância. Os resultados do aprendizado, realizado a partir do funcionamento de uma dada planta, podia ser incorporado a nova safra de plantas que seriam adquiridas por empresas elétricas que não competiam entre si. A partir do instante em que passa a existir o enfrentamento entre elas, esse aprendizado passa a ser um fator gerador de vantagens competitivas no mercado elétrico e, desse modo, a questão relativa a apropriação dessa vantagem passa a ser relevante.

¹⁸ Incluindo aqui a emissão de CO₂

¹⁹ Ver US Department of Energy – Federal Energy Technology Center (1999).

²⁰ Ver US Department of Energy (a) - Office of Fossil Energy (2000).

²¹ Ver US Department of Energy (a) e (b) - Office of Fossil Energy (2000) e US Department of Energy - Office of Fossil Energy (1998)

²² Ver US Department of Energy (a) - Office of Fossil Energy (1999).

²³ A P&D no nuclear concentra 56 % dos fundos destinados a P&D&D em energia pela Comunidade Econômica Européia, representando 90 % no caso francês, 58 % no caso alemão, 50 % no caso inglês e 45 % no caso italiano (ver Guéry, B., Husson, J.P., Marin, N., Montgolfier, P (1999).