



Roadmap tecnológico
para produção,
uso limpo e eficiente
do carvão mineral
nacional: 2012 a 2035





cgée

Centro de Gestão e Estudos Estratégicos
Ciência, Tecnologia e Inovação



***Roadmap* tecnológico
para produção, uso
limpo e eficiente do
carvão mineral
nacional: 2012 a 2035**

© Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (CGEE)

O Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (CGEE) é uma associação civil sem fins lucrativos e de interesse público, qualificada como Organização Social pelo executivo brasileiro, sob a supervisão do Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI). Constitui-se em instituição de referência para o suporte contínuo de processos de tomada de decisão sobre políticas e programas de ciência, tecnologia e inovação (CT&I). A atuação do Centro está concentrada nas áreas de prospecção, avaliação estratégica, informação e difusão do conhecimento.

PRESIDENTE

Mariano Francisco Laplane

DIRETOR EXECUTIVO

Marcio de Miranda Santos

DIRETORES

Antonio Carlos Filgueira Galvão

Fernando Cosme Rizzo Assunção

Gerson Gomes

EDIÇÃO E REVISÃO | *Tatiana de Carvalho Pires*

DESIGN GRÁFICO | *Eduardo Oliveira*

DIAGRAMAÇÃO | *Luiza Folle*

APOIO TÉCNICO AO PROJETO | *Flávia Montandon Fagundes Pinto e Marina Maria Guimarães Brasil*

Catálogo na Fonte

C389r

Roadmap tecnológico para produção, uso limpo e eficiente do carvão mineral nacional: 2012 a 2035. Brasília: Centro de Gestão e Estudos Estratégicos, 2012.

132 p.; il, 24 cm

1. *Roadmap* Estratégico - Brasil. 2. *Roadmap* Tecnológico - Brasil. 3. Carboquímica. 4. Siderurgia. 5. Geração Termelétrica. I. CGEE. II. Título.

CDU -032.35 (81)

Centro de Gestão e Estudos Estratégicos
SCN Qd 2, Bl. A, Ed. Corporate Financial Center sala 1102
70712-900, Brasília, DF
Telefone: (61) 3424.9600
<http://www.cgee.org.br>

Esta publicação é parte integrante das atividades desenvolvidas no âmbito do 2º Contrato de Gestão CGEE – 3º Termo Aditivo/Ação: Inovação e Competitividade em Setores Econômicos e Industriais /Subação: *Roadmap* Tecnológico para a Produção e Uso Limpo do Carvão Mineral Brasileiro - 51.50.4/MCTI/2011.

Todos os direitos reservados pelo Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (CGEE). Os textos contidos nesta publicação poderão ser reproduzidos, armazenados ou transmitidos, desde que citada a fonte.

Sugestão de citação: CGEE, título, autoria, ano de publicação, CGEE: Brasília.

Tiragem: 600 unidades. Impresso em 2012.



Roadmap tecnológico para produção, uso limpo e eficiente do carvão mineral nacional: 2012 a 2035

SUPERVISÃO

Fernando Cosme Rizzo Assunção

CONSULTORES

Adilson Oliveira

Eduardo Falabella

Eduardo Osorio

Jorge Guimarães Caldeira Filho

Maria Fatima Ludovico de Almeida

Maria Luiza Sperb Indrusiak

Rafael Amaral Shayani

EQUIPE TÉCNICA MCTI

Elzivir Azevedo Guerra (coordenador)

Cristina Ferreira Correia Silva

Eduardo Soriano Lousada

Jairo José Coura

Tássia de Melo Arraes

EQUIPE TÉCNICA CGEE

Elyas Ferreira de Medeiros (coordenador)

Adriana Badaró de Carvalho Villela

Carlos Augusto Caldas de Moraes

Cristiano Hugo Cagnin

Lélio Fellows Filho

Tomaz Back Carrijo



Centro de Gestão e Estudos Estratégicos
Ciência, Tecnologia e Inovação

Onde o futuro está presente



COMISSÃO DE ACOMPANHAMENTO

Fernando Luiz Zancan | ABCM
Cleber Baldoni Gomes | ABCM
Máximo Pompermayer | Aneel
Gabriel de Jesus Azevedo Barja | Aneel
Paulo Sérgio Moreira Soares | Cetem
Ronaldo Luis Coreia dos Santos | Cetem

Wilson Rodrigues Pereira | MME (SGM)
Mariana Clara de Freitas Fontineli | MME (SGM)
Gilberto Hollauer | MME (SPE)
Gustavo Santos Masili | MME (SPE)
Tolio Edeo Ribeiro | MDIC (DEORN)
Sandra Apolinário | MDIC (DEORN)

Rafael Freire de Macêdo | Ibama/MMA
Luiz Nelson Valcareggi | Rede PD&I Carvão Mineral
Carlos Hoffmann Sampaio | Rede PD&I Carvão Mineral

PARTICIPANTES DO ESTUDO

Adilson Oliveira da Silva | Unesc
Adilson Rodrigues da Costa | UFOP
Adriano Carotenuto | UFRGS
Adriana Badaró de Carvalho Villela | CGEE
Adriano Santiago de Oliveira | MMA
Ailana Gomes Vilela | Usiminas
Alexandre Grigorieff | Copelmi
Alexandre Szklo | UFRJ
Aline Kegellim | CEPAC Grupo do Carvão
Amir Antonio Martins Oliveira Junior | UFSC
Ana Lúcia Lima Barros Dolabella | MMA
Ana Rosa Costa Muniz | Unipampa
Andre Amarante Mesquita | UFPA
Anthony Antunes Rodrigues | White Martins
Antônio Cezar Faria Vilela | UFRGS
Armando Caldeira Pires | UnB
Arthur Pinto Chaves | Poli/USP
Bruno Luiz Sigolo | ABM
Carlos Alberto Gurgel Veras | UnB
Carlos Augusto Caldas de Moraes | CGEE
Carlos Augusto Menezes | FTC
Carlos Hoffmann Sampaio | Rede Carvão Mineral
Carlos Weinschenck de Faria | Copelmi
Cassius Cerqueira | IABr
Ceres Zenaide Barbosa Cavalcanti | CGEE
Cesar Duarte | CRM
Cesar Faria | Copelmi
Claudio Scliar | MME
Cleber José Baldoni Gomes | ABCM
Cristian SantaRosa | CEPAC Grupo do Carvão
Cristiane Romio | CEPAC Grupo do Carvão
Cristiano Cagnin | CGEE
Cristina Ferreira Correia Silva | MCTI
David Turik Chazan | CEF/RS
Denise Alves Fungaro | CNEN/IPEN
Djamil de Holanda Barbosa | Eletrobras
Douglas Fagundes Moreira | Gerdau
Edmilson Rodrigues | Spectrum Engenheiros
Eduardo Falabella | UFRJ
Eduardo Martins Medeiros | CRM
Eduardo Osório | UFRGS
Eduardo Soriano Lousada | MCTI
Eduardo Torres Serra | Cepel
Elyas Ferreira de Medeiros | CGEE
Elzivir Azevedo Guerra | MCTI
Emilson Gonçalves Paulo | SECCPM
Fábio Stake | Aneel
Fátima M. Sequeira Carvalho | IPEN
Fernanda Roehle | CEPAC Grupo do Carvão
Fernando Cosme Rizzo Assunção | CGEE
Fernando Dias Perrone | Eletrobras
Fernando Jose Gomes Landgraf | IPT
Fernando Junges | Unipampa
Fernando Luiz Zancan | ABCM
Gabriel de Jesus Azevedo Barja | Aneel

George Liu | Vale
Geraldo Iran Cardoso | HATCH
Germano Mendes de Paula | UFU
Gerson Luis Miltzarek | UFRGS
Gilberto Hollauer | MME
Giovana Dalpont | SATC
Gláucia Costa | CEPAC Grupo do Carvão
Gustavo Gomes | MPX
Gustavo Santos Masili | MME
Helio Cardoso Pereira | Samarco
Horacido Leal | ABM
Humberto Gracher Riella | UFSC
Ignacio Resende | Copelmi
Inúbia Sfoggia | Senado Federal
Irani Cavagnoli | Priority Consultoria
Irineu Capeletti | CPRM
Jair Penido | VALE
Jairo José Coura | MCTI
Jean Carlo S. S. Menezes | UFRGS
Jeferson Borghetti Soares | EPE
João Felipe Coimbra Leite Costa | UFRGS
João Guilherme Rocha Poço | IPT
João Henrique Zimnoch dos Santos | UFRGS
João Marcelo Ketzler | CEPAC Grupo do Carvão
João Pignataro Pereira | MDIC
Jorge Guimarães Caldeira Filho | Jorge Caldeira Consultoria
Jose Angelo Orlando | ABDI
Jose Carlos Minuzzo | Tractebel
José Geraldo de Melo Furtado | CEPEL
Jose Murilo Mourao | Conceitual Consultoria
Josealdo Tonholo | UFAL
Leandro Dallazen | Cientec
Lélio Fellows Filho | CGEE
Leonam dos Santos Guimaraes | Eletronuclear
Leonardo Zimmer | UFRGS
Luciane Garavaglia | SATC
Luiz Carlos Folador | Município Candiota
Luiz Paulo de Oliveira Araújo | DNPm
Luiz Carlos Zancan Filho | UFRGS
Luiz Celso Parisi Negrão | Sebrae
Luiz Cláudio Pardini | DCTA
Luiz Henrique de Freitas Schnor | CGTEE
Luiz Nelson Valcareggi | Rede Carvão Mineral
Manoel Fernandes Martins Nogueira | UFPA
Marçal Jose Rodrigues Pires | PUCRS
Marcelo Khaled Poppe | Banco Mundial
Marcelo Pinho | UFSCar
Marco Antonio da Silva Nunes | Vale
Marco Antonio Gaya de Figueiredo | UERJ
Marcus Rocha Duarte | IABr
Maria Cristina Yuan | IABr
Maria Fatima Ludovico de Almeida | PUC Rio
Maria Luiza Sperb Indrusiak | Unisinos

Mariana Clara de Freitas Fontineli | MME
Mario Saffer | Engebio
Maurício Pazini Brandão | ITA
Máximo Luiz Pompermayer | Aneel
Michel Souza Marques | Ibama
Miguel Antônio Cedraz Nery | ABDI
Miguel E Morales Udaeta | USP
Milton Nogueira da Silva | FMMC/MG
Nehemias Lima Lacerda | Femto Ciências
Nelson Granthon | BNDES
Nisio de Sousa Armani | Radial Bioenergética
Otavio Manhaes | CSN
Paulo Ludmer | PUC/SP
Paulo Roberto Krahe | Finep
Paulo Sérgio Moreira Soares | Cetem
Rafael Amaral Shayani | UnB
Rafael Freire de Macêdo | Ibama
Raimundo Nonato Batista Braga | Arcelormittal
Reinaldo Lopes Ferreira | ELO Design
Renzon Daniel Cosme Pecho | PUC/Rio
Ricardo de Melo Awazu | Alupar Investimento
Ricardo Norberto Ayup Zouain | UFRGS
Roberto Cerrini VillasBoas | Cetem
Roberto Ferrari Borba | DNPm/RS
Roberto Heemann | PUC RS
Roberto R. de Avillez | PUC Rio
Rodnei Gomes Pacheco | Cientec
Rodrigo Corrêa da Silva | Univ. Técnica Brandenburg
Rodrigo Sarmento Garcia | CNI
Ronaldo Luis Coreia dos Santos | Cetem
Ronaldo Mota | MCTI
Ronaldo Santos Sampaio | ISS Brazil
Rubens Jose de Oliveira | Sustenthabil
Rubens Muller Kautzman
Sandra Apolinário | MDIC
Sérgio Leite Lopes | Delta H
Sergio Meth | Unipampa
Sérgio Valdir Bajay | Unicamp
Sérgio W. Garcia Scherer | Minitec
Sibelle de Andrade Silva | Embrapa
Silas Derenzo | IPT
Silvio Maranha | Vale
Tássia de Melo Arraes | MCTI
Tólio Edeo Ribeiro | MDIC
Vanderlei S. Bergamaschi | Ipen
Victor Sérgio de Freitas Dias Moreira | INPI
Volkmar Eit | Electrocell
Wilfred Brandt | Brandt Meio Ambiente
William Becker | Linde Gases
Wilson Rodrigues Pereira | MME
Zuleika da Silva | Cepac Grupo do Carvão



SUMÁRIO

Resumo Executivo	7
------------------	---

CAPÍTULO 1

ROADMAP ESTRATÉGICO	17
1.1. Motivação para a construção de um <i>roadmap</i> para o carvão mineral nacional	17
1.2. Diretrizes de políticas nacionais	19
1.3. Principais estratégias propostas	25

CAPÍTULO 2

ROADMAP TECNOLÓGICO	37
2.1 – Carvão mineral nacional na carboquímica	38
2.2 – Carvão mineral nacional na siderurgia	55
2.3 – Carvão mineral nacional na geração termelétrica	78
2.4 – Cooperações internacionais	97

CAPÍTULO 3

AÇÕES NECESSÁRIAS PARA PROPICIAR UM AMBIENTE FAVORÁVEL AO MAIOR USO DO CARVÃO MINERAL NACIONAL	99
3.1 – Ambiente favorável ao maior uso do carvão mineral nacional	99
3.2 – Ações a serem tomadas	103



Referências	121
Lista de figuras	127
Lista de tabelas	129
Lista de abreviaturas e siglas	131



RESUMO EXECUTIVO

O Brasil possui uma das maiores reservas de carvão mineral do mundo; apenas 13 países dispõem de reservas maiores do que as suas. Entretanto, esses mesmos 13 países são também os maiores produtores mundiais do minério, enquanto que a produção brasileira encontra-se apenas na 26ª posição. Ou seja, o Brasil é o único país possuidor de grandes reservas que não se encontra entre os maiores produtores mundiais de carvão mineral.

O recurso de carvão mineral nacional é expressivo também em termos energéticos. Como comparação, a energia dos recursos de petróleo corresponde a $2,02 \times 10^9$ tep, enquanto a energia dos recursos de carvão mineral é de $7,04 \times 10^9$ tep. Logo, a quantidade de energia armazenada nos recursos de carvão é 3,5 vezes maior que a energia dos recursos petrolíferos nacionais.

O carvão mineral possui duas aplicações principais no Brasil: utilização como combustível para geração de energia elétrica, incluindo uso energético industrial, e utilização na siderurgia para produção de coque, ferro-gusa e aço. Na atual taxa de utilização, as reservas provadas são suficientes para prover carvão por mais de 500 anos. Verifica-se, contudo, que, além de utilizar de forma modesta a reserva de carvão nacional disponível, o país ainda importa carvão para uso siderúrgico, principalmente da Austrália, Estados Unidos, Rússia, Canadá, Colômbia, Venezuela, Indonésia e África do Sul, visto que o carvão nacional produzido não possui as propriedades adequadas para este uso com as tecnologias atualmente em operação.

Uma política pública para melhor aproveitar o carvão mineral, com horizontes em 2022 e 2035, deve, necessariamente, estar alinhada com as diretrizes adotadas pelo Brasil nas questões relacionadas ao meio ambiente, descritas nos seguintes documentos:

- Lei no 12.187, de 29 de dezembro de 2009.
- Decreto no 7.390, de 9 de dezembro de 2010.
- Plano Nacional sobre Mudança do Clima.
- Plano Nacional de Energia 2030.
- Plano Nacional de Mineração 2030.
- Estratégia Nacional de Ciência, Tecnologia e Inovação 2012-2015.



A análise de tais documentos, incluindo as projeções vislumbradas para 2022 e 2035, permite sintetizar as diretrizes gerais na forma das seguintes questões fundamentais:

- Quais inovações e legislações são necessárias para que a trajetória de emissões do Brasil não repita o modelo e os padrões dos países que já se industrializaram?
- Quais as ações necessárias para transformar o país em uma liderança mundial em tecnologia no setor carbonífero?
- Quais inovações são necessárias para que novos processos de produção e novos produtos tomem lugar de forma economicamente viável e dentro da visão de economia verde?
- Quais desenvolvimentos tecnológicos e inovações são necessários à cadeia produtiva carbonífera, em especial para geração termelétrica, siderúrgica e carboquímica, visando aumentar a competitividade?

Como resposta, a forma aqui proposta para o país alcançar a produção, uso limpo e eficiente de quantidade expressiva do carvão mineral considera as seguintes estratégias:

- **Rentabilidade:** Gerar produtos de elevado valor agregado utilizando processos carboquímicos, em similaridade com a indústria petroquímica nacional.
- **Foco em tecnologia promissora:** Investir no domínio de tecnologias-chave que permita diversificar o uso do carvão, com ênfase na gaseificação, para a qual já existe pesquisa no país, e que promoverá avanços na carboquímica, siderurgia e geração termelétrica.
- **Meio ambiente:** Gerar produtos que contribuam para a redução dos gases de efeito estufa, utilizando derivados do metanol produzidos a partir do gás de síntese ($\text{CO} + \text{H}_2$) ou syngas.
- **Segurança energética:** Apresentar tecnologias de geração termelétrica, competitivas e ambientalmente adequadas para o atendimento da demanda energética nacional através do aumento da eficiência dos processos e da redução de emissões. Buscar isonomia entre a geração termelétrica a carvão e as demais fontes, através de marco regulatório, considerando os custos técnicos, ambientais e a competitividade das fontes.
- **Novas tecnologias:** Dominar tecnologia de produção de carvão nacional com qualidade para uso siderúrgico. Promover tecnologias de mistura do carvão mineral nacional com biomassa visando à redução das emissões na siderurgia.
- **Incentivo à indústria nacional:** Estimular o desenvolvimento industrial nacional, produzindo os componentes necessários para produção de equipamentos nacionais, além de aproveitar coprodutos oriundos da queima do carvão.



- **Liderança mundial:** Dominar tecnologias de interesse mundial, pois diversos países possuem carvão de qualidade semelhante ao do Brasil, e se interessam em aumentar sua utilização de forma rentável, limpa e eficiente.
- **Logística:** Desenvolver a infraestrutura necessária à eficiente movimentação do carvão produzido, desde as minas até os usuários finais, a custos competitivos de modo a conquistar fatia do atual mercado brasileiro, hoje ocupado por carvões de outras origens.

O maior uso do carvão mineral nacional, de forma limpa e eficiente, pode ser dividido em três aplicações principais: carboquímica, siderurgia e geração termelétrica. Entende-se que, em curto prazo, a geração termelétrica pode promover um aumento substancial da utilização do carvão mineral, de forma limpa e eficiente. Em médio prazo, a carboquímica apresenta-se como uma solução inovadora, rentável e ambientalmente sustentável para o uso do carvão mineral nacional. Na siderurgia, o uso do carvão mineral será complementar ao carvão importado e é associado ao uso do carvão em geração termelétrica.

As seguintes tecnologias são identificadas como prioritárias de investimentos em PD&I no presente, para que o país possa alcançar resultados concretos em 2022 e 2035:

Tecnologias prioritárias para carboquímica

- Gaseificação em grande escala.
- Gaseificação in situ em grande escala (UCG).
- Reator de ajuste da proporção CO-H₂ (water gas shift) em grande escala.
- Síntese do metanol em média e grande escala.
- Liquefação de carvão (processamento de carvão com extração por solventes).
- Obtenção de produtos a partir do gás de síntese.
- Rota MTO (Methanol to Olefins).
- Rota CTL (Coal to Liquids).
- Rota DME (dimetiléter).



Tecnologias prioritárias para siderurgia

- Processos de concentração a ar.
- Processos de concentração em leitos pulsantes.
- Processos de simulação de plantas e processos.
- Processos de concentração utilizando meios densos.
- Processo de utilização de carvão com baixo poder de coqueificação.
- Novos processos de coqueificação (briquetagem) com aumento da participação de carvão não coqueificável.
- Processo de produção de ferro tipo fusão redutora utilizando aglomerados autorredutores.
- Estudos de processos de gaseificação do carvão mineral nacional.
- Escalonamento e dimensionamento do processo industrial de redução direta com carvão mineral nacional.
- Definição de processos de produção de ferro gusa de fusão redutora utilizando carvão mineral não coqueificável.

Tecnologias prioritárias para geração termelétrica

- Plantas supercríticas de carvão pulverizado e leito fluidizado circulante.
- Plantas leito fluidizado borbulhante subcrítica multicombustível.
- Previsão de captura e armazenamento de CO₂ em novas plantas a carvão.
- Gaseificadores para IGCC, gaseificação in situ para IGCC e poligeração.
- Captura de CO₂ (pré-combustão, pós-combustão, oxicombustão e biofixação).
- *Cofiring*.
- Aproveitamento de coprodutos da combustão.

Ao investir nas tecnologias apontadas pelo presente roadmap, é esperado que o Brasil atinja as seguintes metas em 2022 e 2035:



Metas para carboquímica:

2022

- Tipos de carvão e jazidas carboníferas caracterizadas.
- Processos químicos da gaseificação dominados.
- Tecnologias para gaseificação, síntese de metanol e de outros produtos carboquímicos desenvolvidas no país.
- Unidades pilotos de gaseificadores em operação.
- Utilização de sondagens direcionais para utilização em gaseificação in situ.
- Produtos e coprodutos do carvão, com perspectivas promissoras de mercado, identificados (metanol, dimetileter, hidrogênio, olefinas, fertilizantes, uréia, amônia, ácido sulfúrico e enxofre, etc).
- Coprodutos dos processos carboquímicos caracterizados (cinzas, argilominerais, produtos oriundos da dessulfurização).
- Impactos ambientais dos processos carboquímicos identificados e comparados com outros usos do carvão mineral.
- Desenvolvimento de materiais carbonosos inovadores (nanomateriais tais como nanofibras e fulerenos, carvões ativados, carvões mesoporosos e grafite).

2035

- Processos e produtos carboquímicos desenvolvidos em escala piloto, de demonstração, e prontos para aplicação comercial.
- Pólos carboquímicos implantados em escala comercial.

Metas para siderurgia

2022

- Jazidas (novas e existentes) identificadas e caracterizadas.
- Concentrados caracterizados para uso na siderurgia via alto-forno (coque e PCI).



- Exploração otimizada das jazidas de carvão mineral nacional, considerando uso misto siderúrgico e térmico.
- Técnicas limpas de lavra e beneficiamento (siderurgia e térmica) desenvolvidas, adequadas às características do carvão mineral nacional.
- Tecnologias limpas para novos usos siderúrgicos desenvolvidas, adequadas às características do carvão mineral nacional.
- Processos de redução-direta desenvolvidos para carvão mineral não coqueificável e de alto teor de cinzas.
- Processos de fusão-redutora desenvolvidos para carvão mineral não coqueificável.
- Processos desenvolvidos para uso do carvão mineral na pelotização de minério de ferro.
- Infraestrutura de transporte desenvolvida (conexão mina-beneficiamento-usinas).
- Novos mecanismos de financiamento disponíveis, com incentivo para a produção e uso limpo do carvão mineral nacional.

2035

- Técnicas desenvolvidas para utilização do carvão mineral nacional gaseificado em processos de redução direta.
- Técnicas desenvolvidas para utilização mista carvão mineral/biomassa em processo de fusão redutora.

Metas para geração termelétrica

2022

- Marco regulatório definido para que a geração termelétrica tenha igualdade de oportunidades frente às demais fontes, com atenção especial ao atendimento às questões ambientais intrínsecas.
- Usinas termelétricas com 40% de eficiência energética; usinas termelétricas com menor geração de impactos e emissões atmosféricas.
- Tipos de carvão e jazidas carboníferas caracterizadas.
- Segmentos de lavra e beneficiamento operando com implantação de tecnologia de mitigação de impactos ambientais.



2035

- Usinas termelétricas com 45% de eficiência energética; usinas termelétricas com menor geração de impactos e emissões atmosféricas.
- Brasil posicionado como desenvolvedor e exportador de tecnologias de aproveitamento limpo de carvões de altos teores de cinzas e enxofre.

Ações são necessárias para que um ambiente favorável ao maior uso do carvão mineral nacional seja estabelecido, e que contenha, pelo menos, as seguintes características:

Em relação ao mercado

- Ambiente favorável ao aproveitamento do carvão mineral para geração de energia elétrica, respeitando-se critérios técnico-ambientais.
- Aproveitamento ampliado de coprodutos da cadeia produtiva do carvão mineral nacional.
- Início da implantação de polo carboquímico.
- Consolidação do polo carboquímico.
- Opinião pública com percepção positiva do carvão mineral como insumo industrial.
- Impacto ambiental da cadeia produtiva do carvão mineral (incluindo lavra e beneficiamento) avaliado e comparado com outros insumos.

Em relação aos recursos humanos

- Conhecimento do cenário completo de recursos humanos nas áreas de aplicação do carvão mineral e das tecnologias limpas.
- Ampliação do número de alunos de escolas técnicas, de graduação e de pós-graduação interessados no carvão mineral.
- Fixação local dos recursos humanos desenvolvidos para não perdê-los para outras áreas.
- Ampliação do número de projetos de pesquisa que se tornem produtos comercializáveis, aumentando o depósito de patentes.
- Ampliação do número de mestres e doutores nas indústrias.
- Valores de bolsas de pós-graduação atrativos em relação ao mercado de trabalho, evitando a evasão de alunos dos programas de pós-graduação.
- Parcerias internacionais estabelecidas, com participação do Brasil como um dos líderes do conhecimento do setor.



Em relação à infraestrutura física

- Novas jazidas identificadas e caracterizadas, e melhor conhecimento das existentes. Conhecimento do potencial dos carvões para uso limpo em carboquímica, gaseificação, combustão, siderurgia e CCT/CCS.
- Conhecimento do potencial das jazidas nacionais, sob a ótica CCT.
- Laboratórios para modelagem numérica e simulação dos processos químicos e para caracterização de concentrados para uso limpo na siderurgia, carboquímica e geração termelétrica.
- Áreas selecionadas e priorizadas para desenvolvimentos de projetos em escala piloto (CCS, UCG, CBM, ECBM, EOR).
- Infraestrutura para caracterização e monitoramento de sites em escala industrial e demonstrativa (CCS, UCG, CBM, ECBM, EOR).
- Unidades de bancada/piloto/demonstração implantadas para simulação dos processos de produção (lavra e beneficiamento), carboquímica, gaseificação, combustão, siderurgia e CCT/CCS.
- *Scale-up* de pilotos/protótipos e plantas de demonstração e comerciais em lavra, beneficiamento, carboquímica, gaseificação, combustão, siderurgia e CCT/CCS.
- Logística de distribuição para usos limpos de carvão (convencionais e tecnologias limpas) ampliada.
- Tecnologias limpas desenvolvidas com infraestrutura adequada para novos usos siderúrgicos, adequadas às características do carvão mineral nacional.
- Utilização industrial de tecnologias limpas, para novos usos siderúrgicos, adequadas às características do carvão mineral nacional.
- Processos de utilização do carvão mineral nacional desenvolvidos para uso em novas tecnologias de coqueificação, redução direta (carvão e gás) e processos de fusão-redutora (ênfase no TecnoRed).
- Utilização industrial do carvão mineral nacional para uso em pelotização de minério de ferro, coqueificação e na injeção em altos-fornos.
- Tecnologias de gestão para recuperação, monitoramento e controle ambiental desenvolvidas e adaptadas.
- Aplicação comercial das tecnologias de gestão para recuperação, monitoramento e controle ambiental desenvolvidas.



- Dispor de um parque gerador de energia elétrica moderno a partir de carvão mineral.
- Parque gerador de energia elétrica limpo, eficiente e ampliado, com maior participação do carvão mineral.
- Viabilizar a modernização do atual parque termelétrico brasileiro.

Em relação aos investimentos

- A exemplo do Estado de Santa Catarina, a CFEM recolhida em função da exploração do carvão é aplicada nos próprios estados produtores, em projetos de CCT.
- BNDES fornecendo aos investimentos em carvão mineral as mesmas condições de financiamento disponibilizadas para as outras fontes de energia, considerando critérios ambientais.
- Os recursos recolhidos pelas termelétricas a carvão sejam utilizados em projetos estruturantes, evitando a solução de continuidade (fluxo ininterrupto de recurso). Os investimentos em CCT que beneficiem outros setores (por exemplo, sequestro de carbono) recebam suporte financeiro também de outras empresas.
- Participação de empresas privadas nos investimentos de PD&I.
- Ambiente onde a empresa privada deseja investir em PD&I.
- Centros de pesquisa nacionais voltados ao CCT com custeio garantido, além de investimento articulados e financiados com a iniciativa privada.

Em relação aos aspectos regulatórios

- Ambiente favorável ao aproveitamento do carvão mineral para geração de energia elétrica, respeitando-se critérios técnico-ambientais.
- Eficiência energética das termelétricas de 40% a 45% com redução na geração de impactos/emissões.
- Impacto ambiental caracterizado baseado em parâmetros definidos.
- Legislação que regula a seleção de locais para desenvolvimentos em escala piloto de armazenamento geológico de CO₂.
- Protótipos para simulação dos processos de gaseificação de carvão incluindo eficiência térmica.
- Plantas comerciais de gaseificação de carvão, competitivas e com controle de emissões.



- Setor carbonífero envolvido nas demandas do Fundo Nacional de Mudanças Climáticas.
- Criação de cursos para formação de RH (transversal) e ampliação do número de grupos de pesquisa dedicados ao tema de tecnologias limpas do setor carbonífero.
- Capacitação de pessoal e laboratorial.
- Criar um local institucional para o setor carbonífero dentro da estrutura do MME.
- Participação da indústria nacional com pelo menos 60% de equipamentos e serviços nos projetos de grande porte. Incentivo fiscal para importação de componentes específicos não produzidos pela indústria nacional.

Ao considerar nas tecnologias elencadas no presente roadmap, o país atenderá às questões fundamentais identificadas, utilizando de forma limpa, eficiente e rentável o carvão mineral nacional.



CAPÍTULO 1

ROADMAP ESTRATÉGICO

1.1. Motivação para a construção de um *roadmap* para o carvão mineral nacional

O Brasil possui uma das maiores reservas de carvão mineral do mundo. Apenas 13 países dispõem de reservas maiores do que as suas, como se pode ver na Figura 1.1. Nessa mesma Figura, nota-se que esses 13 países são também os maiores produtores mundiais do minério, enquanto que a produção brasileira encontra-se apenas na 26ª posição, ou seja, o Brasil é o único país possuidor de grandes reservas que não se encontra entre os maiores produtores mundiais de carvão mineral (BP, 2011).

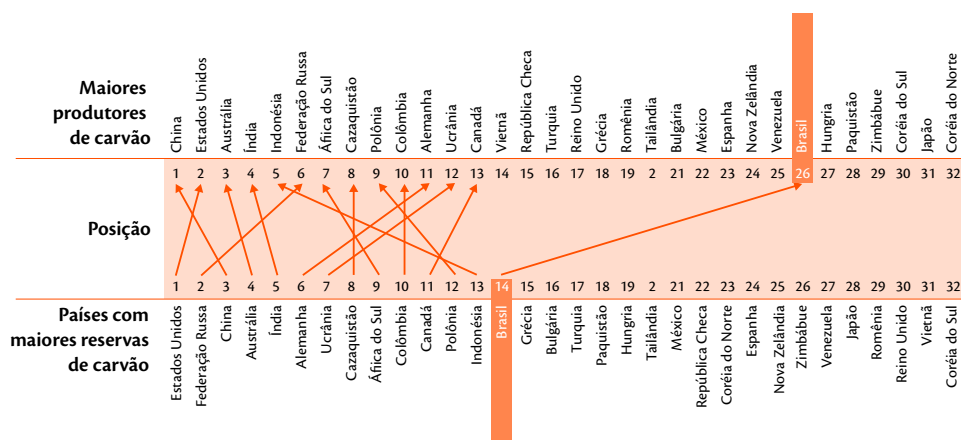


Figura 1.1 – Comparação dos países com maiores reservas provadas de carvão mineral e dos maiores produtores de carvão mineral, em 2010.

Fonte: BP Statistical Review of World Energy, June 2011 - modificado.



O recurso nacional de carvão mineral é expressivo também em termos energéticos. Como comparação, a energia dos recursos de petróleo corresponde a $2,02 \times 10^9$ tep, enquanto a energia dos recursos de carvão mineral é de $7,04 \times 10^9$ tep. Logo, a quantidade de energia armazenada nos recursos de carvão é 3,5 vezes maior que a energia contida nos recursos petrolíferos nacionais (Figura 1.2) (EPE/MME, 2011).

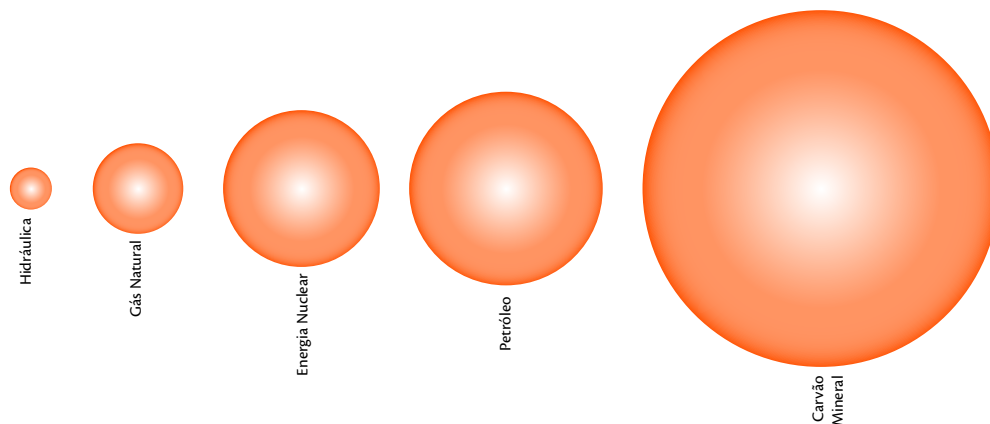


Figura 1.2 – Comparação dos recursos e reservas energéticas brasileiras em 2010.

Fonte: Ministério de Minas e Energia, Balanço Energético Nacional 2011 - modificado.

O carvão mineral possui duas aplicações principais no Brasil: utilização como combustível para geração de energia elétrica, incluindo uso energético industrial, e utilização na siderurgia para produção de coque, ferro-gusa e aço. Na atual taxa de utilização, as reservas provadas são suficientes para prover carvão por mais de 500 anos (DOE-EIA, 2011).

Verifica-se, contudo, que, além de utilizar de forma modesta a reserva de carvão nacional disponível, o país ainda importa carvão para uso siderúrgico, principalmente da Austrália, Estados Unidos, Rússia, Canadá, Colômbia, Venezuela, Indonésia e África do Sul, visto que o carvão nacional produzido não possui as propriedades adequadas para este uso com as tecnologias atualmente em operação (Figura 1.3).

Tais constatações apresentam-se como um chamado à ação: como o Brasil pode melhor utilizar essa riqueza natural? O presente documento apresenta recomendações para que, utilizando modernos recursos científicos e tecnológicos, associados a uma grande parcela de inovação, o carvão mineral nacional possa vir a ser utilizado em larga escala, de forma limpa e eficiente.

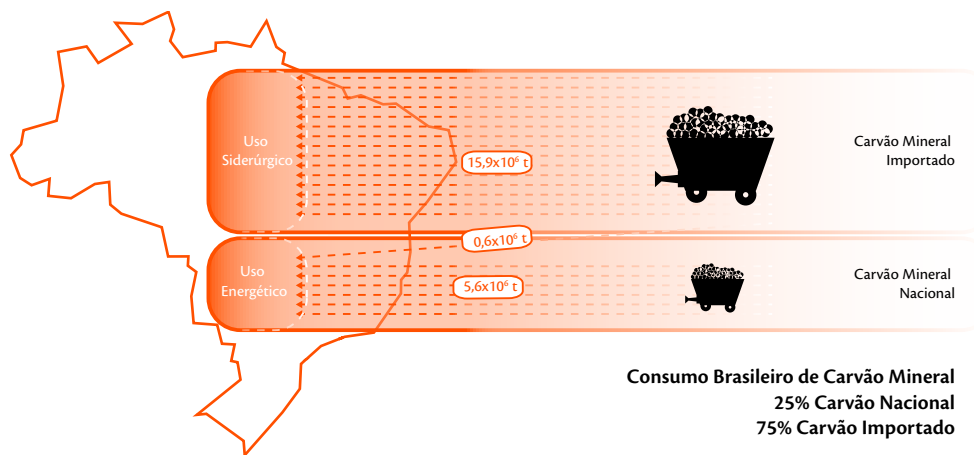


Figura 1.3 – Consumo brasileiro e origem do carvão mineral utilizado para fins energéticos e siderúrgicos.

Fonte: Ministério de Minas e Energia, Balanço Energético Nacional 2011 - modificado.

1.2. Diretrizes de políticas nacionais



Uma maior utilização do carvão mineral, seja para geração de energia elétrica, na siderurgia ou em outras aplicações, associa-se, de forma imediata, às preocupações com questões ambientais, em especial com o aumento da emissão de gases de efeito estufa.

Logo, uma política pública para melhor aproveitar o carvão mineral deve, necessariamente, estar alinhada com as diretrizes adotadas pelo Brasil nas questões relacionadas ao meio ambiente.



O Plano Nacional sobre Mudança do Clima, documento lançado em 2008, teve como objetivo incentivar o desenvolvimento de ações colaborativas com o esforço mundial de combate à mudança do clima. Esse documento, estruturado com base nas diretrizes da Política Nacional sobre Mudança do Clima, já mencionava que:

“O Brasil muito tem feito para o enfrentamento do problema [mudança do clima], tornando-se uma das principais referências mundiais quanto à conquista de soluções adequadas perante esse gigantesco desafio – a exemplo de nossa matriz energética – e estamos engajados a fazer ainda mais, no âmbito de um esforço verdadeiramente global de combate à mudança do clima.”

“O Plano Nacional sobre Mudança do Clima constitui-se em um marco relevante para a integração e harmonização de políticas públicas”.

Apenas 13,3% da matriz energética mundial é baseada em recursos renováveis (IEA, 2011). O Brasil apresenta 47,5% de sua energia produzida a partir dessas fontes (EPE/MME, 2011). Mesmo em posição de referência mundial, o país assumiu ainda um compromisso voluntário de redução das emissões projetadas de gases de efeito estufa até 2020. Esse compromisso foi estabelecido por meio da Lei no 12.187, de 29 de dezembro de 2009¹, a qual institui a Política Nacional sobre Mudança do Clima – PNMCC – conforme art. 12:

“Art. 12. Para alcançar os objetivos da PNMCC, o País adotará, como compromisso nacional voluntário, ações de mitigação das emissões de gases de efeito estufa, com vistas em reduzir entre 36,1% (trinta e seis inteiros e um décimo por cento) e 38,9% (trinta e oito inteiros e nove décimos por cento) suas emissões projetadas até 2020.”

A Tabela 1.1 e a Figura 1.4 apresentam as metas de redução das emissões gases de efeito estufa projetadas para 2020, encaminhadas à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC). Nota-se a audaciosa meta brasileira de, em 2020, emitir praticamente a mesma quantidade de gases de efeito estufa registrados em 2007.

¹ Apesar de ter sido instituída posteriormente (2009), a Política Nacional sobre Mudança do Clima já havia sido considerada para a elaboração do Plano Nacional de Mudança do Clima (2008), ainda no formato do Projeto de Lei no. 3.535, de 2008. Este foi encaminhado pelo Poder Executivo ao Poder Legislativo no ano de 2008, porém somente foi convertido na Lei no 12.187/2009 no ano seguinte. Tanto a Política quanto o Plano Nacional sobre Mudança do Clima foram resultado dos trabalhos do Comitê Interministerial sobre Mudança do Clima (CIM), instituído por meio do Decreto no 6.263, de 2007. Esse comitê foi coordenado pela Casa Civil da Presidência da República e composto por outros 17 órgãos federais, além do Fórum Brasileiro de Mudanças Climáticas.



Uma análise detalhada da Tabela 1.1 indica que, de 2007 a 2020, há previsão de crescimento das emissões de gases de efeito estufa pelo setor energético, o qual inclui eletricidade, transportes e demais usos energéticos. Mesmo após a aplicação das metas de redução, é previsto que esse setor praticamente duplique suas emissões. Uma considerável redução do desmatamento é o que permitirá, no balanço final, manter a quantidade total de emissões inalteradas.

Tabela 1.1 – Compromissos assumidos pelo Brasil para mitigação das emissões de gases de efeito estufa (valores em milhões de toneladas de CO₂ equivalente).

	1994	2005	2007	2020 Cenário tendencial	Amplitude da redução	2020 Nova expectativa	% Nova Expectativa 2020 e 2007
Agropecuária	369	480	479	627	166	461	96,2%
Indústria e Resíduos	42	55	60	92	10	82	136,7%
Energia	248	347	381	901	207	694	182,2%
Desmatamento	818	1060	770	1084	669	415	53,9%
Total de emissões	1477	1942	1690	2704	1052	1652	97,8%

Fonte: Notificação do Ministério das Relações Exteriores à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC) sobre as ações brasileiras de redução de emissões, em 29 de janeiro de 2010 - modificado.

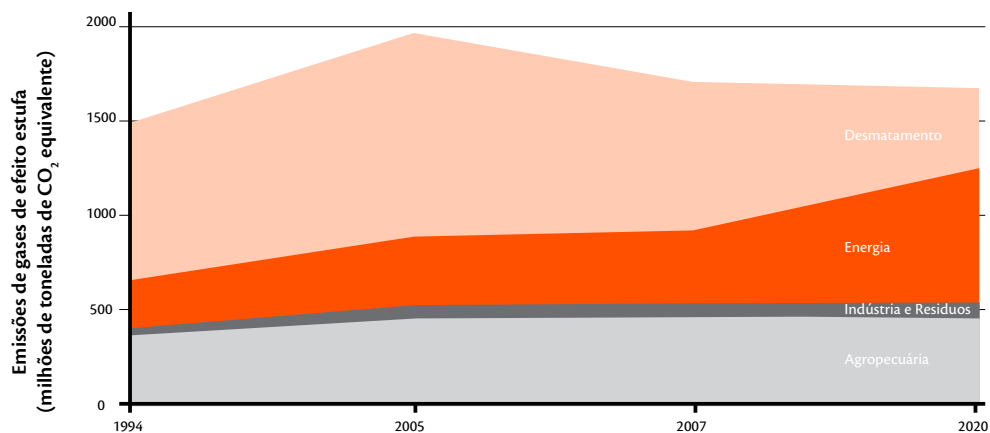


Figura 1.4 – Previsão de emissão de gases de efeito estufa para 2020 no Brasil, com expectativa de aumento das emissões no setor energético e diminuição das emissões geradas pelo desmatamento.

Fonte: Notificação do Ministério das Relações Exteriores à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC) sobre as ações brasileiras de redução de emissões, em 29 de janeiro de 2010 - modificado.



O Decreto no 7.390, de 9 de dezembro de 2010, regulamenta o artigo 12 da Lei no 12.187, o qual eleva a nova expectativa das projeções de emissões de gases de efeito estufa do setor energético para o ano de 2020 para 868 milhões de toneladas de CO₂ equivalente. Esse incremento nas emissões considera a situação da demanda de energia projetada para 2020 ser atendida por meio de fontes fósseis.

O Plano Nacional de Energia 2030 prevê um crescimento acentuado da demanda elétrica nacional, para que o país tenha energia suficiente para atender ao crescimento econômico, e para isso é necessário expandir o parque gerador nacional, considerando todas as fontes disponíveis, inclusive o carvão mineral:

“O esforço em pesquisa e desenvolvimento parece indicar que o mundo não descarta, absolutamente, o uso do carvão como fonte primária para a geração de energia elétrica. A abundância das reservas de carvão, os avanços tecnológicos já consolidados e os que são esperados nos próximos anos, o aumento esperado da demanda de energia, em especial da demanda por energia elétrica, são, portanto, os elementos básicos que sustentam a visão de que a expansão da geração termelétrica a carvão faz parte da estratégia da expansão da oferta de energia.”

“A oferta de tecnologias que permitem o uso de carvões mais pobres e oferecem a possibilidade da ‘queima limpa’, a alta do preço de seus principais concorrentes no mundo – gás natural e petróleo – e a perspectiva de dificuldades no aproveitamento dos recursos hidrelétricos ainda disponíveis no país aumentaram as atenções para uma possível expansão do parque termelétrico a carvão.”

Apesar de ser previsto crescimento, o Plano Nacional sobre Mudança do Clima alerta sobre a importância do controle da trajetória das emissões:

“A premissa dos esforços do Brasil é o seu compromisso em reduzir a desigualdade social e a aumentar sua renda buscando uma dinâmica econômica cuja trajetória de emissões não repita o modelo e os padrões dos países que já se industrializaram.”

Ao comparar as emissões de CO₂ por energia primária dos países possuidores das maiores reservas provadas de carvão mineral, nota-se que o Brasil assume a liderança, com a menor quantidade de emissões por unidade de energia (Figura 1.5). Devem ser utilizadas tecnologias para o uso limpo e eficiente do carvão mineral para que o país possa manter essa posição de destaque mundial.

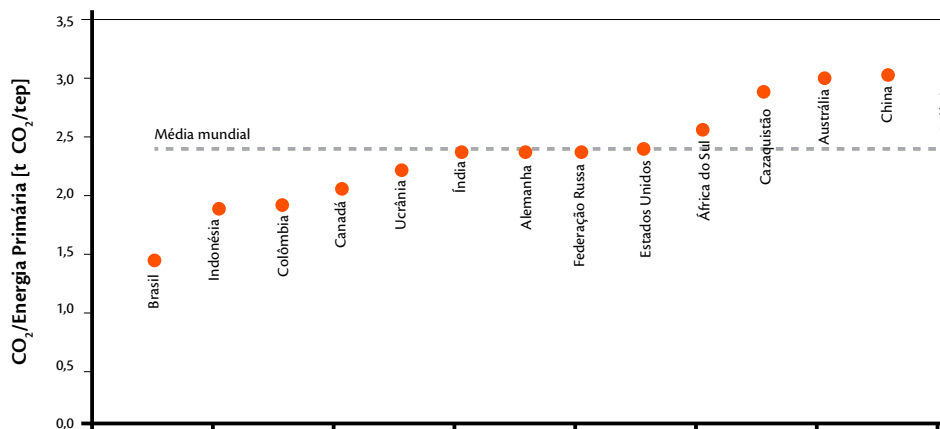


Figura 1.5 – Gráfico comparativo da emissão de CO₂ por energia primária nos países com as maiores reservas provadas de carvão mineral.

Fonte: Agência Internacional de Energia, 2011 Key World Energy Statistics - modificado.

O Plano Nacional de Mineração 2030 apresenta importante diretriz sobre o assunto, identificando as três principais aplicações para o carvão mineral, a saber, geração termelétrica, siderurgia e carboquímica:

“O grande desafio é a produção e uso limpo do carvão mineral por meio de: 1) desenvolvimento de tecnologias limpas na cadeia produtiva; 2) desenvolvimento tecnológico e inovação aplicado à cadeia produtiva carbonífera, em especial para geração termelétrica, siderúrgica e carboquímica; e, 3) desenvolvimento de tecnologias para recuperação do passivo ambiental da bacia carbonífera de Santa Catarina.”

O Plano Nacional de Mineração 2030 também vislumbra o país como capaz de alcançar liderança mundial em tecnologia, após investimentos estratégicos em PD&I:

“O desafio é aumentar substancialmente os recursos disponíveis em PD&I para o setor mineral, públicos e privados, em volume compatível com sua importância econômica. Numa perspectiva de médio e longo prazo, as ações deverão se voltar para transformar o País em uma liderança mundial em tecnologia no setor em que apresenta vocação natural com condições para ampliar sua competitividade.”



Por fim, a Estratégia Nacional de Ciência, Tecnologia e Inovação 2012-2015, a respeito do desenvolvimento de uma economia de baixo carbono, apresenta a seguinte guia:

“A economia verde, entendida como uma economia que promoverá o crescimento econômico tendo como vetor central a vertente ambiental e a inclusão produtiva, pode ser a grande aposta estratégica brasileira. Para ser viável, deverá promover profunda transformação no setor produtivo: envolverá novos processos de produção e novos produtos e materiais recicláveis, que evitarão a utilização crescente de recursos naturais, entre outros aspectos que serão necessariamente abordados para atender a hábitos de consumo de uma sociedade ambientalmente consciente. Ou seja, não basta apenas desenvolver tecnologia e inovação, elas têm de conduzir a um novo paradigma de produção e consumo. Essa é uma das vertentes centrais de onde pode provir o salto tecnológico brasileiro.”

A Estratégia Nacional de Ciência, Tecnologia e Inovação 2012-2015 prevê investimentos em PD&I em carvão mineral, como programa complementar. O planejamento de PD&I em energia e recursos minerais identifica o carvão mineral como um de seus subprogramas. Além disso, o programa Ciência Sem Fronteiras indica, como tema e área de interesse, o carvão mineral.

O *roadmap*, visando propor rotas tecnológicas para o uso limpo e eficiente do carvão mineral nacional, de forma alinhada com as diretrizes das políticas nacionais que possuem interface com o carvão mineral, apresenta encaminhamentos que atendem às seguintes questões fundamentais:

Questões fundamentais

- Quais inovações e legislações são necessárias para que a trajetória de emissões do Brasil não repita o modelo e os padrões dos países que já se industrializaram?
- Quais as ações necessárias para transformar o país em uma liderança mundial em tecnologia no setor carbonífero?
- Quais inovações são necessárias para que novos processos de produção e novos produtos tomem lugar de forma economicamente viável e dentro da visão de economia verde?
- Quais desenvolvimentos tecnológicos e inovações são necessários à cadeia produtiva carbonífera, em especial para geração termelétrica, siderúrgica e carboquímica, visando aumentar a competitividade?



1.3. Principais estratégias propostas

A produção e uso limpo e eficiente do carvão mineral nacional deve utilizar-se de avançados recursos científicos e tecnológicos, aliados a um grande esforço de inovação, para possibilitar maior uso de aplicações na carboquímica, geração termelétrica e siderurgia. As seguintes estratégias devem ser adotadas, como resposta às questões fundamentais elencadas:

1.3.1. Gerar produtos de elevado valor agregado

O carvão é um composto carbonoso de origem fóssil, que se diferencia do petróleo basicamente pela quantidade de hidrogênio (USGS, 2002), além de não ter sofrido efeito de temperaturas elevadas na sua formação. Quimicamente ambos são considerados hidrocarbonetos e podem ser utilizados tanto para geração de energia quanto para produção de compostos alifáticos e aromáticos (LEVINE, 1982). Por ser sólido e com extração mais barata, ao longo dos anos o carvão foi direcionado, naturalmente, para a geração de energia elétrica e térmica. Nesta aplicação, o aproveitamento energético do mineral é de, no máximo, 50%, e o retorno financeiro da operação é de 1:3, ou seja, cada R\$ 1,00 de carvão extraído resulta em R\$ 3,00 de energia vendida².

Uma possibilidade de aproveitamento do carvão mineral nacional é direcioná-lo para a produção de materiais poliméricos e carbonosos, ou seja, o que é produzido atualmente pela petroquímica também ser produzido pela carboquímica. Estima-se que a obtenção de compostos como polietileno e polipropileno, a partir da gaseificação do carvão mineral, apresenta um retorno financeiro na razão de 1:10. A Figura 1.6 apresenta uma comparação dos valores agregados dos produtos que podem ser obtidos por meio deste processo (BARE, 2007).

O desenvolvimento da indústria carboquímica é uma realidade em muitos países do mundo, porém, no Brasil, várias das tecnologias necessárias estão em estágios embrionários ou são inexistentes. Naturalmente, isso não inviabiliza uma estratégia neste sentido, pois o país já é detentor de know-how nos processos de refino de petróleo e petroquímica, que, devido à semelhança química, são muito compatíveis com aqueles utilizados na transformação do carvão, com exceção do processo de gaseificação.

² Cálculo considerando o valor do carvão com 4500 kcal/kg entre R\$ 60,00 a R\$ 120,00 por tonelada e o valor de venda da energia entre R\$ 0,11 a R\$ 0,22 o kWh.

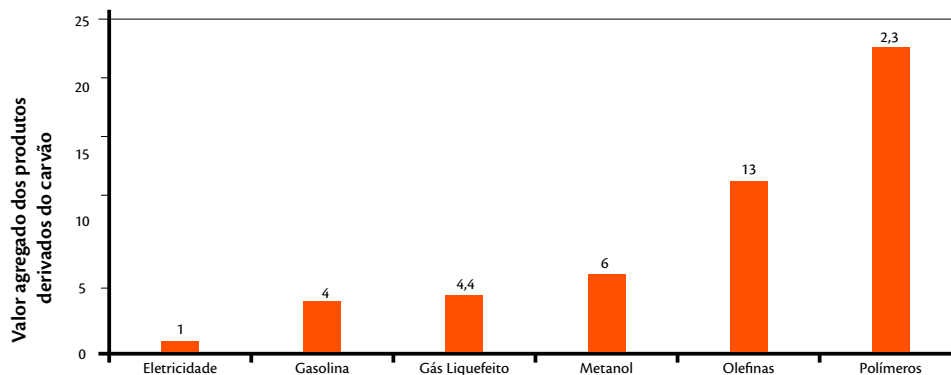


Figura 1.6 – Comparação do valor agregado dos produtos obtidos a partir do carvão.

Fonte: BARE, 2007 - modificado.

1.3.2. Investir no domínio de tecnologias-chave que permitam diversificar o uso do carvão

A indústria carboquímica, a exemplo da petroquímica, é um das opções mais rentáveis e eficientes para o aproveitamento do carvão mineral, porém esta exige, primeiramente, investimentos no desenvolvimento das tecnologias de gaseificação.

A gaseificação é uma maneira eficiente de explorar e transformar o carvão mineral. Por meio desse processo, é possível obter um gás para síntese química, o gás de síntese ou syngas. Este pode ser utilizado diretamente como combustível, com queima direta em motores alternativos ou turbinas para geração de energia elétrica, ou ser disponibilizado como matéria-prima estratégica para diversas aplicações industriais. O syngas é um composto de síntese que pode ser utilizado em combinação com diversos reagentes para obtenção de vários produtos, tais como:

- Combustíveis líquidos (nafta, querosene e diesel);
- Lubrificantes de alto desempenho e parafinas;
- Metanol e Dimetiléter;
- Hidrogênio;
- Fertilizantes nitrogenados (ureia).



Segundo o pesquisador Theo Fleisch, da companhia British Petroleum - BP, “os processos químicos a partir do gás de síntese serão a tecnologia chave para o século XXI” (FLEISCH, 2006). Ele afirma isso demonstrando a flexibilidade e as possibilidades do composto gasoso CO/H₂. O principal fator, segundo ele, é que o syngas permite a utilização da rota MTO (methanol to olefins), a qual permite o desenvolvimento e a inovação nas áreas de energia e novos materiais. Na Figura 1.7 estão apresentadas as possibilidades de aplicações do syngas.

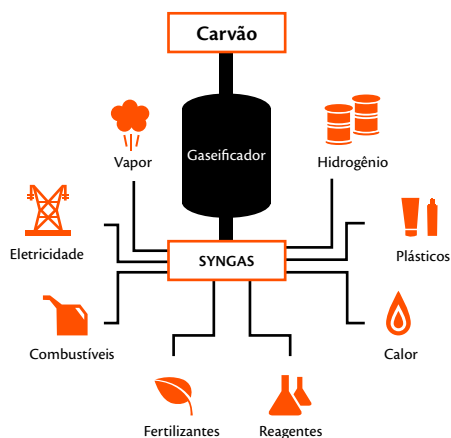


Figura 1.7 – Usos e aplicações do syngas a partir da gaseificação do carvão mineral.

Fonte: GTC publicações – modificado.

A petroquímica brasileira foi implantada há menos de 50 anos por meio de políticas públicas pró-ativas. Atualmente, o Brasil é o maior produtor de etileno da América Latina e 12º no ranking mundial. Em 2006, o faturamento das empresas de 1ª e 2ª gerações alcançou US\$ 23 bilhões, correspondendo a 80 % de todo o setor químico nacional. Entretanto, o segmento enfrenta um novo desafio, a oferta de matéria-prima (BASTOS, 2009).

A nafta, termo genérico para frações leves do petróleo, é o principal composto utilizado nas empresas petroquímicas (FAHIM, 2011). O petróleo nacional, apesar de ser abundante, é composto por 80% de fração pesada, o que limita obtenção deste insumo. Atualmente, o país importa 30% de toda a nafta consumida pelos polos petroquímicos, e essa possui seus preços determinados por cotações internacionais. Como esta matéria-prima representa 75% dos custos de produção, a expansão deste setor é considerada crítica pelos empresários do setor. Segundo projeções da



Associação Brasileira da Indústria Química (Abiquim), o déficit de nafta irá continuar até o ano de 2020. Portanto, um possível aumento da demanda interna irá provocar um déficit na balança comercial dos derivados de petróleo, impactando diretamente em outros setores.

A oferta de nafta estará limitada nos próximos anos e dependerá muito dos investimentos futuros do pré-sal. Diante deste cenário de restrição de oferta para as petroquímicas, o desenvolvimento da indústria carboquímica, com a rota MTO, é uma importante opção estratégica para o setor.

1.3.3. Gerar produtos que contribuam para a redução dos gases de efeito estufa

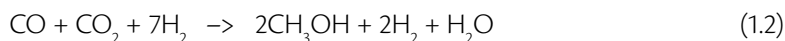
O metanol, ou álcool metílico, é um combustível utilizado em larga escala em substituição à gasolina em muitos países do mundo. É um composto químico encontrado na forma líquida, inflamável e possui uma chama invisível. A rota mais comum para sua produção é através do gás de síntese (syngas) a partir do gás natural. No Brasil, a empresa Metanor S.A. (Metanol do Nordeste) já utiliza esta rota desde 1976.

O metanol é uma matéria-prima com inúmeras aplicações tecnológicas. O produto é utilizado na indústria como solvente, matéria-prima para polímeros, resinas, reagentes farmacológicos e, principalmente, na transesterificação da gordura animal para a produção de biocombustíveis (METHANOL INSTITUTE, 2011).

A indústria de produção de metanol é consolidada, assim como sua tecnologia. Seu processo principal de obtenção decorre da reação química catalisada do syngas:



ou



Conforme evidenciado na reação (1.2), todos os compostos fundamentais são do gás de síntese, porém, há a possibilidade do consumo do gás CO_2 durante este processo (OLAH, 2009).



A produção de metanol é considerada uma oportunidade de reciclagem do dióxido de carbono e uma forma de reduzir as emissões associadas ao uso das reservas fósseis, quando um produto perene for sintetizado a partir deste Carbon Recycling International. Já disponível comercialmente, no início do mês de junho de 2012 entrou em operação, na Islândia, a primeira planta comercial que utiliza CO_2 para produção de metanol, com o nome do pesquisador e defensor da Economia do Metanol, “George Olah”, prêmio Nobel de Química.

1.3.4. Garantir eletricidade necessária para o país crescer

O desenvolvimento industrial mundial se baseou principalmente na energia disponibilizada pelas reservas fósseis, notadamente o carvão. Atualmente, os países emergentes com crescimento mais impressionante, tais como China e Índia, estão aumentando sua disponibilidade de energia, requisito indispensável para o crescimento industrial, e para isto estão ampliando a utilização de suas reservas em carvão.

Como país emergente, o Brasil também precisa manter seus investimentos em energia para sustentar o crescimento econômico, manter sua independência energética e, como situação desejável, tornar-se exportador de energia. Frente a esta expectativa, o aspecto segurança energética é fundamental. Costuma-se dizer que, em um país de dimensões continentais, sempre haverá complementaridade entre as regiões quanto à chuva e aos ventos, o que asseguraria a disponibilidade de energia. Este seria, certamente, um argumento muito forte a favor das fontes alternativas, não fosse a ocorrência, em 2001, de situações de racionamento causadas por inadequações no ambiente regulatório, que não incentivaram os investimentos no setor, agravadas por mudanças no regime de chuva. Pesa ainda mais o fato de que os novos aproveitamentos hidrelétricos deverão ser majoritariamente a fio d’água ou com pequenos lagos, ou seja, com mínima acumulação. Soma-se a isto a noção de que a matriz elétrica requer uma proporção adequada de energia de base, fornecida por termelétricas, seja a combustíveis fósseis, como carvão ou gás, seja a biomassa ou term nucleares, cada qual possuindo um potencial de risco e impacto ambiental.

A geração termelétrica a carvão, visando fornecer segurança energética, possui alto potencial de redução de emissão de gases de efeito estufa por unidade de energia gerada, mediante o aumento da eficiência dos processos e pela aplicação de tecnologias de reciclagem, captura e armazenamento de CO_2 .



1.3.5. Buscar isonomia entre a geração termelétrica a carvão e as demais fontes, respeitados critérios ambientais

Como os últimos leilões de energia não contemplaram as termelétricas, isto representou uma sinalização negativa para os investidores e pesquisadores nos temas correlatos. O que se propõe é a discussão dos critérios para as diversas fontes, tanto nos leilões como nas linhas de crédito e financiamento, com o estabelecimento de regras adequadas quanto às questões ambientais.

1.3.6. Aumentar a eficiência das termelétricas

A produção de syngas ampliará as aplicações do carvão mineral, além de torná-lo mais eficiente e rentável, tanto para geração de energia como para outros segmentos.

A maioria das usinas termelétricas nacionais apresenta rendimentos compatíveis com a tecnologia adotada, mas abaixo das disponíveis atualmente. Investimentos nos processos e novas tecnologias podem mudar essa realidade rapidamente. Se esses vierem integrados às unidades de síntese de metanol e ou metanol para olefinas, os resultados econômicos e ambientais podem ser ainda mais favoráveis.

As termelétricas a carvão no Brasil, com exceção de Candiota Fase C e Jorge Lacerda IV, são antigas e, segundo o PNE 2030 (EPE/MME, 2007) atingem um rendimento máximo de 35%. A adoção de novas tecnologias, como caldeiras supercríticas ou IGCC, podem proporcionar um rendimento acima de 40% com menores índices de emissões. Desta forma, o rendimento médio das termelétricas poderá aumentar significativamente. Com a adoção de tecnologias de limpeza de gases, pode-se equiparar ou mesmo superar os níveis de emissões de combustíveis mais limpos e também mais caros, como o gás natural. Também é importante que as plantas mais ineficientes sejam descomissionadas, mas isto só poderá ocorrer se novas plantas, com tecnologias mais eficientes, forem instaladas para substituí-las.

Com o avanço das novas tecnologias e o descomissionamento de plantas que não conseguirem um rendimento mínimo aceitável, aliado à adoção de dispositivos de limpeza de gases e separação de CO₂, o aumento da eficiência energética, com redução de impactos/emissões atmosféricas, poderá ser atingido.



1.3.7. Reduzir a emissão de gases de efeito estufa nas termelétricas

Para a geração de energia em larga escala, há que se considerar a questão dos gases causadores do efeito estufa e contaminantes. É imprescindível direcionar os investimentos, tanto em pesquisa como em desenvolvimento industrial, para as tecnologias com potencial de apresentar os melhores retornos também neste aspecto. Os índices de emissões por unidade de energia gerada devem ser reduzidos mediante a adoção de tecnologias de carvão limpo (CCT), que efetivam o aumento da eficiência das plantas termelétricas, e tecnologias CCS, de separação e armazenamento de gás carbônico.

Para estimular a principal tecnologia sugerida neste roadmap, “gaseificação integrada com ciclo combinado – IGCC ou poligeração”, os órgãos de fomento devem investir em três temas estratégicos principais: desenvolvimento de gaseificadores adequados para o carvão nacional, desenvolvimento de tecnologias para separação de gases nas condições de uma planta termelétrica, tanto para produção de O_2 como para separação de CO_2 , além de armazenamento geológico de CO_2 . Há também oportunidade para o aproveitamento do CO_2 em recuperação avançada de petróleo (*enhanced oil recovery - EOR*) ou metano (*enhanced coal bed methane - ECBM*),

Uma medida importante a ser efetivada, em curto prazo, é estruturar estudos para verificar a operação das termelétricas a carvão mineral em conjunto com as plantas de energias renováveis, verificando a tecnologia e projetos de usinas que propiciem a flexibilização da sua operação para suportar a intermitência das fontes renováveis, otimizando sua operação.

Uma proposta a ser considerada é o estudo do conceito *capture ready*, ou seja, independentemente da tecnologia adotada, as novas termelétricas podem ser projetadas para possibilitar a inclusão, quando os mesmos estiverem comercialmente disponíveis, de dispositivos de captura de CO_2 . Este estudo é importante para verificar a adequação deste conceito às plantas flexíveis necessárias para a operação no sistema hidro/eólico/térmico.

1.3.8. Estimular o desenvolvimento industrial nacional

Há grandes oportunidades de desenvolvimento e de investimento industrial na geração termelétrica. Pode-se citar, como áreas onde já há base industrial ou de pesquisa, a de materiais e equipamentos para as novas tecnologias de geração e o desenvolvimento de materiais resistentes a altas temperaturas e a condições específicas de corrosão ou erosão. Também em coprodutos a partir da cinza, especialmente na produção de zeólitas, há possibilidade de o país despontar como



desenvolvedor de tecnologia de fabricação em grande escala. Para isto, a pesquisa que já existe deverá ser incubada e desenvolvida em escala industrial visando também ao mercado externo.

1.3.9. Aproveitar coprodutos oriundos da queima do carvão

O carvão mineral nacional possui grande proporção de matéria mineral (cinza), o que traz dificuldades técnicas adicionais para sua utilização na geração termelétrica, sendo este um dos motivos para seu inexpressivo aproveitamento no Brasil. No entanto, a cinza pode atuar como catalisador das reações de gaseificação, além de ser um insumo valioso, podendo-se dela obter derivados tais como cimento, sílica e metais, fertilizantes e zeólitas (FUNGARO, 2009), entre outros. Vários setores industriais podem se beneficiar da cadeia produtiva da cinza, com a consequente geração de oportunidades e empregos.

1.3.10. Dominar tecnologias de interesse mundial

Os carvões de baixa qualidade estão despertando interesse crescente no mundo, em virtude da depleção dos estoques dos melhores carvões e do aumento exponencial da demanda energética. O Brasil, com seu carvão com elevada quantidade de cinzas, tem em mãos uma oportunidade única de despontar como desenvolvedor e exportador de tecnologias para o aproveitamento limpo deste tipo de recurso energético, desde que faça os investimentos em pesquisa e mão de obra, com o envolvimento proativo dos diversos segmentos da cadeia produtiva e de pesquisa e formação de mão de obra especializada. Neste sentido, a posição do Brasil como país com responsabilidade ambiental poderá até mesmo ser reforçada, enquanto, concomitantemente, se estará gerando riqueza interna pela movimentação do mercado, ampliação da base científica e aumento do vigor da economia.

A grande disponibilidade do recurso mineral, aliada à facilidade de mineração, a maior parte a céu aberto, além de um bom desenvolvimento do país no setor metal-mecânico, são as bases para o país se tornar referência mundial no tema.

1.3.11. Promover maior integração entre empresas e academia

Os editais dos órgãos de fomento são os balizadores da pesquisa no Brasil, direcionando as atividades de pesquisadores e das redes. No entanto, para que a pesquisa saia do âmbito experimental e passe à esfera industrial, é necessário estímulo a uma maior integração entre academia e



indústria. Este objetivo vem sendo perseguido há muito tempo, como demonstram várias ações institucionais neste sentido. No entanto, muito ainda deve ser feito para que a sinergia entre academia e indústria atinja os níveis que podem ser observados nos países desenvolvidos e que despontam pelo seu protagonismo tecnológico. Necessita-se de uma mudança de paradigma; ações de convencimento e articulação devem ser empreendidas em grande escala, tanto na academia como na indústria.

1.3.12. Caracterizar o carvão para identificar a melhor aplicação de cada jazida

Ao se tratar de desenvolvimento ou adequação de tecnologias para carvões brasileiros, uma das maiores dificuldades é o desconhecimento das características deste carvão, aqui incluída a necessidade de adequação dos laboratórios existentes tendo em vista toda a cadeia de utilização. Por exemplo, os testes de coqueificação piloto e caracterização do coque experimental resultante encontram-se disponíveis essencialmente nos laboratórios privativos das grandes siderúrgicas, restringindo a disseminação dos estudos e respectivos resultados para a comunidade técnico-científica. Embora muitos trabalhos já tenham sido realizados, falta uma sistematização de resultados. Além disto, os dados são muitas vezes incompletos, não se podendo tirar deles, por exemplo, parâmetros para a simulação numérica precisa das reações de combustão e gaseificação. Torna-se, portanto, imperativo empreender este esforço coletivo para que se possa disponibilizar um banco de dados confiável que se constitua a base das pesquisas e projetos de viabilidade do setor. O país possui um enorme recurso mineral e é necessário investir em geologia para transformá-los em reservas. É necessária, também, investir na capacitação técnica do pessoal envolvido, não apenas quanto à utilização dos equipamentos e realização dos ensaios, mas também quanto à análise dos resultados com visão crítica, posicionando-se no referencial do usuário final.

1.3.13. Dominar tecnologia de produção de carvão nacional com qualidade para uso siderúrgico

O carvão mineral, coqueificável ou não-coqueificável, é um redutor/combustível primordial na produção de aço. Isso significa que, para produzir aço, o Brasil vai necessitar de carvão mineral e vai continuar importando essa matéria-prima com uma tendência de custo cada vez maior. É neste contexto que se vislumbra a participação do carvão nacional beneficiado a baixos teores de cinzas e enxofre nos diversos processos siderúrgicos na forma de misturas com os carvões



importados. O carvão nacional conhecido e já caracterizado, não apresenta propriedades químicas adequadas para que seja totalmente utilizado (100%) na maioria dos processos siderúrgicos. A exceção é a utilização no processo de redução direta, que já foi comprovada em nível industrial pós-maduro em diversos países. A fluidez ou plasticidade Gieseler (norma ASTM D 2639) do carvão nacional de Santa Catarina, produzido a partir da camada Barro Branco até o início da década de 1990, era bastante apreciada pelos siderurgistas para uso na mistura a coqueificar. Os fatores limitantes de seu uso foram essencialmente os elevados teores de cinza e enxofre e seu custo de extração e entrega no usuário final, o que o inviabilizou nas misturas a partir de 1990-1991. Ao se falar em dominar a tecnologia de produção de carvão nacional com qualidade para uso siderúrgico, há que se manter em foco a possibilidade de se voltar a produzir carvão metalúrgico alto volátil de alta fluidez e cinza e enxofre adequados, de viável utilização na produção de coque para altos-fornos de grande porte.

1.3.14 – Promover tecnologias de mistura do carvão mineral nacional com biomassa visando à redução das emissões na siderurgia

Ao longo das últimas décadas a indústria siderúrgica tem feito significativos esforços para reduzir o consumo de energia e diminuir as emissões de CO_2 através de melhoria da eficiência energética, redução do consumo de coque e carvão e utilização de coprodutos. Atualmente, a produção de uma tonelada de aço utiliza metade da energia requerida na década de 1970. A maior fonte de emissão de CO_2 na siderurgia é no uso de carvão e seus derivados para redução dos óxidos de ferro a ferro metálico (CARPENTER, 2012).

Misturas de biomassas com carvão nacional podem ser aplicadas em diferentes etapas do processo siderúrgico, tais como: processo de coqueificação, injeção pelas ventaneiras dos altos-fornos, pelletização e briquetes auto-redutores para processos alternativos de produção de ferro primário. Em todos esses processos deve-se estudar o tipo de biomassa mais adequado, a necessidade de pré-tratamento da biomassa e o tipo de tratamento físico e químico mais apropriado, considerando as particularidades de cada etapa do processo siderúrgico. Tudo isso com o objetivo de manter a qualidade das matérias-primas e a eficiência do processo de fabricação do ferro-gusa, uma vez que se busca a diminuição das emissões de CO_2 mediante a substituição de parte do combustível fóssil por energias renováveis.



Estudos sobre o uso de biomassa em misturas a coqueificar vêm despertando bastante interesse (SILVA, A.M. et al, 2007; THOMAS, S., MCKNIGHT, S.J., SERRANO, E.J., 2011). O uso de biomassa para injeção em altos-fornos (PCI) e em briquetes autorredutores é também promissor. Estudos em escala de laboratório estão sendo feitos para determinar as melhores condições para aplicação de biomassa em misturas com diversos tipos de carvões (MACHADO, 2010). Em relação ao carvão nacional, a grande vantagem da mistura com a biomassa é a obtenção de teores de cinzas e enxofre adequados ao uso siderúrgico, visto que as biomassas apresentam teores muito baixos desses elementos. A aplicação industrial dos resultados obtidos pode-se dar, em curto prazo, no caso do PCI, desde que o produto obtido tenha preço competitivo em relação aos carvões importados.

1.3.15 – Investigar possibilidades de utilização do carvão nacional em aplicações não energéticas

Estudos realizados com semicoques ou chars, obtidos a partir da decomposição térmica de carvões, encontra aplicações potenciais como sucedâneo de peneiras moleculares ou zeólitas com aplicações diversas em processos de adsorção, como tratamentos de águas e esgotos (CALDEIRA, 1981 e FUNGARO 2009).



CAPÍTULO 2

ROADMAP TECNOLÓGICO

Após consultas a inúmeras entidades setoriais, empresas, universidades, centros de pesquisas e pesquisadores, neste capítulo são descritos os resultados das análises prospectivas associadas ao desafio da produção e uso, de forma limpa e eficiente, do carvão mineral na carboquímica, siderurgia e geração termelétrica, considerando-se os horizontes temporais 2012-2022 e 2023-2035. De forma objetiva, inicia-se com a definição das metas temporais, em resposta à seguinte questão: “O que é fundamental alcançar no período para que o desafio da produção e uso, de forma limpa e eficiente, do carvão mineral nacional possa ser efetivamente superado?”

Em sequência, são apresentados os tópicos tecnológicos associados, incluindo o mapa tecnológico com as trajetórias desses tópicos até o horizonte de 2035. Os resultados da análise conjunta do mapa tecnológico e do portfólio estratégico são discutidos com indicação objetiva dos desenvolvimentos mais promissores para o país.

Complementando-se as análises, apontam-se os gargalos e prioridades de ações de suporte para a consecução da visão de futuro construída, a partir do respectivo mapa tecnológico e portfólio estratégico de PD&I.



2.1 – Carvão mineral nacional na carboquímica

2.1.1 – Metas a serem alcançadas em 2022 e 2035

Tabela 2.1 – Metas da carboquímica para 2022 e 2035.

Metas até 2022	Tipos de carvão e jazidas carboníferas caracterizadas.
	Processos químicos da gaseificação dominados.
	Tecnologias para gaseificação, síntese de metanol e de outros produtos carboquímicos desenvolvidas no país.
	Unidades pilotos de gaseificadores em operação.
	Utilização de sondagens direcionais para utilização em gaseificação in situ.
	Produtos e coprodutos do carvão, com perspectivas promissoras de mercado, identificados (metanol, dimetiléter, hidrogênio, olefinas, fertilizantes, uréia, amônia, ácido sulfúrico e enxofre, etc).
	Coprodutos dos processos carboquímicos caracterizados (cinzas, argilominerais, produtos oriundos da dessulfurização).
	Impactos ambientais dos processos carboquímicos identificados e comparados com outros usos do carvão mineral.
Metas até 2035	Desenvolvimento de materiais carbonosos inovadores (nanomateriais tais como nanofibras e fulerenos, carvões ativados, carvões mesoporosos e grafite).
	Processos e produtos carboquímicos desenvolvidos em escala piloto, de demonstração, e prontos para aplicação comercial.
	Pólos carboquímicos implantados em escala comercial.

2.1.2 – Tópicos tecnológicos associados

A Tabela 2.2 apresenta os tópicos associados à produção e uso, de forma limpa e eficiente, do carvão mineral nacional na carboquímica, incluindo seus descritivos. Uma vez definidos os tópicos, esses foram avaliados quanto ao estágio de maturidade tecnológica no mundo e no Brasil.

O conceito de maturidade tecnológica indica o estágio de evolução de uma dada tecnologia e o campo de ação para avanço adicional, considerando-se o estado-da-arte em nível mundial. As tecnologias podem ser classificadas em: 1) embrionárias; 2) em crescimento; 3) maduras; e, 4) pós-maduras (Figura 2.1).



As referências alfa-numéricas, na primeira coluna do quadro, foram adotadas ao longo de toda a construção do mapa tecnológico e do portfólio estratégico de PD&I associados ao desafio da produção e uso, de forma limpa e eficiente do carvão mineral na carboquímica.

Tabela 2.2 – Tópicos associados à produção e uso, de forma limpa e eficiente do carvão mineral na carboquímica.

Ref.	Tópicos associados	Descritivo
T1a	Gaseificação em grande escala	Processo de gaseificação em leito fluidizado circulante ou outros tipos de reatores, incluindo equipamento e desenvolvimento de catalisador.
T1b	Gaseificação in situ em grande escala (UCG)	Poços verticais e horizontais (tipologia de agentes oxidantes - ar, oxigênio, água e CO ₂)
T1c	Reator de ajuste da proporção CO-H ₂ (watergas shift) em grande escala	Desenvolvimento e adaptação de condições operacionais e catalisador para grande escala
T1d	Síntese do metanol em média e grande escala	Scale-up da tecnologia já existente no Brasil para pequena e média escala
T1e	Liquefação de carvão (processamento de carvão com extração por solventes)	Estudos iniciais para produção de hidrocarbonetos a partir de processamento de carvão com extração por solvente
T1f	Obtenção de produtos a partir do gás de síntese	Metanol, Hidrogênio, Uréia
T1g	Rota MTO (Methanol to Olefins)	Geração de eteno, propeno e outras olefinas. Depende da gaseificação.
T1h	Rota CTL (Coal to Liquids)	Geração de combustíveis líquidos de alto desempenho (diesel, nafta petroquímica, GLP) e de lubrificantes e parafinas.
T1i	Obtenção de Dimetiléter por síntese direta	Geração de dimetiléter em uma única etapa a partir de gás de síntese.
T1j	Obtenção de Dimetiléter por desidratação de metanol	Geração de dimetiléter em duas etapas, sendo a primeira a síntese de metanol e a segunda a desidratação deste a DME.

O processo de obtenção de um gás a partir de material sólido, no caso do carvão, é conhecido desde o início do século passado. Em 1921, na Alemanha, Fritz Winkler patenteou a primeira rota, permitindo a produção de combustíveis, synfuel, durante a II Guerra Mundial. Na Figura 2.2 está apresentado o esquema de funcionamento do gaseificador de Winkler (SÁNCHEZ).

Independentemente da forma ou rota, o princípio químico da gaseificação de carvão decorre de uma combustão parcial do carvão em temperaturas elevadas, que, em contato com vapor de água (H₂O) e oxigênio (O₂), resulta em um composto de síntese denominado de gás de síntese (syngas). Este, por sua vez, é constituído basicamente pelos gases: CO (monóxido de carbono) e H₂ (hidrogênio), que, de acordo com a tecnologia de gaseificação ou qualidade do



carvão, são obtidos com diferentes faixas de estequiometria: baixa, $H_2/CO = 0,4 - 0,8$; moderada, $H_2/CO = 0,8 - 1,5$ e alta $H_2/CO = 1,8 - 2,5$. Para cada uma destas diferentes combinações, atualmente já existem produtos sendo comercializados por empresas como: Shell, Tennessee Eastman e Sasol.

	Carboquímica	Inexistente	Embrionária	em crescimento	Madura	Pós-madura
T1a	Gaseificação em grande escala					
T1b	Gaseificação in-situ em grande escala (UCG)					
T1c	Reator de ajuste da proporção CO-H ₂ (watergas shift) em grande escala					
T1d	Síntese do metanol em média e grande escala					
T1e	Liquefação de carvão (processamento de carvão com extração por solventes)					
T1f	Obtenção de produtos a partir do gás de síntese					
T1g	Rota MTO (Methanol to Olefins)					
T1h	Rota CTL (Coal to Liquids)					
T1i	Obtenção de Dimetiléter por síntese direta					
T1j	Obtenção de Dimetiléter por desidratação de metanol					

Figura 2.1 – Estágio de evolução das tecnologias no mundo e no Brasil.

Diferentes tipos de gaseificadores são utilizados para a produção do syngas. Esses são classificados de acordo com o movimento do carvão no reator: contra fluxo, concorrente, fluxo cruzado ou leito fluidizado; pelo tipo de agente gaseificador: vapor de água, ar, oxigênio; pela pressão de trabalho: atmosférica ou pressurizado, e pelo tipo e forma do carvão: pelletizado ou pulverizado. Cada um produz uma relação diferente entre os compostos H_2/CO , que também pode ser reformulada a partir reatores water gas shift, seguindo a reação: $CO(g) + H_2O(v) \rightarrow CO_2(g) + H_2(g)$. Segundo o Programa de Eficiência Energética e Energias Renováveis (EERE), do Departamento



de Energia dos Estados Unidos, em um futuro breve este processo poderá viabilizar a produção do combustível hidrogênio (H_2) a partir de carvão, com uma redução expressiva das emissões dos gases de efeito estufa.

A instituição Gasification Technologies Council afirma que 144 plantas e 427 gaseificadores estão atualmente em operação no mundo, produzindo 56 GW de energia, das quais 31 GW são a partir de carvão mineral. Ainda existe um grande potencial para expansão deste processo e estima-se que, até 2014, as novas plantas alcancem uma oferta relativa de 155 GW. A maioria desses investimentos está acontecendo na África e Oriente Médio (64%), 27% na Austrália, 9% na Europa e nenhum na América. Além disso, a maioria destas novas unidades será para produção de combustíveis (69%), química (22%) e somente 9% para geração de energia.

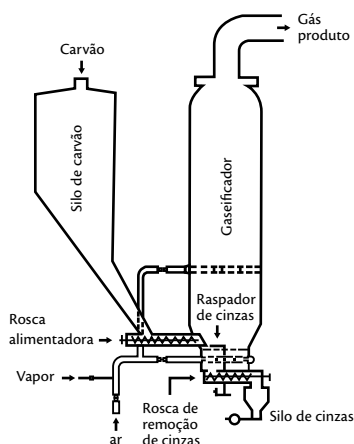


Figura 2.2 – Esquema de funcionamento do gaseificador de carvão Winkler (1920).

Fonte: Sánchez

A eficiência e os custos das plantas de gaseificação dependem principalmente das tecnologias utilizadas e do produto final desejado. Uma unidade geradora de energia, integrada com uma planta química, apresenta algumas vantagens significativas quanto ao retorno financeiro, porém os investimentos iniciais e a sua localização são fatores críticos na análise de investimento. O rank (qualidade) do carvão também é uma variável que afeta os custos do processo; a utilização de um carvão sub-betuminoso pode aumentar em até 20 % o custo final de produção do syngas, em relação ao betuminoso.



O carvão é um material sólido e, devido à gênese de formação, está disposto na área continental dos países, com algumas ocorrências entrando nas plataformas continentais (CAVALCANTI, 2011). A profundidade das camadas está associada com a época de sua formação, podendo atingir até 2000m de profundidade. Nos Estados do sul do Brasil, as jazidas exploradas são encontradas em camadas superficiais até uma profundidade de 250 m, porém há camadas identificadas com profundidade de até 750 m, como a da Santa Terezinha, no Rio Grande do Sul (GOMES, 1998). Além dos Estados do sul, há evidências da existência de carvão em outras unidades da federação, porém ainda não quantificadas.

Estudos mundiais indicam que 15% das reservas de carvão são economicamente mineráveis, porém 85 % estão dispostas em locais e profundidades nas quais os processos convencionais de mineração tornam-se economicamente inviáveis. Para resolver esta limitação, desde 1950 plantas pilotos de gaseificação de carvão *in situ*, também denominada de *underground coal gasification* (UCG) estão sendo estudadas e desenvolvidas (GASIFICATION TECHNOLOGY COUNCIL). Desde 1961, em Yerostigaz, no Uzbesquitão, uma unidade está operando com esta tecnologia. Em 2001, a empresa australiana Linc Energy adquiriu o controle acionário desta planta e atualmente a unidade produz 1 milhão de m³ de syngas por dia, 100 % direcionado para produção de energia elétrica. Países como Reino Unido, África do Sul, Índia e China já estão com áreas licenciadas para começar a exploração do carvão subterrâneo. Especificamente na Índia, onde o carvão é similar ao brasileiro, a gaseificação *in situ* está sendo vista como uma grande garantia para seu crescimento econômico. Para melhor entender o processo UCG, uma representação é mostrada na Figura 2.3.

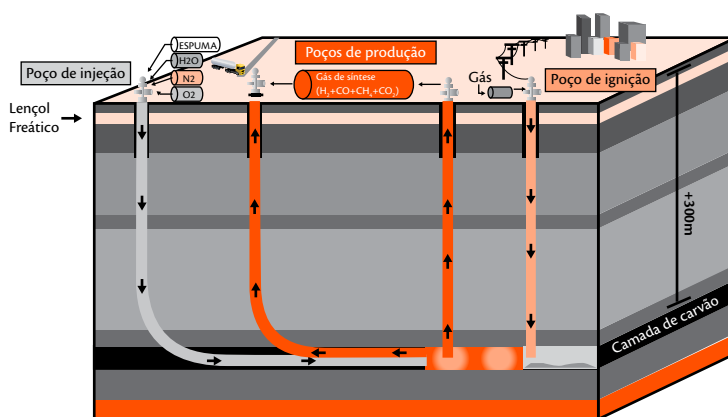


Figura 2.3 – Ilustração demonstrando o processo gaseificação *in situ* – Underground Coal Gasification (UCG).

Fonte: Cepac - PUCRS.



Além das vantagens intrínsecas, já conhecidas do processo de gaseificação de carvão, a UCG apresenta outras em relação à gaseificação em superfície, tais como: o carvão e o material estérreo não são deslocados até a superfície; não há necessidade de trabalhadores no subsolo; o armazenamento e captura de CO₂ ocorre no subsolo; não há impactos ou resíduos na superfície; e há possibilidade de exploração de camada de carvão com até 600m de profundidade.

A tecnologia de geração de gás de síntese in situ vem sendo revisitada com uma nova visão tecnológica, ou seja, a ideia de se gerar um polo carboquímico, no qual gaseificação de carvão in situ é integrada com uma planta CTL e com uma unidade de geração de energia elétrica a partir de gás de síntese. Tal estratégia permitirá uma grande diversificação de derivados energéticos, gerando combustíveis líquidos (diesel de alto índice de cetanas e GLP), calor e energia elétrica. De fato, anunciou-se recentemente que a Syntroleum, empresa tecnológica que desenvolveu uma rota CTL, associou-se à Linc para construir na Austrália um polo carboquímico nos moldes acima descritos.

2.1.3 – Mapa tecnológico: gargalos e oportunidades estratégicas

A Figura 2.4 representa o mapa tecnológico referente à produção e ao uso, de forma limpa e eficiente, do carvão mineral na carboquímica no Brasil. Nele, antecipam-se as trajetórias dos tópicos analisados em seus diversos estágios, desde a pesquisa aplicada até a comercialização e distribuição dos produtos. Consideraram-se na configuração deste mapa dois horizontes temporais: 2022 e 2035.

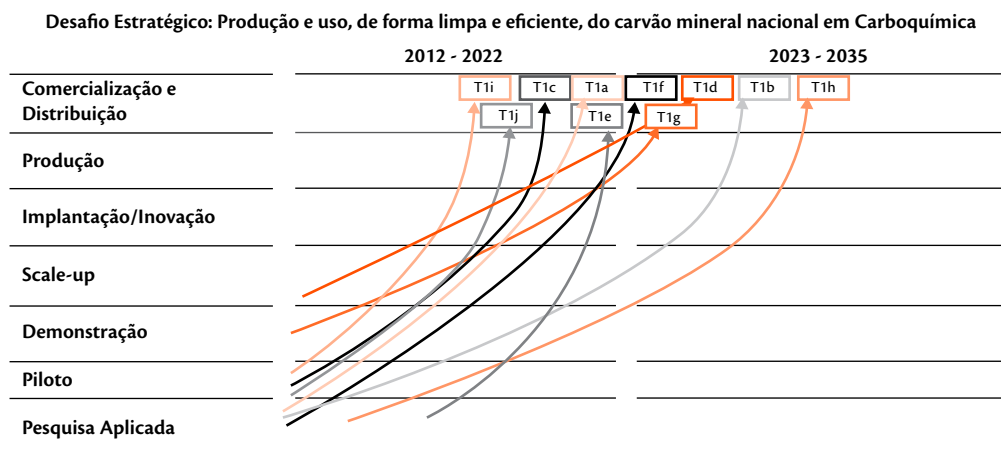


Figura 2.4 – Mapa tecnológico da produção e uso, de forma limpa e eficiente do carvão mineral na carboquímica: 2012-2035.



Notação: T1a – Gaseificação em grande escala; T1b - Gaseificação in situ em grande escala (UCG); T1c - Reator de ajuste da proporção CO-H₂ (watergas shift) em grande escala; T1d - Síntese do metanol em média e grande escala; T1e - Liquefação de carvão (processamento de carvão com extração por solventes); T1f – Obtenção de produtos a partir do gás de síntese; T1g – Rota MTO (Methanol to Olefins); T1h – Rota CTL (Coal to Liquids); T1i – Obtenção de Dimetiléter por síntese direta; T1j – Obtenção de Dimetiléter por desidratação de metanol.

Avaliando os descritivos desenvolvidos e expostos, relativos às tecnologias e processos identificados, pode-se planejar a implementação de um setor carboquímico no país.

Gaseificação em grande escala (T1a)

A base de uma indústria química a partir do carvão passa, necessariamente, pela implantação da tecnologia de gaseificação. Esta tecnologia já está desenvolvida em vários países do mundo e, no Brasil, já existem algumas ações embrionárias. Desta forma, é possível desenvolver e dominar uma rota nacional, partindo dos estudos já efetuados por vários grupos de pesquisa no Brasil. Portanto, considerando uma tecnologia em fase embrionária, a T1a (gaseificação em grande escala) deverá e poderá, no horizonte 2012-2022, ter seu desenvolvimento consolidado, com a implantação de unidades pilotos completas, até atingir uma escala semi-industrial em 2022. Após esta fase, no horizonte 2023-2035, estará apto a iniciar o desenvolvimento das aplicações do syngas.

Gaseificação *in situ* em grande escala (UCG) (T1b)

Paralelamente ao desenvolvimento de uma tecnologia de gaseificação nacional, devem-se realizar estudos para identificação das jazidas de carvão nacional. Essas, identificadas e com as suas potencialidades determinadas, orientarão as tomadas de decisão pela tecnologia de gaseificação in situ (T1b). Essa tecnologia, ainda em crescimento no mundo, já conta com grupos de estudo no Brasil, podendo citar o Centro de Excelência em Pesquisa e Inovação em Petróleo, Recursos Minerais e Armazenamento de Carbono (Cepac-PUC-RS), onde também são desenvolvidos estudos para armazenamento de CO₂, e o SATC/CTCL, em Criciúma (SC). Desta forma, avaliando o horizonte de implantação, esta tecnologia deverá ser desenvolvida até a sua fase de demonstração no horizonte 2012-2022. Posteriormente, consolidando as informações sobre jazidas na plataforma continental ou outras regiões do país, deverá ser iniciada a fase de *scale-up* e implantação, no horizonte 2023-2035.



Reator de ajuste da proporção CO-H₂ (watergas shift) em grande escala (T1c)

Obtenção de produtos a partir do gás de síntese (T1f)

O desenvolvimento das tecnologias de reatores water-gas-shift (T1c) e a síntese do metanol a partir do gás de síntese (T1f) devem ocorrer paralelamente ao desenvolvimento dos processos de gaseificação. No caso particular da síntese de metanol, a tecnologia já existe e é comercializada em grande escala no Brasil a partir de gás de síntese. Neste sentido, grupos de pesquisas, atualmente orientados e apoiados pela Agência Nacional de Petróleo (ANP), podem, no horizonte 2012-2022, realizar estudos de viabilidade e desenvolvimento de unidade pilotos autônomas. No horizonte 2023-2035, essas tecnologias podem ser adaptadas às unidades gaseificadoras implantadas nas atividades (T1a) e (T1b).

Síntese do metanol em média e grande escala (T1d)

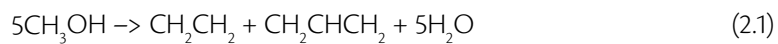
A produção de metanol (CH₃OH) a partir do gás de síntese é um das opções para o aproveitamento eficiente dos compostos da gaseificação do carvão mineral, mas a partir deste composto é possível explorar uma diversidade de outros produtos. Na Tabela 2.3 estão apresentadas opções de compostos que podem ser obtidos a partir do metanol.

O álcool metílico como combustível e reagente é conhecido desde o início do século 19, onde era obtido através da destilação da madeira. Em 1977, a companhia Mobil Oil descobriu o processo de conversão de metanol em gasolina, denominado de MTG (Methanol to Gasoline). Inicialmente, essa tecnologia teve sua viabilidade e rentabilidade limitadas pelo desenvolvimento dos catalisadores ácidos. Porém, a partir de 1984, com o desenvolvimento das peneiras moleculares modificadas identificadas como SAPO (silicoaluminofosfato) (CORRÊA, 1996), o processo foi modificado e direcionado para a produção de olefinas, sendo denominado MTO (Methanol to Olefins), e atualmente já está sendo comercializados por empresas como a Universal Oil Products (UOP) (BARE, 2007). Seguindo a mesma tendência, a ExxonMobil investiu na tecnologia MTG (Methanol to Gasoline), com uma planta operando na província de Shanxi na China, desde 2009 (HINDMAN, 2010).

As olefinas como etileno, propileno e butadieno são os principais componentes dos produtos poliolefinicos: polipropileno, polietileno e borracha sintética, que são as matérias-primas para as indústrias de produtos poliméricos utilizados em nosso dia-a-dia (BRASIL, 2011). No processo



MTO o metanol, produzido a partir do gás de síntese, é catalisado e transformado em olefinas segundo a reação 2.1 (Vaz, 2007):



que pode ser representada pelo esquema da Figura 2.5.

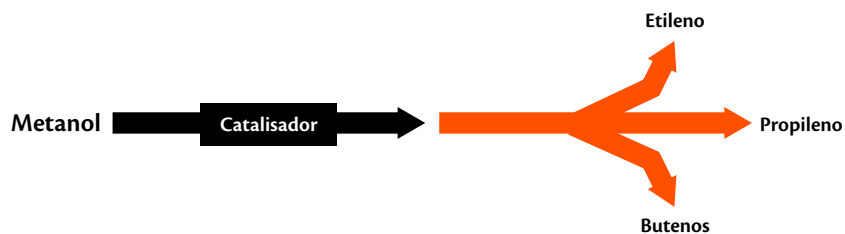


Figura 2.5 – Esquema básico das reações do processo MTO (Methanol to Olefins).



Tabela 2.3 – Produtos e compostos obtidos a partir do metanol produzido através do syngas.

Produtos derivados do metanol					
1ª GERAÇÃO	2ª GERAÇÃO	3ª GERAÇÃO	4ª GERAÇÃO	5ª GERAÇÃO	
SYNGAS	Metanol	Acido Acético	Acido Monocloroacético	Carboximetilcelulose	
				2,4 diclorofenol	
				Fenilglicina	
				Poliacetato de vinila	
			Acetato de vinila	Álcool polivinílico	
			Acetato de metila	Anidrido acetico	
			Anidrido acético	Acetato de celulose	
			Ésteres acéticos	Ácido acetilsalicílico	
			Trimetilopropano		
			Brometo de metila		
		Cloreto de metila			
		Eterdimetílico			
		Etanol			
		Etermetilbutílico			
		Etileno			
		Formaldeído		Ácido glicólico	Etilenoglicol
				Alcoolpropanílico	
				1,4 butanodiol	
				Hexametileno tetranina	
				Penataentritoll	
			Propionato de metila	Metacrilato de metila	
		Formiato de metila		Acido fórmico	
				Formamida	
Metilaminas					
Estireno Etilbenzeno					
	Álcoois OXO	Esteres	Plastificantes		



▲				
.....				
H ₂	Amônia	Ácido Cianídrico	Acrinonitrila	
			Metacrilato de metila	
		Ácido nítrico	Ácido oxálico	
			Nitrato de amônia	
		Acrilonitrila	Adiponitrila	
		Anilina		
		Carbamato de Amônia	Uréia	Ácido ciânico
		Etalonaminas		Metamina
Ciclohexano		Ácido adípico	Adiponitrila	
		Cloridrato de oxima de ciclohexanona	Caprotactona	
CO	Ácido propiônico	Propionitrila	Dimetilsulfona	
	Dimetilsulfona	Dimetilsulfato	Dimetilsulfóxido	
	Fosgeno			
	Sulfeto de carbonila			

Liquefação de carvão (processamento de carvão com extração por solventes) (T1e)

A atividade inovadora de processamento de carvão com extração por solvente (T1e) é uma aposta mundial, e para o país não é diferente. Observando os dados e as pesquisas desenvolvidas sobre o assunto, verifica-se que inúmeras pesquisas recentes estão sendo direcionadas para obter compostos carbonosos a partir do carvão. Por outro lado, a ausência de resultados e tecnologias disponíveis permite inovar neste segmento e, de alguma forma, conceber um novo segmento. Neste sentido, no horizonte 2012-2022 deve-se motivar o desenvolvimento de grupos de pesquisas, principalmente nas regiões carboníferas, para investigar novas rotas e aplicações para o beneficiamento e o aproveitamento do material carbonoso, principalmente para aplicações em novos materiais. Consolidada essa fase, no horizonte 2023-2035 podem-se avaliar investimentos em um novo segmento carbonífero, diferente da energia e carboquímica. Vale ressaltar, no entanto, que muito já foi realizado nos anos 1970 e 1980 no Brasil em termos de pesquisa para desenvolver uma rota de liquefação de carvões nacionais. Tais estudos, realizados na Coppe, mostraram a viabilidade técnica da rota.

Rota MTO (Methanol to Olefins) (T1g)

Um dos maiores desafios para a implantação da indústria carboquímica no país é o desenvolvimento do processo e da tecnologia Methanol to Olefins (MTO) (T1g). Essa, apesar de madura em outros países, é muito recente para haver informações e rotas acessíveis. Como este processo é determinado pela tecnologia de produção dos catalisadores zeolíticos (SAPO), é recomendada



a aquisição desses, e o desenvolvimento apenas de estudos de processamento a partir do metanol. Nos horizontes 2012-2022 devem ser identificados grupos de pesquisa interessados em implantar esta tecnologia para que, no horizonte 2023-2035, haja conhecimento suficiente. Grupos de pesquisadores e especialistas, como os da Unipampa, de Bagé (RS), e do Ipen-SP, possuem conhecimento neste tema e poderão colaborar.

Rota CTL (Coal to Liquids) (T1h)

Na rota tecnológica denominada CTL, o carvão é gaseificado de modo a formar a mistura de hidrogênio e monóxido de carbono na proporção desejada. Em presença de um catalisador de ferro, ambos são convertidos em hidrocarbonetos líquidos por meio de uma síntese denominada Fischer-Tropsch. É possível, então, produzir diesel, lubrificantes, parafinas e nafta petroquímica, utilizada na fabricação de fertilizantes, sem enxofre e aromáticos, isto é, limpos, e com alto desempenho. A rota CTL, surgida na Alemanha na década de 20, foi levada para a África do Sul, que hoje possui a maior planta de CTL do mundo, apta a produzir 170 mil barris de combustíveis líquidos por dia, e vem sendo introduzida na China, que anuncia altos investimentos na instalação da rota. No Brasil, o Cenpes/Petrobras lidera as pesquisas, que já contam com uma planta piloto da etapa Fischer-Tropsch.

Rotas DME (Dimetiléter) (T1i e T1j)

Considerado provavelmente como um dos combustíveis do século 21, DME é uma substância gasosa não tóxica, com alto poder calorífico, que durante sua queima não emite particulados nem óxidos de enxofre, além de não causar efeito estufa. Outra vantagem está na grande flexibilidade de atuação deste combustível alternativo, já que há a possibilidade de DME substituir tradicionais combustíveis como diesel e GLP, podendo ser empregado em termoelétricas, transporte urbano (ônibus, principalmente) e até para uso doméstico. Em países como a China, em que o carvão é considerado a fonte energética mais utilizada, grandes investimentos vêm sendo realizados para aumentar a capacidade instalada de produção de DME a partir deste recurso mineral. O uso do dimetiléter, formado por hidrogênio, carbono e oxigênio, torna-se uma alternativa interessante e atrativa. Há basicamente duas tecnologias de produção de DME: a síntese direta a partir de gás de síntese e a sua obtenção por desidratação de metanol. A Petrobras e o INT vêm colaborando no desenvolvimento conjunto da rota de síntese direta de DME, tendo já emitido uma patente. Acredita-se que ambas tecnologias possam ser comercializadas até 2020.



2.1.4 – Pontos de atenção e necessidades de ações de suporte

Para se chegar aos posicionamentos estratégicos pretendidos em relação a cada um dos tópicos associados ao desafio abordado, no período de 2012 a 2035 identificam-se vários gargalos que precisam ser superados, mas também inúmeras oportunidades estratégicas para o país.

Como pode ser observado na Figura 2.6, apontam-se no próprio mapa tecnológico os pontos de atenção que indicam a necessidade de ações de suporte relacionadas aos respectivos gargalos e ao aproveitamento de oportunidades estratégicas identificadas ao longo do processo de construção do mapa.

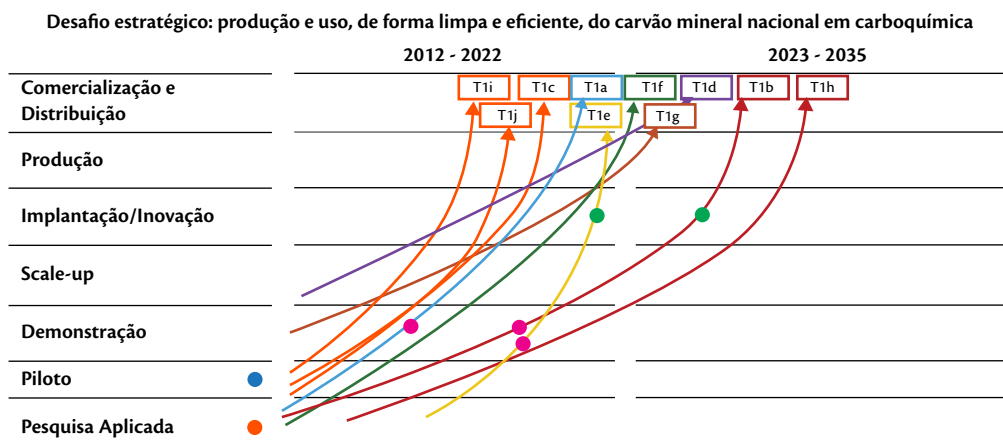


Figura 2.6 – Pontos de atenção para ações de suporte ao desenvolvimento das trajetórias associadas ao desafio: 2012-2035

Notação: T1a – Gaseificação em grande escala; T1b - Gaseificação in situ em grande escala (UCG); T1c - Reator de ajuste da proporção CO-H₂ (watergas shift) em grande escala; T1d - Síntese do metanol em média e grande escala; T1e - Liquefação de carvão (processamento de carvão com extração por solventes); T1f – Obtenção de produtos a partir do gás de síntese; T1g – Rota MTO (Methanol to Olefins); T1h – Rota CTL (Coal to Liquids); T1i – Obtenção de Dimetiléter por síntese direta; T1j – Obtenção de Dimetiléter por desidratação de metanol.

Convenção de cores: recursos humanos (cor laranja); infraestrutura física (cor azul); investimentos (cor rosa); aspectos regulatórios (cor verde); e aspectos mercadológicos (cor vermelha).



Na análise e avaliação de especialistas, o desenvolvimento de recursos humanos é fundamental para o sucesso deste processo no país, porém, avaliando a horizonte de tempo proposto para a implantação das atividades T1a, T1b, T1c, T1e e T1f, pode-se afirmar que neste quesito o que se necessita é a organização e potencialização de equipes de especialistas já disponíveis nos institutos de pesquisas e empresas nacionais.

A organização de grupos focados nas atividades de desenvolvimento demandará uma segunda fase de investimentos em infraestrutura laboratorial e de unidades pilotos. Subsequentemente, serão necessários investimentos elevados e específicos na consolidação dos processos de gaseificação.

No horizonte 2023-2035, caso ocorra a consolidação da tecnologia de gaseificação in situ, deverá haver um fase de regulamentação da atividade e das normativas ambientais, em nível nacional.

2.1.5 – Portfólio estratégico de PD&I

A Figura 2.7 representa o portfólio estratégico de PD&I relacionado à produção e ao uso, de forma limpa e eficiente, do carvão mineral na carboquímica, no período de 2012 a 2035. Para a construção do portfólio, os tópicos associados a esse desafio foram classificados segundo dois critérios: 1) sustentabilidade, calculada em função do impacto econômico e socioambiental das aplicações potenciais do tópico; e, 2) grau de esforço requerido para atingir o posicionamento desenhado no mapa tecnológico.

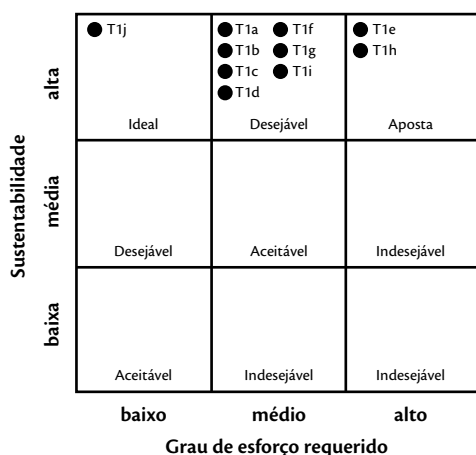


Figura 2.7 – Portfólio estratégico de PD&I referente à produção e uso, de forma limpa e eficiente, do carvão mineral na carboquímica: 2012-2035



Notação: T1a – Gaseificação em grande escala; T1b - Gaseificação *in situ* em grande escala (UCG); T1c - Reator de ajuste da proporção CO-H₂ (*water gas shift*) em grande escala; T1d - Síntese do metanol em média e grande escala; T1e - Liquefação de carvão (processamento de carvão com extração por solventes); T1f – Obtenção de produtos a partir do gás de síntese; T1g – Rota MTO (Methanol to Olefins); T1h – Rota CTL (Coal to Liquids); T1i – Obtenção de Dimetiléter por síntese direta; T1j – Obtenção de Dimetiléter por desidratação de metanol.

A partir da visão conjunta do mapa tecnológico, com os pontos de atenção, e do portfólio estratégico de PD&I, identificam-se diversas oportunidades e gargalos, conforme discutido a seguir.

A Figura 2.7 indica dois tópicos como aposta, ou seja, aqueles que representam uma oportunidade promissora, segundo visão de mais longo prazo. Situam-se no quadrante superior direito e referem-se aos tópicos “processamento de carvão com extração por solventes (T1e)” e “Rota CTL (T1h)”. A primeira tecnologia refere-se à inovação que poderá ser desenvolvida no país a partir da perspectiva de que, além das demandas ambientais, no futuro serão necessários novos materiais com características de produção renováveis e propriedades sustentáveis. Os materiais deverão ser mais leves, resistentes e não apresentarem problemas de corrosão ou degradação por UV. Assim, serão mais duráveis e seguros para o meio ambiente e as pessoas. A rota CTL, embora madura (existe na África do Sul há 60 anos), caracteriza uma opção tecnológica particularmente interessante que, contudo, implica altos investimentos e uma decisão política que resulte em diretriz tecnológica clara para o país. CTL implica introduzir o conceito de “Refinaria Carboquímica”, que traz em si aspectos logísticos e políticos de grande relevância.

O carbono, por si mesmo, é considerado um aposta como material do futuro. As últimas inovações em materiais do século 20 e início do 21 envolvem desenvolvimento de nanoestruturas de carbono, fibras e grafeno (GEIM, 2007). As fibras, especificamente, apesar da limitação em seu processamento atual, estão sendo difundidas em larga escala comercialmente como perspectivas de substituírem o aço nas carrocerias de automóveis. Por ser uma fonte de carbono, o carvão deve ser visto como uma potencial fonte para estes novos produtos. Atualmente, já se produzem fibras a partir do alcatrão de coque de carvão (DERBYSHIRE, 1997).

O processo de liquefação de carvão e a purificação por meio de extração com solventes expandirão o tratamento das estruturas orgânicas presentes e poderão revelar inúmeras aplicações para este produto.

Os demais tópicos – gaseificação em grande escala (T1a); T1b - gaseificação *in situ* em grande escala - UCG (T1b); reator de ajuste da proporção CO-H₂ (*water gas shift*) em grande escala (T1c);



síntese do metanol em média e grande escala (T1d); obtenção de produtos a partir do gás de síntese (T1f); rota MTO – Methanol to Olefins (T1g) – encontram-se em situação ‘desejável’ no portfólio sustentabilidade alta e grau de esforço médio. Neste conjunto de ações, o desenvolvimento da tecnologia de gaseificação de carvão, com produção de syngas, até sua transformação em olefinas, permitirá o surgimento de inúmeros segmentos econômicos de alto valor agregado. Além disso, estrategicamente, o país estará se preparando para enfrentar as novas exigências mercadológicas do futuro como a produção de hidrogênio e a captura de CO₂ por meio da síntese de metanol.

Restam, finalmente, as tecnologias relativas ao DME (dimetiléter), respectivamente T1i e T1j. Sabe-se que esta é uma grande aposta da China, objetivando tornar mais verde a indústria do carvão pela geração de um combustível alternativo flexível e que, ademais, queima limpo, não emitindo particulados nem derivados de enxofre. Constatam-se diferentes motivações para o desenvolvimento do DME como combustível, que variam conforme as características regionais e econômicas de cada país. Para os países possuidores de grandes reservas de carvão, como ocorre com a China, verificou-se que a principal motivação está relacionada ao aproveitamento mais sustentável dessas reservas. No caso da Europa e dos EUA, existe a motivação de venda de tecnologia, não só das plantas de produção, mas também de modificação de motores para utilizar esse combustível alternativo. Há, também, como no caso do Japão e da Índia, a necessidade de garantir a segurança no abastecimento energético, posto que esses países são altamente dependentes de importações de petróleo. Em quaisquer dos casos, a aposta em DME é uma realidade que não pode ser descartada no caso brasileiro. A tecnologia a partir de metanol, que implica pouco esforço já que é bem conhecida e razoavelmente simples, representa o caso ideal. A tecnologia por síntese direta, que implica desenvolvimento de um novo catalisador, embora já haja grande quantidade de pesquisa feita no Brasil, localiza-se no campo desejável.

2.1.6 – Considerações finais sobre a carboquímica

É evidente a importância do carvão mineral para o Brasil, pois, como um recurso abundante e com múltiplas aplicações, deve ser utilizado para construir um país mais sustentável. As opções de utilização deste material carbonoso são evidenciadas continuamente por meio de publicação científicas e plantas industriais.

Além de geração de energia, o beneficiamento do carvão proporciona a produção de compostos para combustíveis, fertilizantes e polímeros (plásticos). Os últimos avanços já indicam o carvão também como uma fonte para produção de hidrogênio.



Com tantas possibilidades e perspectivas, a criação de uma indústria carboquímica torna-se coerente e estratégica para um país que precisa expandir sua economia. Neste sentido, a seguir é apresentado um conjunto de ações importantes a serem executadas:

- Mapear as reservas de carvão mineral nacional para obter sua completa caracterização físico-química, visando sua melhor utilização;
- Definir as tecnologias de gaseificação mais apropriadas para os diferentes tipos de carvões nacionais e os diferentes tipos de jazida: superfície ou in situ;
- Desenvolver produção e purificação de syngas, identificando e avaliando as tecnologias e iniciativas nacionais disponíveis;
- Identificar e organizar grupos de pesquisas para estudos e desenvolvimento dos processos de síntese de metanol, de metanol para DME e de metanol para olefinas (MTO), a partir do carvão mineral;
- Avaliar a possibilidade da criação de uma refinaria carboquímica pela introdução da rota CTL;
- Elaborar estudos de logística e arranjos produtivos locais (APL) de forma a definir os melhores produtos a serem desenvolvidos a partir do gás de síntese: energia elétrica, fertilizantes, combustíveis, nafta petroquímica, lubrificantes/parafinas ou olefinas;
- Promover estudos específicos de reciclagem de CO₂ a partir do gás de síntese e da síntese de metanol;
- Consolidar as aplicações, já desenvolvidas, para os subprodutos de carvão mineral, como cimento e fertilizantes;
- Estimular pesquisas inovadoras para desenvolvimento de novos materiais e aplicações a partir de carvão mineral, tais como fibras e nanocompostos;
- Estudar a produção de gás de síntese com um blend de carvão com biomassa.

A carboquímica, a exemplo do que ocorreu na petroquímica mundial nos anos 1950, será uma grande aposta para as próximas gerações, pois associa um aproveitamento inteligente e eficiente de um recurso natural, o carvão; abrindo inúmeras opções mercadológicas, possíveis de atender às crescentes necessidades humanas.

Diante de tantas perspectivas, onde é possível obter energia, combustíveis, hidrogênio (US DEPARTMENT OF ENERGY, 2008), polímeros, adubos, materiais estruturais e reciclagem de



CO₂, pode-se afirmar que, em breve, entraremos na Economia do Carbono e os composto carbonoso, como o carvão, serão essenciais para um mundo sustentável.

2.2 – Carvão mineral nacional na siderurgia

2.2.1 – Metas a serem alcançadas em 2022 e 2035

Tabela 2.4 – Metas da siderurgia para 2022 e 2035.

Metas até 2022	Jazidas (novas e existentes) identificadas e caracterizadas.
	Concentrados caracterizados para uso na siderurgia via alto-forno (coque e PCI).
	Técnicas limpas de lavra e beneficiamento (siderurgia e térmica) desenvolvidas, adequadas às características do carvão mineral nacional.
	Tecnologias limpas para novos usos siderúrgicos desenvolvidas, adequadas às características do carvão mineral nacional.
	Processos de redução-direta desenvolvidos para carvão mineral não coqueificável e de alto teor de cinzas.
	Processos de fusão-reductora desenvolvidos para carvão mineral não coqueificável.
	Coprodutos dos processos carboquímicos caracterizados (cinzas, argilominerais, produtos oriundos da dessulfurização).
	Processos desenvolvidos para uso do carvão mineral na pelotização de minério de ferro.
	Infraestrutura de transporte desenvolvida (conexão mina-beneficiamento-usinas).
Novos mecanismos de financiamento disponíveis, com incentivo para a produção e uso limpo do carvão mineral nacional.	
Metas até 2035	Técnicas desenvolvidas para utilização do carvão mineral nacional gasificado em processos de redução direta.
	Técnicas desenvolvidas para utilização mista carvão mineral/biomassa em processo de fusão reductora..

2.2.2 – Tópicos tecnológicos associados

A Tabela 2.5 apresenta os tópicos associados à produção e uso, de forma limpa e eficiente, do carvão mineral nacional na siderurgia, incluindo seus descritivos. Uma vez definidos os tópicos, esses foram avaliados quanto ao estágio de maturidade tecnológica no mundo e no Brasil.



O conceito de maturidade tecnológica indica o estágio de evolução de uma dada tecnologia e o campo de ação para avanço adicional, considerando-se o estado-da-arte em nível mundial (ROUSSEL et al., 1991). As tecnologias podem ser classificadas em: 1) embrionárias; 2) em crescimento; 3) maduras; e, 4) pós-maduras (Figura 2.8).

As referências alfa-numéricas na primeira coluna do quadro foram adotadas ao longo de toda a construção do mapa tecnológico e do portfólio estratégico de PD&I associados ao desafio da produção e uso, de forma limpa e eficiente, do carvão mineral na siderurgia.

Tabela 2.5 – Tópicos associados à produção e uso, de forma limpa e eficiente do carvão mineral na siderurgia.

Ref.	Tópicos associados	Descritivo
T2a	Processos de concentração a ar.	Remoção de argilas e piritas sem a utilização de água
T2b	Processos de concentração em leitos pulsantes.	Remoção de argilas e piritas.
T2c	Processos de simulação de plantas e processos.	Simulação de beneficiamento.
T2d	Processos de concentração utilizando meios densos.	Remoção de argilas e piritas.
T2e1	Processo de utilização de carvão com baixo poder de coqueificação	Aumento do percentual de carvão com baixo poder de coqueificação na mistura a coqueificar.
T2e2	e utilização de carvão nacional para injeção direta nos altos-fornos (PCI).	Avaliação técnica e econômica do uso de carvão nacional em misturas com carvão importado como insumo para injeção direta em altos-fornos
T2f1	Novos processos de coqueificação (briquetagem e compactação da carga – <i>stamp charging</i>) com aumento da participação de carvão fracamente ou não coqueificável.	Avaliação técnica e econômica em escala de demonstração de processos (ex: Scope21) para aplicação de carvão nacional na produção de coque para utilização em alto-forno de grande porte
T2f2		Avaliação técnica e econômica do uso de carvão nacional fracamente ou não coqueificável em misturas a coqueificar via compactação da carga – <i>stamp charging</i> .
T2g	Processo de produção de ferro tipo fusão redutora utilizando aglomerados autorredutores.	Avaliação técnica e econômica em escala piloto do processo nacional TecnoRed para aplicação de carvão nacional em aglomerados autorredutores.
T2h	Estudos de processos de gaseificação do carvão mineral nacional.	Avaliação técnica e econômica dos diversos processos de gaseificação aplicados ao carvão mineral nacional.
T2i	Escalonamento e dimensionamento do processo industrial de redução direta com carvão mineral nacional.	Avaliação econômica em escala industrial do processo de redução direta com carvão mineral nacional.
T2j1	Definição de processos de produção de ferro gusa de fusão redutora utilizando carvão mineral não coqueificável.	Avaliação econômica em escala industrial dos processos Finex e Corex com uso de carvão mineral nacional.
T2j2		Outros processos.



	Siderurgia	Inexistente	Embrionária	em crescimento	Madura	Pós-madura
T2a	Processos de concentração a ar					
T2b	Processos de concentração em leitos pulsantes.					
T2c	Processos de simulação de plantas e processos.					
T2d	Processos de concentração utilizando meios densos.					
T2e	Processos de utilização de carvão com baixo poder de coqueificação e utilização de carvão nacional para injeção direta nos altos fornos (PCI)					
T2f	Novos processos de coqueificação (briquetagem e compactação da carga - <i>stamp charging</i>) com aumento da participação de carvão fracamente ou não coqueificável.					
T2g	Processos de produção de ferro tipo fusão redutora utilizando aglomerados autorredutores					
T2h	Estudos de processos de gaseificação do carvão mineral nacional					
T2i	Escalonamento e dimensionamento do processo industrial de redução direta com carvão mineral nacional					
T2j	Definição de processos de produção de ferro gusa de fusão redutora utilizando carvão mineral não coqueificável (Finex, Corex)					
T2j2	Definição de processos de produção de ferro gusa de fusão redutora utilizando carvão mineral não coqueificável (outros processos)					

Figura 2.8 – Estágio de evolução das tecnologias no mundo e no Brasil.



Rotas da produção de aço no mundo

Há quatro rotas principais para produção de aço, que estão esquematizadas na Figura 2.9.

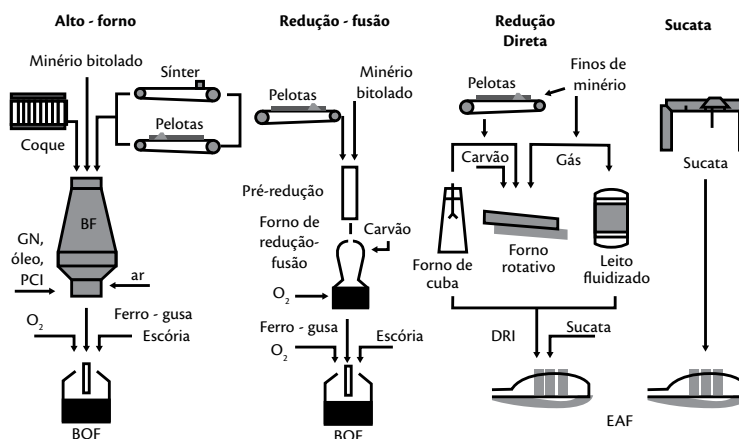


Figura 2.9 – Fluxograma das rotas de produção de aço (GUDENAU, 1989).

A primeira rota utiliza o Alto-forno (BF), e foi responsável por aproximadamente 70% da produção de aço no mundo em 2010 (IABR, 2010). No alto-forno, o ferro-gusa (também denominado genericamente como ferro-primário) é produzido a partir da redução do minério de ferro utilizando carbono, principalmente na forma de coque e carvão pulverizado, como agentes redutores e combustíveis.

A siderurgia brasileira apresenta uma peculiaridade, que é a produção de ferro-gusa em altos-fornos a carvão vegetal. Atualmente, cerca de 1/3 desse ferro-gusa é produzido nos chamados mini-altos fornos, sendo a maior parte por produtores independentes que produzem ferro-gusa para uso posterior em aciarias elétricas e fundições, e a outra parte por usinas integradas produtoras de aço. É importante salientar que os grandes altos-fornos brasileiros a coque não podem operar com carvão vegetal devido à menor resistência mecânica deste último.

A rota da Redução Direta produz ferro metálico na forma sólida, chamado ferro-esponja ou DRI (Direct Reduced Iron), utilizando carvões não coqueificáveis ou gás natural como redutor/combustível. O DRI é usado juntamente com sucata em fornos elétricos a arco (EAF). A rota da sucata não utiliza redutor, pois o aço é produzido a partir da reciclagem de sucata ferrosa em fornos elétricos.



A rota mais nova é chamada de fusão-redutora, na qual o ferro-gusa é produzido fora do alto-forno, em uma ou mais etapas, utilizando carvões não-coqueificáveis em substituição ao coque. Os processos comerciais existentes apresentam a etapa de pré-redução do minério de ferro separada da etapa de fusão.

A principal razão para o desenvolvimento de novos processos de redução e de redução-fusão é evitar as etapas de coqueificação e sinterização antes do alto-forno, que são caras e poluentes. O alto-forno, no entanto, ainda é um processo competitivo para a produção de ferro primário e tem mostrado flexibilidade para adaptação às novas exigências da siderurgia. Ainda hoje, 95% do ferro primário produzido no mundo é via alto-forno a coque. Os outros 5% são produzidos em processos de redução direta (principalmente com redutor gasoso). Poucas plantas de processos de fusão-redutora já foram construídas em nível comercial no mundo.

Situação da produção de aço via alto-forno a coque no Brasil

As usinas integradas a coque no país representam cerca de 75% da produção siderúrgica brasileira (IABR, 2010). Nos últimos anos, verifica-se a construção de novos altos-fornos a coque no país, sempre baseados em tecnologia e projetos importados (CGEE, 2010). A crise mundial de 2008, com seus desdobramentos, o aumento dos estoques de aço e a queda do preço devido à importação pelo Brasil de aço chinês mais barato postergaram os investimentos previstos para implantação de novas usinas siderúrgicas e de novos altos-fornos. A capacidade instalada de cerca de 45 milhões de toneladas subiria para aproximadamente 72 milhões de toneladas em 2016, caso os diversos projetos aprovados não tivessem sofrido paralisação. A demanda de carvão metalúrgico para a siderurgia (coqueria e PCI), que em 2011 foi de 19,1 milhões de toneladas (3,3 milhões para PCI), tinha previsão de atingir cerca de 34,5 milhões de toneladas em 2016 (7,1 milhões para PCI).

Apesar disso, a hegemonia dos grandes altos-fornos a coque na siderurgia brasileira permanecerá nas próximas décadas. Isso demandará um consumo crescente de coque produzido com carvões importados de alta qualidade, cada vez mais escassos e caros. O coque representa entre 40-50% do custo do ferro-gusa produzido ou cerca de 30% do preço final do aço. A siderurgia integrada brasileira ocupa um lugar de destaque no cenário mundial quanto à operação de altos-fornos a coque. Os grandes altos-fornos brasileiros se destacam quanto à sua produtividade (baixo fuel-rate), duração de campanha de operação sem paralisação para reforma e elevados índices de tratamento e reciclagem de resíduos e emissões. Praticamente todos os grandes



altos-fornos brasileiros produzem energia elétrica através da utilização dos gases captados no topo do alto-forno. Para isso, é necessário que a carga metálica (sinter e pelotas) e, em especial, o coque, tenha elevada qualidade, o que demanda aquisição de bons carvões coqueificantes para a sua produção.

Considerando o alto-forno a coque como a principal rota de produção de aço a médio e longo prazo no Brasil e no mundo, pode-se afirmar que o carvão coqueificável é uma matéria prima fundamental para a produção de aço nas próximas décadas.

Participação do carvão nacional na rota de produção de aço via alto-forno

O carvão utilizado nos processos da siderurgia brasileira, seja coqueificável ou não, é importado. Portanto, a participação do carvão nacional nessa rota pode se dar nos seguintes processos:

a) Uso do carvão como combustível no processo de pelotização de minério de ferro

O processo de pelotização (realizado predominantemente pelas mineradoras) utiliza cerca de 600.000 t anuais de carvões tipo semi-antracitos e antracitos importados com baixos teores de cinzas, enxofre e álcalis. Esse tipo de carvão é encontrado em Santa Catarina. Para viabilizar sua utilização, são necessários estudos de caracterização e de aplicação no processo de pelotização.

b) Uso de carvão pulverizado para injeção em altos-fornos (PCI)

Assim como para a coqueificação, todo carvão usado para injeção nos altos-fornos (mais de três milhões de toneladas ao ano) é importado. O carvão para PCI não pode ser coqueificável, permitindo uma aplicação de maior variedade em termos de rank dos carvões, desde alto voláteis até baixo voláteis ou semi-antracitos, com significativa redução de custos. Atualmente, as usinas estão injetando misturas de dois ou mais carvões alto-voláteis e baixo-voláteis, pois um teor médio-volátil apresenta muitas vantagens operacionais ao alto-forno. Carvões médio-voláteis são menos usados, pois apresentam, na sua maioria, propriedades coqueificantes.

Os carvões tipo alto-voláteis das jazidas do Rio Grande do Sul se enquadram nesse leque de possibilidades, desde que sejam atendidas as limitações relativas às propriedades químicas, cinzas (cerca de 10%), enxofre (máximo de 1%) e álcalis, entre outros elementos, que são fundamentais para uso no alto-forno. Nesse contexto, é fundamental a obtenção de carvões com menores



teores de cinzas e enxofre através de eficientes processos de beneficiamento. Para usinas com capacidade de moagem limitada, o baixo HGI do carvão nacional pode ser um fator negativo, porém o custo competitivo associado à flexibilidade técnica das usinas brasileiras pode superar esta limitação.

Estudos em nível de laboratório na Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) – no Instituto Nacional del Carbon da Espanha – estão sendo feitos para analisar a utilização desses carvões em misturas com carvões importados e outros materiais carbonosos. Carvões da Jazida de Leão-Butiá, no Rio Grande do Sul, apresentam propriedades químicas adequadas e melhores características para o beneficiamento do que as demais jazidas brasileiras (MACHADO, 2010). O principal fator limitante é a obtenção de baixos teores de cinzas de uma maneira mais rentável e eficiente. Para isso, é necessário criar condições, do ponto de vista econômico e ambiental, para utilização da fração de carvão de alto teor de cinzas (>35%) que seria gerada pelo beneficiamento.

Cabe ressaltar que a proposta apresentada não é para a substituição total do carvão importado para uso em PCI. Como os altos-fornos a coque brasileiros são de alta performance, já se tem estabelecido os parâmetros ideais para as misturas de carvões. A percentagem máxima da participação de carvão nacional vai depender das propriedades obtidas com o beneficiamento dos carvões brutos e da taxa de substituição que o usuário final tiver como meta, já que, quanto menor o rank, isto é, quanto maior o teor de voláteis, menor será a possibilidade de substituição de coque por carvão injetado.

c) Uso do carvão na coqueificação

Para o processo de coqueificação é necessário que o carvão possua propriedades coqueificantes ou aglutinantes, isto é, quando aquecido em ausência de ar, ele deve amolecer, inchar, aglomerar e, finalmente, solidificar na forma de um sólido poroso e rico em carbono, de alta resistência mecânica, chamado coque. Na siderurgia atual são utilizadas, para produção de coque, misturas de vários tipos de carvões – classificados como baixo, médio e alto volátil, com menos de 10% de cinzas e 1% de enxofre, e baixos teores de álcalis, cujo somatório de suas propriedades possibilita produzir um coque adequado. Pode-se utilizar também carvões denominados “*soft*”, que são carvões fracamente aglutinante ou que tem as propriedades químicas com teores maiores que os especificados, além de uso de coque verde de petróleo em percentuais cada vez maiores (atualmente em torno de 25-28% para algumas usinas brasileiras).



Na escolha e ponderação dos carvões, os fatores econômicos são sempre levados em consideração. O processo de coqueificação consiste em um aquecimento de carvões coqueificáveis, em ausência de ar, até cerca de 1100°C. Ocorre, então, uma decomposição térmica que dá origem aos produtos voláteis e ao coque.

As baterias de fornos de coque dividem-se entre aquelas que permitem ou não o aproveitamento dos coprodutos, podendo ainda ser divididas conforme o tipo de carregamento: quer pelo topo (carvão pulverizado) quer no nível da plataforma (carga compactada – *stamp charging*). De um lado, nas coquearias com recuperação de coprodutos (câmaras de coqueificação verticais), a matéria volátil liberada do carvão durante o processo de coqueificação é coletada para posterior tratamento. Esses produtos carboquímicos processados originam uma ampla variedade de produtos químicos comercializáveis (LOISON, 1989). Os resíduos e os gases são usados como combustíveis. De outro, nas baterias de coque (fornos horizontais) sem recuperação (*heat-recovery*), o gás residual é alimentado em uma caldeira de recuperação de calor, convertendo o excesso de calor e a energia química do gás em vapor para geração de energia. Uma vantagem desta tecnologia e que não ocorrem vazamentos de quantidades apreciáveis de emissões. Uma planta de capacidade de produção de 1,5 milhão de toneladas de coque ao ano pode gerar 155 MW de eletricidade. Esse tipo de coquearia, além de gerar energia elétrica que é vendida para fora da usina, acarreta significativas vantagens ambientais, pois não há emissão de gases de SOx e HPA's (hidrocarbonetos policíclicos aromáticos) que são nocivos ao meio ambiente e à saúde. Salienta-se que esse tipo de processo é aprovado pelo órgão ambiental EPA dos Estados Unidos. Considerando que a coqueificação na parte superior desses fornos dá-se em atmosfera oxidante, com conseqüente combustão da parte superior da carga para geração de parte do calor de processo, o rendimento em coque neste tipo de processo é ligeiramente inferior ao do coque produzido em coquearias verticais. Estudos de misturas de carvões para coqueificação e avaliação da qualidade do coque, são feitos atualmente no Instituto Nacional Del Carbon-Espanha e na Ecole Centrale Paris- França.

2.2.3 – Mapa tecnológico: gargalos e oportunidades estratégicas

A Figura 2.10 representa o mapa tecnológico referente à produção e ao uso, de forma limpa e eficiente, do carvão mineral na siderurgia no Brasil. Nele, antecipam-se as trajetórias dos tópicos analisados em seus diversos estágios, desde a pesquisa aplicada até a comercialização e distribuição dos produtos. Consideraram-se na configuração deste mapa dois horizontes temporais: 2022 e 2035.



Carvão metalúrgico nacional para a produção de coque (T2e, T2f)

Até 1991, as usinas eram obrigadas a consumir carvão metalúrgico coqueificável da Camada Barro Branco (SC) que era misturado aos carvões metalúrgicos importados. Apesar do seu alto custo, alto teor de cinzas (17-18%) e de enxofre (1,8%) o seu uso nas misturas era tecnicamente importante devido a sua alta fluidez. Com a não obrigatoriedade da aquisição pelas usinas nacionais, a partir de 1991, esse carvão não foi mais consumido e a fração metalúrgica para uso siderúrgico não foi mais produzida.

Devido à alta dos preços dos carvões para a siderurgia, as usinas siderúrgicas brasileiras já tem mostrado interesse em novamente utilizar esse carvão a um preço compatível com o importado.

Segundo as empresas mineradoras do Estado de Santa Catarina, o carvão da Camada Barro Branco está se exaurindo nas minas existentes. Para oferecer um carvão metalúrgico ao mercado, é necessário prospectar novas áreas dessa camada, abrir novas minas e implantar sistemas de beneficiamento mais eficientes para redução das cinzas e enxofre. Atualmente, a retomada das atividades da exploração do carvão Barro Branco enfrenta dois consideráveis obstáculos: a proximidade do litoral, o que dificulta a obtenção das licenças ambientais; e a deficiência na logística de transporte para as usinas siderúrgicas.

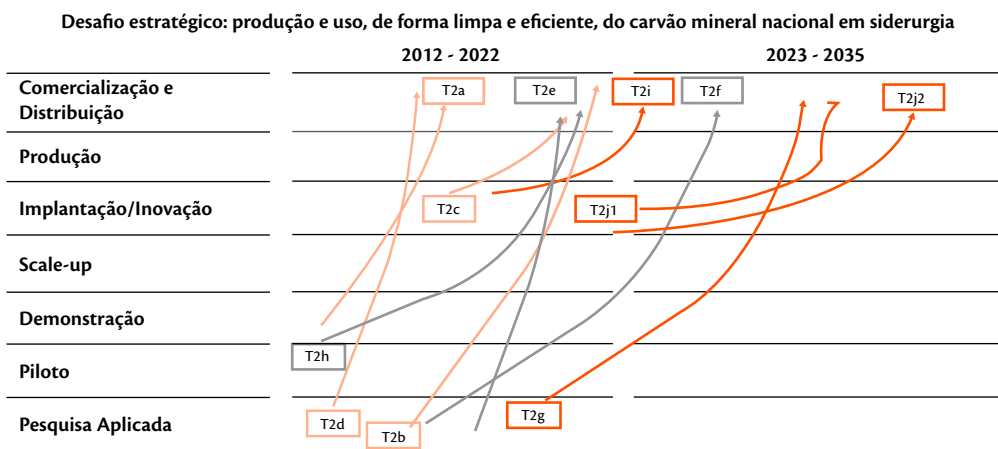


Figura 2.10 – Mapa tecnológico da produção e uso, de forma limpa e eficiente do carvão mineral na siderurgia: 2012-2035



Notação: T2a – Processos de concentração a ar; T2b – Processos de concentração em leitos pulsantes; T2c – Processos de simulação de plantas e processos; T2d – Processos de concentração utilizando meios densos; T2e - Processo de utilização de carvão com baixo poder de coqueificação e utilização de carvão nacional para injeção direta nos altos-fornos (PCI); T2f – Novos processos de coqueificação (briquetagem e compactação da carga – stamp charging) com aumento da participação de carvão fracamente ou não coqueificável; T2g – Processo de produção de ferro tipo fusão redutora utilizando aglomerados autorredutores; T2h– Estudos de processos de gasificação do carvão mineral nacional; T2i - Escalonamento e dimensionamento do processo industrial de redução direta com carvão mineral nacional; T2j1 e T2j2 – Definição de processos de produção de ferro gusa de fusão redutora utilizando carvão mineral não coqueificável.

O Rio Grande do Sul possui duas expressivas jazidas, Morungava/Chico-Lomã e Santa Terezinha, no nordeste do Rio Grande do Sul. Estudos do início da década de 1990 (trabalhos da CPRM, CVRD, Cientec e UFRGS) demonstraram possuir potencial para serem usados para coqueificação em misturas com carvões importados (OSÓRIO, 1997). Para confirmação desse potencial, novos estudos geológicos deveriam ser realizados para coletar amostras das melhores camadas que se encontram entre 300 m e 900 m de profundidade.

O aspecto principal dos novos processos que coqueificação é aumentar a participação de carvão não coqueificável ou fracamente coqueificável na mistura, devido à crescente escassez dos bons carvões para coque (*hard coals*). Vários processos se encontram em escala-piloto ou de demonstração. Entre esses, salientam-se os processos “Scope 21” da Nippon Steel (Figura 2.11) e “Carbonix” da U.S. Steel, que já foram implantados industrialmente. Dados da literatura desses processos são encontrados somente para a fase de escala-piloto. Ainda não foram divulgados detalhes operacionais das plantas industriais (IEA, 2001). Os dados divulgados são que, através de briquetagem, consegue-se adicionar até 50% de carvão fracamente coqueificável na mistura sem que haja perda da qualidade (resistência) do coque produzido, para o processo Scope 21, e praticamente a totalidade de carvões não coqueificáveis no processo Carbonix. As mais recentes informações sobre o processo Scope 21 dão conta de que se encontra em operação na planta de Oita da Nippon Steel uma bateria de 64 fornos de 6,3 m de altura desde fevereiro de 2008 e produzindo cerca de 2.730 toneladas de coque por dia (TAKAMATSU et al, 2011).

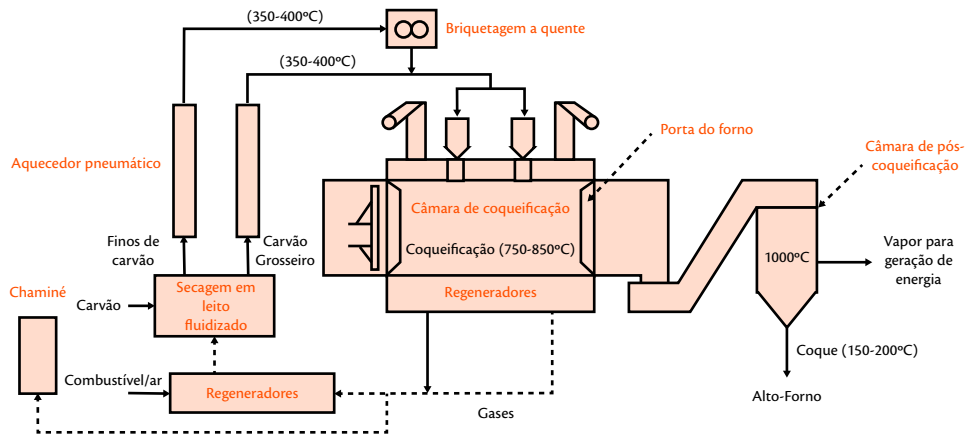


Figura 2.11 – Esquema do processo de coqueificação SCOPE 21.

Fonte: IEA 2001.

A tecnologia Stamp Charging (T2e) tem também como foco a utilização de matérias-primas menos nobres na coqueificação (ADAHAMA et al, 2008). Essa tecnologia foi amplamente estudada no passado em países do leste europeu. Entretanto, devido à possibilidade de uso de carvões com baixo poder coqueificante e resíduos carbonosos, a indústria (ex. Koksownia Nowa na Polônia e coqueria da Paul Wurth na siderúrgica da ZKS, Dillingen-Hütte, na Alemanha) e o meio acadêmico (Universidade Técnica de Berlin- Alemanha) vêm buscando desenvolver cada vez mais a tecnologia, principalmente pela maior facilidade com que se consegue introduzir importantes percentuais de carvão fracamente coqueificável ou não coqueificável na mistura a coqueificar, sem prejuízo da qualidade do coque resultante.

Basicamente, instala-se uma caixa de compactação externa (fixa ou na máquina enforadora), onde a carga sofre compactação através de marteletes ou mesmo por ação do peso de uma placa de aço aplicada sobre a superfície da mistura de carvões. O bolo compactado é então carregado através de uma bandeja deslizante, que o conduz ao interior do forno, de maneira similar à colocação de uma pizza para assar em forno à lenha. Como exemplo de uso da compactação em coquerias verticais citam-se a nova coqueria da ZKS, Dillingen-Hütte na Alemanha, que comissionou 40 fornos de 6,25 m de altura em fevereiro de 2010 para 1,3 milhão de toneladas-ano, encontrando-se uma segunda bateria do mesmo porte em fase de construção. Também a Tata Steel opera baterias verticais com esta tecnologia há vários anos em Jamshedpur, na Índia.



Porém, é nas baterias non-recovery e nas heat-recovery da Índia e da China que a tecnologia de compactação da carga encontra o seu maior crescimento. Atualmente, a maioria das baterias Indianas dispõe desta tecnologia. As baterias heat-recovery da Bengal Energy operam, por exemplo, com misturas contendo de 25 a 30% de carvões fracamente coqueificáveis em carga compactada, enquanto a bateria da vietnamita Hoa Phat opera com 25-28% de antracito na mistura também compactada, para sua bateria heat-recovery. No Brasil, já existe bateria *heat-recovery* para produção de dois milhões de toneladas-ano de coque, que dispõe da tecnologia de compactação da carga, encontrando-se em fase final de comissionamento, e operando ainda com carvões coqueificáveis tradicionais, para em breve iniciar o uso de carvões fracamente coqueificáveis.

A menção à tecnologia de compactação da carga no contexto das estratégias para o carvão nacional baseia-se no potencial que esta tecnologia sugere para utilização de nossos carvões, cuja propriedades coqueificantes podem ser maximizadas pela melhor aglutinação das partículas, facilitada pela compactação e, conseqüentemente, pela maior densidade de carga.

O alto-forno ainda tem-se mostrado o processo mais econômico para a produção de ferro primário e com uma alta flexibilidade para adaptação às novas exigências da siderurgia. A principal razão para o desenvolvimento de novos processos de redução direta e de fusão-redutora é evitar as etapas de coqueificação e sinterização antes do alto-forno. Atualmente, a motivação ambiental (emissões gasosas e reciclagem dos resíduos sólidos) tem sido o principal incentivo. O ferro produzido por esses processos alternativos complementarará o alto-forno na produção de aço, mas não o substituirá nas próximas décadas.

Processos de Redução Direta (T2i)

A segunda rota em importância para a produção de ferro primário, que corresponde a 5% da produção mundial de ferro-primário, é a redução direta de minério de ferro, que produz ferro metálico na forma sólida, chamado ferro-esponja ou DRI (Direct Reduced Iron), utilizando carvões não coqueificáveis ou gás natural como redutor/combustível. Uma das vantagens dos pré-reduzidos (DRI e HBI) é o baixo teor de contaminantes, o que estimula o seu uso em aciarias elétricas, com a finalidade de fabricar aços de melhor qualidade (FINEMAN AND MACRAE, 1999).

Processos de redução direta com redutor gasosos em fornos de cuba (90%) ou leito fluidizado utilizam CO e H₂ oriundo do craqueamento do gás natural para produzir DRI. A escala de produção e a produtividade desse processo é bem menor do que as do alto-forno a coque. Esses processos são considerados complementares à produção de ferro-primário. Todos esses se en-



contram em escala comercial. No âmbito da siderurgia mundial, o volume de investimentos direcionados às usinas integradas a redução direta vem aumentando. Além disso, os processos de PD&I com gases de processo mais ricos em hidrogênio tem sido alvo de investigações em importantes programas multi-institucionais no exterior.

As empresas Midrex e Lurgi apresentaram uma tecnologia de processo combinado que utiliza gases redutores provenientes do gaseificador comercial Lurgi para uso no processo de redução Midrex (CHEELEY, 2010). Essa rota é muito atrativa para utilização de carvão nacional não coqueificável de alto teor de cinzas. (T2h)

Os processos de redução direta com redutor sólido permitem a utilização de carvões não coqueificáveis mais baratos, como fonte de energia e de gás redutor (DIRECT REDUCED IRON, 1999). As características dos carvões (matéria volátil e cinzas) são flexíveis. Há de se destacar o processo SL/RN em forno rotativo já testado no Brasil, que permitia a utilização de carvões com altos teores de cinzas e voláteis (Figura 2.12). Essa tecnologia foi transferida para outros países, principalmente para a Índia, que possui carvões similares ao brasileiro, e produz cerca de 17 milhões de t/a de DRI (MIDREX, 2011).

Esse processo permite a utilização de carvão nacional não coqueificável com alto teor de cinzas e alta reatividade, visto que opera com temperaturas mais baixas e com maior produtividade. Essas características são típicas dos carvões nacionais. A matéria volátil pode variar entre 25% e 50% e são fontes de energia e de gases redutores.

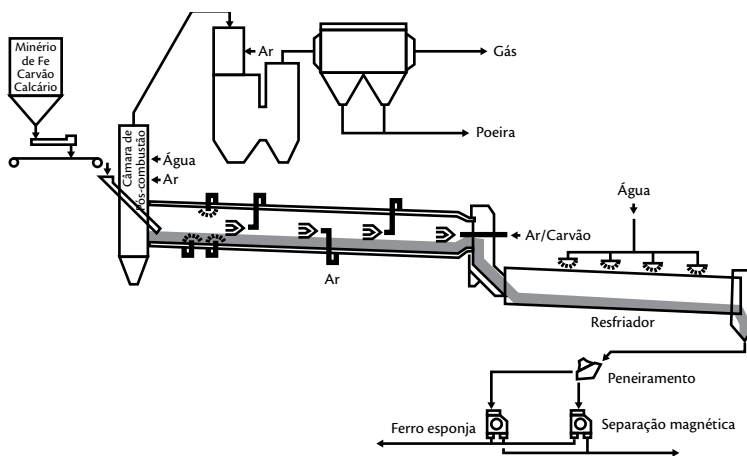


Figura 2.12 – Processo de redução direta com carvão em forno rotativo.

Fonte: Vilela, 1981.



Uso do carvão não coqueificável nacional no processo de Redução Direta (T2i)

Cabe ressaltar a experiência de utilização do carvão da mina de Recreio, com cerca de 30% de cinzas no processo SL/RN da, então, Aços Finos Piratini, no Rio Grande do Sul. Do início da década de 1970 até aproximadamente 1990, operou a primeira planta industrial do Processo de Redução Direta SL/RN, da, então, Aços Finos Piratini (AFP). O carvão ROM com 50% de cinzas era beneficiado em ciclone de meio-denso na AFP, que resultava num carvão redutor com 33% de cinzas e 0,7% S, características essas que satisfaziam plenamente às exigências do processo: carvão tipo energético e não aglutinante (VILELA, 1981).

O início da posta-em-marcha do processo apresentou problemas operacionais devido ao alto teor de cinzas do carvão e ao tipo de minério de ferro usado. Entretanto, sucessivos trabalhos de pesquisa no Brasil (UFRGS) e no exterior (Universidade Técnica de Aachen-Alemanha), junto com testes industriais, adaptaram o processo ao carvão de alto teor de cinzas do Rio Grande do Sul.

A principal causa da desativação da planta foi em função da pequena escala de produção (60 mil t/a), que não era econômica. Ela foi a primeira planta industrial SL/RN no mundo a operar com tal tipo de carvão. O sucesso dessa planta operando com carvões de alto teor de cinzas incentivou a implantação desse processo em países como Índia e África do Sul. A Índia, atualmente, é o maior produtor de ferro-esponja a partir do uso de carvões não-coqueificáveis.

Processos de Fusão-Redutora (T2g, T2j1, T2j2)

Novos processos denominados de Fusão-Redutora estão sendo estudados e implantados em escala-piloto, de demonstração, e comercial para substituir o carvão coqueificável por carvão não coqueificável ou energético.

Os estágios de maturidade tecnológica de vários processos emergentes de redução também estão retratados na Figura 2.13, segundo Noldin Jr., 2011. Duas linhas em desenvolvimento se destacam: a auto-redução e a fusão-redutora. Por visarem à produção de ferro-gusa ou produtos metálicos similares (nuggets e pellets), os processos emergentes são propostas alternativas ao alto-forno, em particular ao alto-forno a coque. De fato, os processos emergentes têm sido concebidos visando eliminar as etapas de aglomeração do minério de ferro e de coqueificação, ambas inerentes à rota do alto-forno a coque, permitindo com isso o uso generalizado de minérios finos e de carvões não-coqueificáveis. Enquanto alguns processos emergentes já deram início em



suas unidades comerciais (T2j1) (Corex e Finex) (CARPENTER, 2004), outros ainda se encontram em fase de demonstração de suas tecnologias (Tecnored, Hlsmelt, Rotary Hearth Furnace/RHF, High-Quality Iron Pebble/Hi-QIP) (T2j2) (CGEE, 2010). No que tange aos primeiros, os processos Corex (na África do Sul e na Índia) e Finex (na Coreia do Sul) tem apresentado resultados preliminares considerados animadores pelos responsáveis por suas tecnologias, nas escalas comerciais já implantadas, e pelos estudos realizados na universidade Técnica de Pohang “Postech, na Coreia do Sul (Finex) e na e na Universidade de New South Wales–Austrália (Corex).

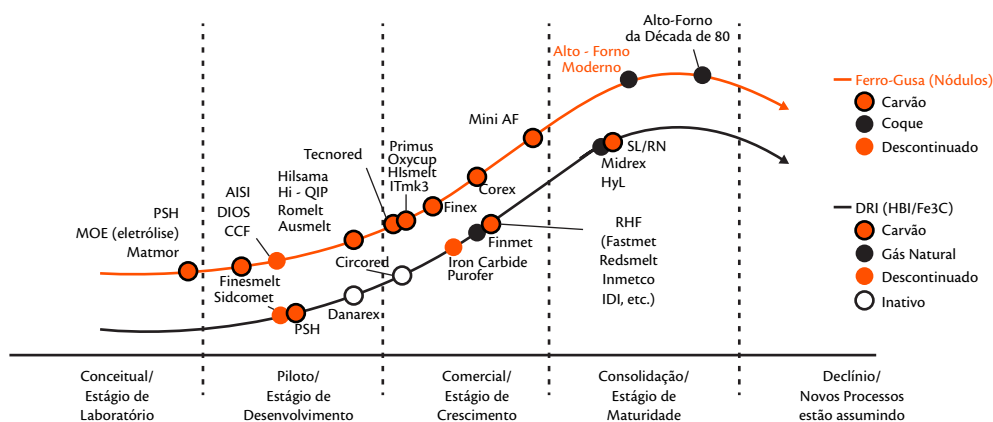


Figura 2.13 – Estágios de maturidade tecnológica de processos emergentes de redução.

Desses, o processo Corex parece ser o de maior sucesso e aceitação, consideradas as unidades já em operação como as da chinesa Bao Steel, com duas plantas Corex 3000, a primeira desde 2009 e a segunda, que teve início em 2011, bem como as unidades da JSW na Índia, com 2 plantas de 800 mil toneladas cada, e as da Ispat Dolvi, também na Índia, com 1,4 milhão de toneladas.

O processo Corex se dá através de dois estágios, conforme Figura 2.14. No primeiro, o minério de ferro é reduzido num forno de cuba; no segundo, o ferro pré-reduzido é fundido, utilizando-se da energia gerada a partir da gaseificação (e combustão parcial) do carvão. O gás redutor produzido neste segundo estágio é utilizado no primeiro estágio (forno de cuba).

O carvão utilizado no processo tem o papel de gerar calor para 3 estágios de operação: 1) o calor necessário à desvolatilização do próprio carvão; 2) à gaseificação do char; e 3) e à fusão do pré-reduzido.

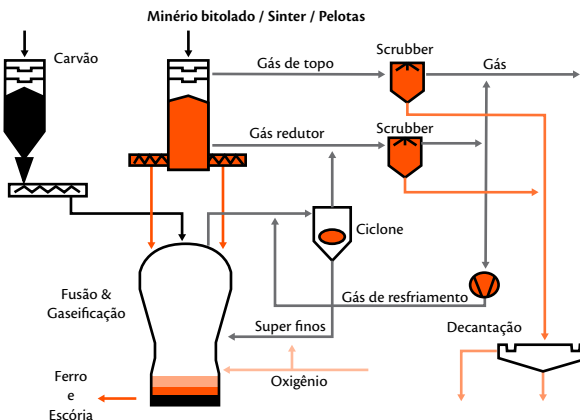


Figura 2.14 – Configuração esquemática de uma planta COREX®

Fonte: Bennett, P. A., 1999.

Em linhas gerais, os carvões normalmente adequados para o processo Corex têm as propriedades indicadas na tabela 2.6.

Tabela 2.6 – Características básicas do Carvão para uso no processo Corex®

Especificações Análise Imediata (base seca)	Tolerável	Preferidas
Matéria volátil	Máx. 35%	20-35%
Cinzas	Max. 25%	5-12%
Carbono Fixo	Mín. 55%	60-70%
Carbono Fixo / Cinzas	Mín. 3	> 5
Enxofre	1% max	< 0,5%
Granulometria	0 x 50 mm	5 x 40 mm 20-30 mm (ϕ médio) < 5 mm: 5% máx

Fonte: Bennett, P.A.

O processo Corex é uma alternativa para o carvão nacional, assumindo que o seu beneficiamento permita obter valores de cinza e enxofre mais próximos dos valores toleráveis.

Pode-se afirmar que os investimentos internacionais, nas pesquisas dos processos alternativos ao alto-forno a coque, continuam em nível elevado, em particular na Austrália, no Japão, na Europa e na Índia. Um dos principais motivadores para o desenvolvimento de tais processos é a busca



por menores custos (de capital e operacional), comparativamente aos altos-fornos a coque. Em relação às questões ambientais, já surgem na siderurgia discussões a respeito da viabilidade dos chamados processos menos carbono (*carbon less*) e processos sem carbono (*carbon free*).

No que se refere às estratégias emergentes de redução, deve-se ressaltar que o Brasil vem se mantendo na vanguarda da tecnologia de autorredução, por meio do desenvolvimento do processo Tecnored, atualmente em estado de demonstração tecnológica.

O processo Tecnored (T2g) usa como carga aglomerados autorredutores (pelotas e briquetes), os quais são constituídos basicamente de óxidos de ferro, geralmente finos de minério e/ou resíduos ferrosos da indústria metalúrgica, misturados intimamente a agentes redutores. Estes aglomerados são carregados juntamente com combustível bitolado ou em forma de briquetes, em um forno de cuba. A Figura 2.15 mostra as fontes de carbono usadas no processo Tecnored, sendo que testes recentes estão sendo realizados com carvões de diversas origens e características. Devido a suas características, este processo tem, portanto, grande versatilidade quanto ao uso de matérias-primas, conforme mostrado na Tabela 2.7. Desta forma, o processo abre portas para a utilização de carvões menos nobres, bem como diversos tipos de resíduos da indústria siderúrgica. Como se observa na Figura 2.13, o Tecnored encontra-se no início do estágio de consolidação técnica/comercial, estando ligeiramente atrás de suas concorrentes internacionais mais expressivas (processos Hismelt, RHF e Finex).

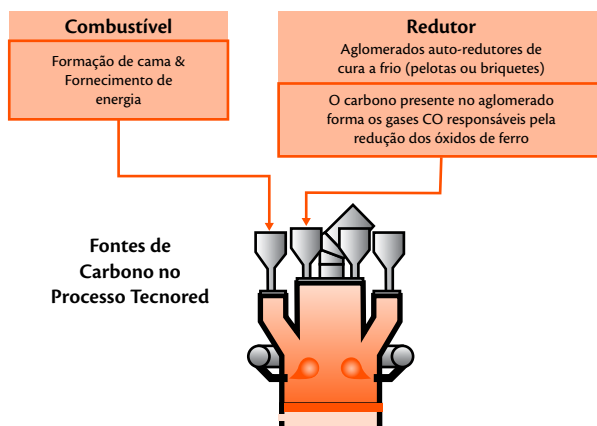


Figura 2.15 – Processo de autorredução Tecnored e suas fontes de carbono.

Fonte: Noldin Jr, 2011.



Tabela 2.7 – Composição das diversas matérias-primas testadas na planta-piloto TecnoRed

	Carbono fixo % base seca	Voláteis % base seca	Cinzas % base seca	Enxofre % base seca	Granulometria mm
Coque	85,7	1,8	12,5	<1,0	30x60 e 40x80
Coque de alta cinza	79,0	1,1	19,9	<1,0	40x100
Semi-Antracito	50,0	14,0	36,0	<3,0	30x50
Coque de petróleo argentino	84,0	14,5	1,0	0,61	30x60 e 40x80
Coque de petróleo brasileiro	87,0	12,0	1,0	0,70	30x60 e 40x80
Madeira seca ao ar	47,0	52,2	0,8	Não disponível	Várias

Fonte: Noldin Jr, 2004

Beneficiamento de carvões nacionais (T2a, T2b, T2c, T2d)

O carvão nacional Run of Mine (ROM), tanto de Santa Catarina como do Rio Grande do Sul, possui altos teores de matéria mineral (40-60%). A grande maioria dos processos siderúrgicos requerem baixos teores de cinzas, pois elas aumentam a quantidade de escória dos fornos, diminuindo a produtividade, e incorporam elementos prejudiciais à qualidade do aço (S, álcalis, P), além de impactarem negativamente o consumo de coque por tonelada de gusa produzido, *coke-rate*.

Os carvões nacionais são, na sua maioria, beneficiados por processo gravimétrico, ou densitário, cujo fator predominante para a separação é a densidade (SAMPALHO, 2005). Existem, basicamente, dois tipos de processos utilizados: jigagem e separação por meio-denso.

O processo de jigagem, com a utilização de água como meio (jigagem a água) (T2a), pode ser encontrado no país em diversas plantas de beneficiamento. Esses equipamentos, muitas vezes produzidos no país, com tecnologia baseada na utilizada no exterior, apresentam uma baixa eficiência de corte. Devido à baixa qualidade dos equipamentos produzidos, existe uma descrença pela indústria carbonífera nacional da eficiência que estes equipamentos possam alcançar (FERREIRA, 2012).

Para o aumento da eficiência de jigagem com tecnologia brasileira é necessária a fabricação de equipamentos nacionais por metalúrgicas que se interessem na absorção de conhecimentos diretamente das universidades brasileiras. Há domínio nacional para a construção de jigues a água, e o setor industrial deve utilizar esse conhecimento já existente no país.



Para isto se concretizar, são necessários investimentos em PD&I em equipamentos nacionais, de modo participativo entre indústria nacional e universidades. Esses financiamentos podem ser a fundo perdido, por meio de projetos de pesquisa, para a construção inicial de protótipos de equipamentos, bem como seus testes junto às universidades. Numa segunda etapa, por exemplo, com financiamento por parte da Finep, podem-se construir os primeiros equipamentos industriais. Acredita-se que já exista mercado para a fabricação destes tipos de equipamentos na indústria carbonífera nacional.

Além de jigues a água, existe um grande mercado para a instalação de jigues a ar (T2a), equipamentos estes que trabalham com o meio ar, ao invés de água. Este tipo de equipamento é utilizado, cada vez mais, tanto no exterior quanto no Brasil, devido aos problemas ambientais que são acarretados com a utilização de água nos processos.

Para o desenvolvimento de jigues a ar, com tecnologia nacional, é necessário investimento em PD&I nas universidades (UFRGS e Universidade Técnica de Aachen-Alemanha). Atualmente, a indústria nacional não possui tecnologia nem conhecimento para a fabricação deste tipo de equipamento. Estudos para o beneficiamento do carvão de Candiota com esse equipamento resultarão na instalação de planta piloto com capacidade para 50t/h, na mina de Candiota, com previsão de operação a partir de abril de 2013.

Há também o processo a meio-denso, que foi desenvolvido na Holanda no final do século 19 e é altamente utilizado mundo a fora. No país, com pouquíssimas exceções, esta tecnologia não é utilizada. O processo é mais eficiente que os processos de jigagem, porém sua utilização requer maior investimento inicial.

Para o início da construção de separadores a meio-denso nacionais é necessário, da mesma forma que para jigues a ar, o investimento em PD&I nas universidades (T2c). Assim, em conjunto com o setor industrial, torna-se possível a construção de protótipos de equipamentos. Esses protótipos seriam então testados com carvões nacionais, antes do início da construção de equipamentos industriais. Por outro lado, eventualmente mais rápida, é a previsão para importação de tecnologia de beneficiamento densimétrico, amplamente desenvolvida no exterior, associada à adequada absorção da tecnologia e treinamento para uso dos protótipos importados.

Outro tópico importante é que, para viabilizar a produção de uma fração de carvão metalúrgico de baixo teor de cinzas, gera-se outra fração de alto teor de cinzas que deve ser utilizada,



preferencialmente, em termelétricas. Essa afirmação é válida para os carvões das jazidas já testadas e estudadas. A produção de carvão metalúrgico da camada Barro Branco gera uma fração metalúrgica de 17% de cinzas e uma com cerca de 35% para uso em termelétricas. Estudos em nível de laboratório com outros carvões mostraram que a produção de somente uma fração PCI não é econômica. Testes para obtenção de uma fração do carvão do Leão com 20% de cinzas proporcionaram uma recuperação de 25-30%, sendo o restante rejeito e carvão térmico. Nas outras jazidas a recuperação mássica é de, no máximo, 20%. Quanto ao carvão da jazida de Santa Terezinha, ainda há a necessidade de estudos mais profundos de beneficiamento.

2.2.4 – Pontos de atenção e necessidades de ações de suporte

Para se chegar aos posicionamentos estratégicos pretendidos em relação a cada um dos tópicos associados ao desafio abordado, no período de 2012 a 2035, identificam-se vários gargalos que precisam ser superados, mas também inúmeras oportunidades estratégicas para o país.

Como pode ser observado na Figura 2.16, apontam-se no próprio mapa tecnológico os pontos de atenção que indicam a necessidade de ações de suporte relacionadas aos respectivos gargalos e ao aproveitamento de oportunidades estratégicas identificadas ao longo do processo de construção do mapa.

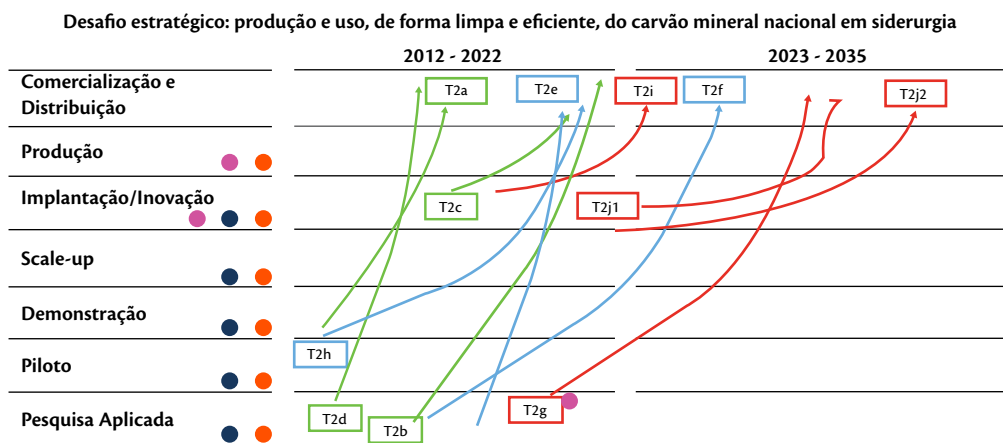


Figura 2.16 – Pontos de atenção para ações de suporte ao desenvolvimento das trajetórias associadas ao desafio: 2012-2035.



Notação: T2a – Processos de concentração a ar; T2b – Processos de concentração em leitos pulsantes; T2c – Processos de simulação de plantas e processos; T2d – Processos de concentração utilizando meios densos; T2e - Processo de utilização de carvão com baixo poder de coqueificação e utilização de carvão nacional para injeção direta nos altos-fornos (PCI); T2f – Novos processos de coqueificação (briquetagem e compactação da carga – stamp charging) com aumento da participação de carvão fracamente ou não coqueificável; T2g – Processo de produção de ferro tipo fusão redutora utilizando aglomerados autorredutores; T2h– Estudos de processos de gaseificação do carvão mineral nacional; T2i - Escalonamento e dimensionamento do processo industrial de redução direta com carvão mineral nacional.; T2j1 e T2j2 – Definição de processos de produção de ferro gusa de fusão redutora utilizando carvão mineral não coqueificável.

Convenção de cores: recursos humanos (cor laranja); infraestrutura física (cor azul); investimentos (cor rosa); aspectos regulatórios (cor verde); e aspectos mercadológicos (cor vermelha).

2.2.5 – Portfólio estratégico de PD&I

A Figura 2.17 representa o portfólio estratégico de PD&I relacionado à produção e ao uso, de forma limpa e eficiente, do carvão mineral na siderurgia, no período de 2012 a 2035. Para a construção do portfólio, os tópicos associados a esse desafio foram classificados segundo dois critérios: 1) sustentabilidade, calculada em função do impacto econômico e socioambiental das aplicações potenciais do tópico; e, 2) grau de esforço requerido para atingir o posicionamento desenhado no mapa tecnológico.

	Ideal	Desejável ● T2g ● T2i ● T2j ● T2e	Apostas ● T2h ● T2f
Sustentabilidade	Desejável	Aceitável ● T2c ● T2a ● T2b ● T2d	Indesejável
alta			
média			
baixa	Aceitável	Indesejável	Indesejável

Figura 2.17 – Portfólio estratégico de PD&I referente à produção e uso, de forma limpa e eficiente do carvão mineral na siderurgia: 2012-2035.



Notação: T2a – Processos de concentração a ar; T2b – Processos de concentração em leitos pulsantes; T2c – Processos de simulação de plantas e processos; T2d – Processos de concentração utilizando meios densos; T2e - Processo de utilização de carvão com baixo poder de coqueificação; T2f – Novos processos de coqueificação (briquetagem), com aumento da participação de carvão não coqueificável; T2g – Processo de produção de ferro tipo fusão redutora utilizando aglomerados autorredutores; T2h– Estudos de processos de gaseificação do carvão mineral nacional; T2i - Escalonamento e dimensionamento do processo industrial de redução direta com carvão mineral nacional; T2j1 e T2j2 – Definição de processos de produção de ferro gusa de fusão redutora utilizando carvão mineral não coqueificável.

A partir da visão conjunta do mapa tecnológico, com os pontos de atenção, e do portfólio estratégico de PD&I, identificam-se diversas oportunidades e gargalos, conforme discutido a seguir.

A Figura 2.17 mostra que as oportunidades mais promissoras, segundo visão de mais longo prazo, podem ser consideradas como ‘apostas’ para o país, situando-se no quadrante superior direito. Referem-se aos seguintes tópicos: ‘estudos de processos de gaseificação do carvão mineral nacional’ (T2h); ‘novos processos de coqueificação (briquetagem), com aumento da participação de carvão não coqueificável’(T2f).

Cinco tópicos – ‘processo de produção de ferro tipo fusão redutora utilizando aglomerados autorredutores’ (T2g); ‘escalonamento e dimensionamento do processo industrial de redução direta com carvão mineral nacional’ (T2i); ‘definição de processos de produção de ferro gusa de fusão redutora utilizando carvão mineral não coqueificável’(T2j1 e T2j2) e ‘processo de utilização de carvão com baixo poder de coqueificação’ (T2e) – encontram-se em área ‘desejável’ no portfólio.

Os demais tópicos situam-se em posição ‘aceitável’ no portfólio estratégico de PD&I. São eles: ‘processos de concentração a ar’ (T2a); ‘processos de concentração em leitos pulsantes’ (T2b); ‘processos de simulação de plantas e processos’ (T2c) e ‘processos de concentração utilizando meios densos’ (T2d).

2.2.6 – Considerações finais sobre a siderurgia

A partir do que foi apresentado sobre a participação do carvão mineral nas distintas rotas de produção de aço, pode-se afirmar que o carvão mineral, coqueificável ou energético, é um reductor/combustível primordial na produção de aço. Isso significa que, para produzir aço, o Brasil vai necessitar de carvão mineral e vai continuar importando essa matéria-prima com uma tendência



de custo cada vez maior. Significativos esforços estão sendo feitos para diminuir a geração de CO₂/t de aço produzido. Otimização de processos e novas tecnologias são focadas na etapa de produção de ferro primário (redução de minério de ferro), que é a responsável por 70% das emissões desse gás na siderurgia. É neste contexto que se vislumbra a participação do carvão nacional nos diversos processos siderúrgicos.

O principal gargalo técnico para a produção de um carvão nacional com características aceitáveis para uso siderúrgico é a baixa eficiência do beneficiamento dos carvões. Os dois processos de melhor aplicabilidade aos carvões e às condições nacionais são os jigues e separadores a meio-denso. Para o aumento da eficiência desses equipamentos com tecnologia brasileira é necessário investimento em PD&I nas universidades e transferência de tecnologia aos fabricantes nacionais, ou importação de tecnologia existente e amplamente verificada no exterior, garantindo-se a adequada absorção e disseminação da tecnologia para universidades brasileiras e indústrias interessadas. Deve-se salientar que a produção de carvão nacional beneficiado tipo “metalúrgico” vai gerar uma fração de alto teor de cinzas que deve ser utilizado para a geração de energia elétrica.

O carvão nacional com as propriedades adequadas, obtido em processos de beneficiamento de maior eficiência, poderá ser usado nos seguintes processos siderúrgicos:

- Injeção de carvão pulverizado nas ventaneiras dos altos-fornos (PCI).
- Processos de coqueificação que permitam maior participação de carvões fracamente coqueificáveis nas misturas.
- Processos de aglomeração de minério de ferro, como combustível na pelotização ou sinterização.
- Processos de Redução Direta que permitam o uso de carvões não coqueificáveis de alto teor de cinzas.
- Gaseificação de carvão para geração de gases redutores e uso em processo e Redução Direta com redutor gasoso.
- Processo de Fusão-Redutora que utilizem carvões não coqueificáveis e que já se encontrem em escala comercial.
- Processo de Fusão-Redutora nacional Tecnored que utiliza aglomerados autorredutores.

Cabe esclarecer que a aplicação do carvão nacional nos diversos processos siderúrgicos pode se dar na forma de misturas com os carvões importados, pois o carvão nacional conhecido e já



caracterizado, mesmo com um beneficiamento eficiente, dificilmente apresentará propriedades ideais para que seja utilizado a 100% na maioria dos processos apresentados. Entretanto, a sua maior participação vai depender dos esforços para adequação das propriedades químicas às exigências metalúrgicas, além dos aspectos econômicos. A exceção é a utilização total do carvão nacional no processo de Redução Direta que já foi comprovada em nível industrial.

Para que seja retomada a utilização de carvão nacional para produção de coque e viabilizado os demais usos já descritos na siderurgia, torna-se necessário que um estudo de viabilidade econômica seja feito levando em consideração, além dos aspectos técnicos comentados, a escala de produção da mina, o uso da fração térmica gerada no beneficiamento, os investimentos necessários para revitalizar a infraestrutura de portos e ferrovias e, finalmente, os custos dos carvões produzidos em comparação com os carvões similares importados.

2.3 – Carvão mineral nacional na geração termelétrica

2.3.1 – Metas a serem alcançadas em 2022 e 2035

Tabela 2.8 – Metas da geração termelétrica para 2022 e 2035.

Metas até 2022	Marco regulatório definido para que a geração termelétrica tenha igualdade de oportunidades às demais fontes, com atenção ao atendimento às questões ambientais intrínsecas.
	Usinas termelétricas com 40% de eficiência energética e menor geração de impactos e emissões atmosféricas.
	Tipos de carvão e jazidas carboníferas caracterizadas.
Metas até 2035	Segmentos de lavra e beneficiamento operando com implantação de tecnologia de mitigação de impactos ambientais.
	Usinas termelétricas com 45% de eficiência energética e menor geração de impactos e emissões atmosféricas.
	Brasil posicionado como desenvolvedor e exportador de tecnologias de aproveitamento limpo de carvões de altos teores de cinzas e enxofre.

2.3.2 – Tópicos tecnológicos associados

A Tabela 2.9 apresenta os tópicos associados à produção e uso, de forma limpa e eficiente, do carvão mineral nacional na geração termelétrica, incluindo seus descritivos. Uma vez definidos os tópicos, esses foram avaliados quanto ao estágio de maturidade tecnológica no mundo e no Brasil.



O conceito de maturidade tecnológica indica o estágio de evolução de uma dada tecnologia e o campo de ação para avanço adicional, considerando-se o estado-da-arte em nível mundial (ROUSSEL et al., 1991). As tecnologias podem ser classificadas em: 1) embrionárias; 2) em crescimento; 3) maduras; e, 4) pós-maduras (Figura 2.18).

As referências alfa-numéricas na primeira coluna do quadro foram adotadas ao longo de toda a construção do mapa tecnológico e do portfólio estratégico de PD&I associados ao desafio da produção e uso, de forma limpa e eficiente do carvão mineral na geração termelétrica.

Tabela 2.9 – Tópicos associados à produção e uso, de forma limpa e eficiente, do carvão mineral na geração termelétrica.

Ref.	Tópicos associados	Descritivo
T3a	Plantas supercríticas de carvão pulverizado e leito fluidizado circulante.	Plantas termelétricas de ciclo vapor com pressões acima do ponto crítico.
T3b	Plantas leito fluidizado borbulhante subcrítica multicombustível.	Pequenas centrais termelétricas a carvão com biomassa local.
T3c	Estudo de condições para captura de CO ₂ em novas plantas a carvão.	Estudo de viabilidade de novas termelétricas com previsão de espaço e conexões para implantação futura de CCS (conceito Capture Ready)
T3d	Gaseificadores T3d1 – Gaseificadores para IGCC e poligeração.	Gaseificadores para plantas de ciclo combinado ou uso misto (syngas)
	T3d2 – Gaseificação in situ para IGCC e poligeração.	Processos para gaseificação do carvão in situ (underground coalgasification-UCC) para planta de ciclo combinado ou uso misto (syngas).
T3e	Captura de CO ₂ T3e1 – Pré-combustão.	“Shift” do syngas, gerando H ₂ e CO ₂ , associado a processo de separação.
	T3e2 – Pós-combustão.	Processos de captura por separação do CO ₂ dos gases se combustão (adsorção, peneira molecular, criogenia).
	T3e3 – Oxicombustão.	Oxidante do processo é oxigênio puro, gerando um fluxo de CO ₂ puro.
	T3e4 – Biofixação.	CO ₂ da combustão é utilizado para cultivo de algas para produção de biodiesel.
T3f	Cofiring.	Queima conjunta de biomassa em plantas a carvão, para a minimização de CO ₂ por emissão evitada e aumento de eficiência..
T3g	Aproveitamento de coprodutos da combustão.	Resíduos (cinzas e rejeitos dos processos de limpeza) são insumos para outros processos e produtos com maior valor agregado..



Plantas supercríticas de carvão pulverizado e leito fluidizado circulante (T3a)

Este item refere-se a plantas termelétricas de ciclo Rankine, em que o vapor na saída da caldeira está acima da pressão crítica de 22,09 MPa. Nesta situação, a temperatura média em que o calor é transferido à água é mais alta do que numa planta subcrítica e, conseqüentemente, o rendimento será maior, podendo chegar a 50%. As principais dificuldades na implantação desta tecnologia referem-se às características exigidas dos materiais constituintes da caldeira e da turbina. Não há plantas deste tipo no Brasil. Há no mundo plantas comerciais supercríticas de carvão pulverizado (até 30 MPa e 620 oC) e de leito fluidizado (30 MPa e 580 oC) e projetos e plantas de demonstração para condições ultra críticas (até 35 MPa e 720 oC) (IEA CLEAN COAL CENTRE, 2009). Para a viabilização desta tecnologia, deverá ser considerada a mistura com carvões importados (blendagem), visando o ajuste das melhores características para maximizar a eficiência das plantas. Uma mistura de carvões não se caracteriza pela média ponderada dos carvões constituintes e são necessários estudos de caracterização para cada caso.

Plantas de leito fluidizado borbulhante (T3b)

Estas plantas são muito versáteis, podendo operar com variadas composições de combustíveis, incluindo misturas de carvão mineral e biomassa, como sobras da agricultura ou da indústria ou ainda resíduos sólidos urbanos. O carvão, neste caso, complementa, em quantidade e qualidade, o resíduo utilizado. Apresenta a vantagem de emitir menos NO_x, por trabalhar a temperaturas menos elevadas. Conforme a proporção de biomassa utilizada, contribuem com os esforços de redução de emissões, por CO₂ evitado. Estas pequenas centrais termelétricas são adequadas para geração distribuída e dessalinização, entre outros usos. No Brasil existem plantas de demonstração, prontas para *scale-up*, para escalas de até 30 MW.

Estudo de condições para captura de CO₂ em novas plantas a carvão (T3c)

O item refere-se ao conceito Capture Ready, ou seja, plantas termelétricas a carvão, de qualquer tipo, prontas para implantação de processos de captura e armazenamento de CO₂. São condições de projeto e tem como objetivo principal evitar a impossibilidade da implementação dos processos de captura em etapa posterior (*carbon lock-in*), quando as tecnologias específicas estiverem em estágio comercial. Esta medida já é adotada em vários empreendimentos no mundo (IEA, 2009), mas ainda há controvérsias quanto aos parâmetros mínimos para classificar uma planta Capture Ready (LI et al., 2012).



	Geração termelétrica	Inexistente	Embrionária	Em crescimento	Madura	Pós-madura
T3a	Plantas supercríticas de carvão pulverizado e leito fluidizado circulante					
T3b	Plantas leito fluidizado borbulhante subcrítica multicombustível					
T3c	Estudo de condições para captura de CO ₂ em novas plantas a carvão					
T3d1	Gaseificadores para IGCC e poligeração					
T3d2	Gaseificadores <i>in situ</i> para IGCC e poligeração					
T3e1	Captura de CO ₂ (pré combustão)					
T3e2	Captura de CO ₂ (pós-combustão)					
T3e3	Captura de CO ₂ (oxicombustão)					
T3e4	Captura de CO ₂ (biofixação)					
T3f	Cofiring					
T3g	Aproveitamento de coprodutos da combustão					

Figura 2.18 – Estágio de evolução das tecnologias no mundo e no Brasil.

Gaseificadores para IGCC e poligeração (T3d1)

Entre as tecnologias disponíveis e adequadas para o carvão nacional destaca-se a gaseificação em leito fluidizado, tanto para a geração de energia integrada em plantas de ciclo combinado – IGCC, como pela sinergia possível com os demais aproveitamentos do carvão: siderurgia e carboquímica. O item (T3d1) é bastante amplo, pois se refere ao desenvolvimento de gaseificadores a pressão atmosférica ou pressurizados, em que o oxidante é o ar ou um gás com alta concentração de oxigênio e o produto pode ser o gás pobre (ou gás de síntese - *syngas* - CH₄, CO, CO₂, H₂) ou, se for adicionado vapor d'água, um gás mais rico em hidrogênio. Quando o objetivo é combustível para a turbina a gás de um ciclo combinado, usa-se oxigênio puro como oxidante.



O CO_2 resultante da oxidação parcial do carvão no gaseificador poderá ser separado e encaminhado para armazenamento e o gás resultante é aplicado em plantas a ciclo combinado (ciclo a gás e ciclo vapor com o resíduo térmico do primeiro) ou para poligeração. Poligeração usualmente se refere a processos que associam três ou mais aplicações, que podem ser a geração de energia em ciclo combinado, em células combustíveis, para as diversas opções de produção de combustíveis líquidos a partir do gás de síntese ou ainda para a carboquímica. Plantas termelétricas IGCC a carvão possuem níveis de emissões muito inferiores aos apresentados por plantas a carvão pulverizado e similares às do gás natural (GN). O foco do item é o desenvolvimento de expertise em gaseificadores adequados às características do carvão nacional, exclusivo ou misturado (blendado) com carvões importados ou com biomassa. A co-queima com resíduos de refinaria, tendência mundial (MINCHENER, 2005) também é uma possibilidade. Gaseificadores vêm sendo desenvolvidos há muito tempo e os disponíveis atualmente apresentam alta eficiência de conversão. Ainda assim, continuam sendo objeto de pesquisa no mundo, para otimização de desempenho e aumento da escala (*scale-up*). O alto teor de cinzas exige que se façam estudos de adaptação, como os apresentados por Chavan et al., 2012, para carvões indianos, que mostram o efeito catalizador da matéria mineral nas reações de gaseificação em leito fluidizado. No Brasil, há atualmente tecnologia desenvolvida apenas para gaseificadores de pequeno porte, com plantas de demonstração em operação, além de gaseificadores de biomassa para ciclo combinado (BIGCC) e cogeração. Mondal et al., 2011, salienta que a gaseificação, tanto de carvão como de biomassa, está se desenvolvendo rapidamente no mundo todo, despontando como uma tecnologia limpa para o carvão.

Gaseificação *in situ* para IGCC e poligeração (T3d2)

A gaseificação de carvão *in situ* (UCG - Underground Coal Gasification) aumenta a disponibilidade de carvão como um recurso energético, pois viabiliza a exploração de jazidas não recuperáveis por métodos convencionais de mineração. O método UCG é configurado pelo uso de dois poços adjacentes perfurados até a camada de carvão. Em um dos poços é injetado o agente oxidante, podendo ser ele o ar, o oxigênio, o vapor de água, o CO_2 ou uma mistura dos mesmos, a altas temperaturas e sob pressão (COLLOT, 2006). O outro poço traz à superfície o gás produzido (gás de síntese ou *syngas*). Na gaseificação *in situ*, além das vantagens inerentes ao processo de gaseificação, tem-se a eliminação do manuseio de cinzas, a redução de danos à superfície e de problemas ambientais e de saúde e segurança ocupacional de minas, a diminuição de custos de capital, de operação e de produção do *syngas*. Há plantas de demonstração e operando comercialmente, por exemplo, no Uzbequistão, na China e na Austrália. No Brasil há estudos teóricos e estudos iniciais de viabilidade técnica.



Separação de CO₂ pré-combustão (T3e1)

A separação de CO₂ pré-combustão é aplicável aos processos de gaseificação com oxigênio e vapor d'água para a produção de um gás rico em hidrogênio que irá alimentar uma turbina a gás. Na Figura 2.19 pode-se ver esquematicamente o processo. Neste caso, a maior parte do CO₂ pode ser separada do gás antes da turbina, pois a combustão do hidrogênio gerará apenas água. O processo de separação tem como objetivo não apenas a captura do CO₂, mas também a obtenção do gás combustível ou gás de síntese mais puro, com maior valor agregado. É uma tecnologia que deve ser aplicada também às rotas de poligeração. No Brasil não há plantas nem estudos experimentais desta tecnologia e no resto do mundo há desenvolvimento de pesquisas em estágio experimental.

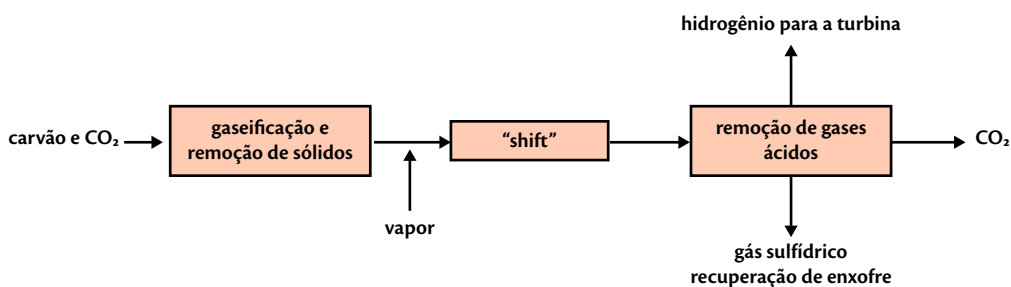


Figura 2.19 – Separação de CO₂ pré-combustão.

Fonte: IEA Clean Coal Centre, 2009 – modificado.

Separação de CO₂ pós-combustão (T3e2)

Os processos de captura pós-combustão são aqueles em que os gases de combustão, constituídos basicamente por CO₂, N₂ e traços de outros compostos são submetidos a um processo de separação. Há pesquisas em diversos estágios de desenvolvimento, mas apenas a separação por absorção utilizando, por exemplo, aminas, encontra-se em estágio comercial, embora seja um processo altamente intensivo em energia. Processos de adsorção utilizando zeólitas ou carvão ativado estão em estágio de desenvolvimento e se mostram muito promissoras (SAMANTA et al., 2012). Outras tecnologias em desenvolvimento incluem processos de separação por membranas e o uso de criogenia. No Brasil, não há pesquisas experimentais neste tema.



Como estas tecnologias podem ser utilizadas em qualquer processo de combustão, desde que economicamente viáveis, o seu desenvolvimento apresenta grande potencial para retrofit de plantas em operação ou novas plantas. Além disto, outras indústrias, tais como refinarias, petroquímicas, siderúrgicas e cimenteiras, são grandes emissoras de CO_2 e potenciais utilizadoras destas tecnologias.

Captura de CO_2 por oxicombustão (T3e3)

A captura de CO_2 , por oxicombustão, consiste em se realizar a combustão do carvão com recirculação de parte dos gases, enriquecidos com oxigênio. O resultado é um fluxo de gases de combustão composto majoritariamente de CO_2 e vapor d'água, com algumas impurezas originárias do carvão (cinzas, NO_x e SO_x). Após condensação da água, este fluxo de CO_2 pode ser encaminhado para armazenamento ou, após purificação, para outro uso industrial. Há no mundo vários projetos de demonstração e pesquisas relacionadas. No entanto, Scheffknecht et al., 2011, salientam que há vários aspectos tecnológicos a resolver, especialmente relacionadas à corrosão em presença de altas concentrações de CO_2 e SO_x , além dos custos elevados da produção do oxigênio. Um caminho promissor para a redução dos custos de produção de O_2 parece ser as membranas cerâmicas (HABIB et al., 2011). No Brasil, não há projetos experimentais em oxicombustão e há poucos estudos teóricos.

Captura de CO_2 por biofixação (T3e4)

A biofixação é um processo “inspirado na natureza”. Há várias propostas, tais como: plantio de florestas energéticas para exploração de biomassa, cultivo de hortaliças ou plantas ornamentais em estufas com crescimento acelerado em ambiente enriquecido com CO_2 e cultivo de microalgas em reatores alimentados com os gases de combustão, para posterior produção de biocombustíveis. Essas propostas têm sido pesquisadas e, no Brasil e no mundo, há plantas de demonstração. Ainda há necessidade de comprovação da real eficiência na redução de emissões em larga escala e, especialmente no caso das microalgas, mais pesquisas são necessárias para o domínio dos parâmetros do processo em escala industrial e para a viabilização econômica.

Cofiring (T3f)

Cofiring, ou co-queima, refere-se, neste trabalho, à queima, em caldeiras convencionais a carvão pulverizado ou leito fluidizado, de combustíveis renováveis, como palhas, cascas, bagaço, cavacos, ou os gases gerados a partir de processos de gaseificação destes resíduos ou de biodiges-



tores. Há vários projetos deste tipo em andamento no Brasil, utilizando bagaço de cana, palha de arroz pulverizada, cama de aviário etc. Nestes casos, além do aumento da eficiência, tem-se a redução do CO₂ por emissão evitada, o que pode ser uma solução para as termelétricas atualmente em operação, na sua maioria de baixo rendimento e, portanto, valores altos de emissões de CO por unidade de energia gerada. Zhou et al., 2010, salientam, no entanto, que a substituição, parcial ou total, do carvão por biomassa requer uma avaliação caso-a-caso do impacto no desempenho da caldeira. A introdução de unidades geradoras na tecnologia de combustão em Leito Fluidizado Borbulhante, por suas características, pode ser um relevante fator de incremento de cofiring no Brasil.

Aproveitamento de coprodutos da combustão (T3g)

O aproveitamento dos coprodutos da combustão e gaseificação do carvão refere-se à aplicação das cinzas volantes e de fundo, bem como do gesso resultante do processo de lavagem dos gases para dessulfurização como matérias primas em outros setores. Eles são utilizados na construção civil, para a produção de cimento, tijolos, gesso e material para preenchimento estrutural e aterro, em substituição à brita. No caso da produção de cimento, pode-se considerar o cômputo das emissões evitadas na produção de cimento por outras rotas como créditos na planta térmica a carvão. Nas minas de carvão as cinzas são utilizadas para preenchimento de galerias esgotadas para controle da subsidência. Estas aplicações encontram-se em estágio maduro no Brasil, embora problemas de beneficiamento e segregação, logística e de mercado comprometam o aproveitamento integral. Na agricultura, são utilizadas para remineralização e correção da acidez dos solos, bem como para melhoria das características de permeabilidade. As cinzas são matéria prima para a produção de zeólitas, que são poderosos adsorventes, podendo ser usados para descontaminação de águas servidas e para controle da drenagem ácida de mina (DAM). No Brasil, há pesquisas para a produção de zeólitas em estágio experimental (IZIDORO et al., 2012). A utilização das cinzas como fonte de metais é uma alternativa possível, embora ainda pouco explorada no mundo (MEAWAD et al., 2010). Entre os metais que têm sido estudados em termos de recuperação estão o alumínio e o germânio (ARROYO et al., 2009), elemento muito importante para semicondutores, produtos de altíssimo valor agregado.

2.3.3 – Mapa tecnológico: gargalos e oportunidades estratégicas

A Figura 2.20 representa o mapa tecnológico referente à produção e ao uso, de forma limpa e eficiente, do carvão mineral na geração termelétrica no Brasil. Nele, antecipam-se as trajetórias



dos tópicos analisados em seus diversos estágios, desde a pesquisa aplicada até a comercialização e distribuição dos produtos. Consideraram-se na configuração deste mapa dois horizontes temporais: 2022 e 2035.

Algumas das tecnologias destacadas neste *roadmap* já apresentam desenvolvimento no Brasil e, portanto, há uma base de pesquisadores e, em alguns casos, desenvolvimento de mercado. Nestes casos, a evolução prevista no mapa tecnológico é acelerada. É o caso do aproveitamento dos coprodutos da combustão (T3g), notadamente a cinza, que já ocorre no setor de construção civil em estágio de comercialização. Para as zeólitas, o atual estágio de pesquisa aplicada no Brasil é compatível com o desenvolvimento mundial, podendo-se prever que, com o devido acompanhamento, em poucos anos pode-se chegar ao estágio de produção, comercialização e distribuição. Já a recuperação de metais contidos nas cinzas parece ser uma possibilidade ainda remota, pois a grande disponibilidade de minério no Brasil não estimula rotas alternativas e de tecnologia experimental.

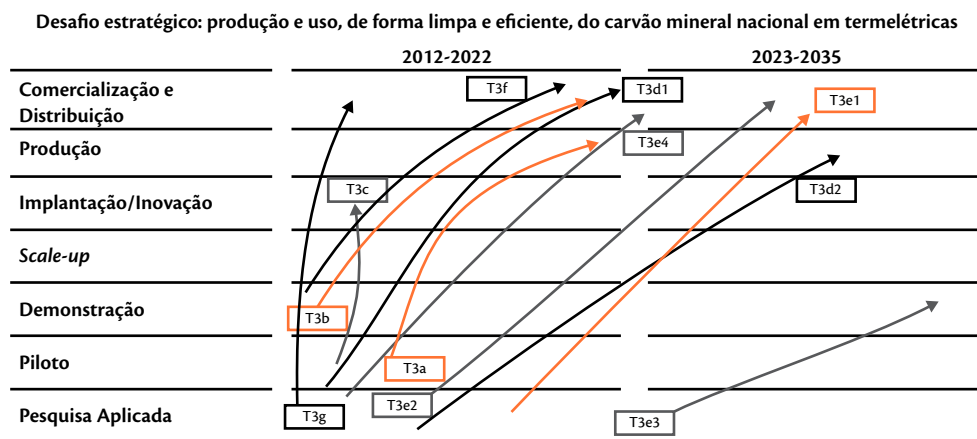


Figura 2.20 – Mapa tecnológico da produção e uso, de forma limpa e eficiente do carvão mineral em termelétricas: 2012-2035

Notação: T3a - Plantas supercríticas de carvão pulverizado e leito fluidizado circulante; T3b - Plantas de leito fluidizado borbulhante subcrítica multicombustível; T3c - Estudo de condições para captura de CO₂ em novas plantas a carvão; T3d1 - Gaseificadores para IGCC e poligeração; T3d2 - Gaseificação in situ para IGCC e poligeração; T3e1 - Captura de CO₂ (pré-combustão); T3e2 - Captura de CO₂ (pós-combustão); T3e3 - Captura de CO₂ (oxicombustão); T3e4 - Captura de CO₂ (biofixação); T3f – Cofiring; T3g - Aproveitamento de coprodutos da combustão.



O aproveitamento da biomassa, pelo seu potencial econômico e grande disponibilidade, está entre os interesses de pesquisadores e investidores no Brasil. As plantas de leito fluidizado borbulhante (LFB) propostas (T3b) são de pequeno e médio porte, para geração distribuída, que já existem em fase de demonstração, prontas para scale-up, com aporte moderado de investimentos. No caso de cofiring (T3f), há projetos aplicados em andamento, de adaptação de caldeiras de grande porte a carvão pulverizado para queima simultânea de biomassa – já, portanto, na fase de demonstração. Considerando-se a vantagem representada pela redução de emissões por unidade de energia gerada nas plantas mais antigas e ineficientes, espera-se que estas tecnologias se disseminem rapidamente, atingindo escala comercial no horizonte 2022 ou ainda antes.

No extremo oposto estão as tecnologias em estágio avançado de desenvolvimento no mundo, adequadas a grandes plantas termelétricas e que requerem grandes investimentos – caso das plantas supercríticas e ultracríticas (T3a). O investimento em pesquisas e desenvolvimento só se justifica num quadro de comercialização em larga escala dessas tecnologias, como no caso de grandes empresas transnacionais. Cabe ao Brasil desenvolver pesquisas, em parceria com grupos de pesquisa ou com essas empresas, para adaptação da tecnologia às características do carvão nacional, ou misturas de carvão (*blending*), e na superação dos gargalos tecnológicos, criados pelas particulares condições exigidas, em relação à resistência e durabilidade de materiais. Deve-se investir em pesquisa e na regulamentação dos empreendimentos para que as plantas que vierem a ser construídas no Brasil tenham um bom nível de nacionalização de materiais e mão de obra, com a consequente geração de empregos e desenvolvimento da indústria metal-mecânica. No mapa tecnológico revela-se a possibilidade de que as plantas supercríticas estejam, em poucos anos, em fase piloto e demonstração, no que se refere à sua adaptabilidade às características dos carvões ou misturas disponíveis. Acredita-se que possam passar rapidamente à etapa de implantação, para estarem em produção comercial em 2022. É importante ressaltar que o ganho em eficiência proporcionado pela elevação da pressão e temperatura na caldeira pode viabilizar a adoção de dispositivos de separação de CO₂ pós-combustão, compensando a significativa penalidade energética que eles representam.

Há necessidade de estudos para verificar a possibilidade, técnica e econômica, da inclusão das condições capture ready em novos empreendimentos, o que pode viabilizar o licenciamento ambiental pela redução das exigências imediatas em favor da predisposição da planta para incluir, quando estiverem comercialmente disponíveis, os dispositivos para controle dos gases de efeito estufa. A rota tecnológica indicada no mapa da Figura 2.20 (T3c) refere-se à evolução dos



estudos (fases piloto e demonstração) para a definição adequada dos itens necessários e dos critérios para estabelecer a condição.

O item 'Gaseificadores para IGCC e poligeração' (T3d1), propõe o desenvolvimento de tecnologia nacional de gaseificadores. Já existem plantas em fase piloto em implantação no Brasil, além de significativo interesse de grupos de pesquisa em desenvolver trabalhos sobre este tema. Em vista disto, a evolução desta tecnologia segue, no mapa tecnológico, uma rota relativamente acelerada, com previsão de que haja gaseificadores em estágio comercial logo após o horizonte de 2022. Não se exclui, no entanto, a possibilidade de ter-se gaseificadores de menor porte, para usos outros que não IGCC, antes deste prazo. No entanto, como já mencionado, o assunto é amplo e cabe uma articulação dos diversos grupos de pesquisa e demais atores no sentido de traçar um roteiro de prioridades e colaborações, buscando-se evitar a diluição de recursos.

O item (T3d2), 'gaseificação *in situ*', está, no mapa tecnológico, em uma rota de média elevação, ou seja, considera-se que o desenvolvimento da tecnologia será relativamente lento. Além disto, ainda não foi atingido o estágio de pesquisa aplicada. Isto se deve principalmente à ainda grande disponibilidade de reservas de carvão de fácil mineração. No entanto, o potencial da tecnologia para exploração de depósitos não recuperáveis por outros métodos e, especialmente, a criação de depósitos geológicos de CO₂ proporcionada pela UCG (RODDY e YOUNGER, 2010) devem ser levados em conta para o estímulo às pesquisas nesta rota.

O item 'Captura de CO₂ pré-combustão' (T3e1), é aplicável somente ao processo de gaseificação com oxigênio, que se destaca entre as possibilidades de gaseificação propostas no item (T3d1), 'gaseificadores para IGCC e poligeração'. Portanto, o desenvolvimento das tecnologias de captura deverá seguir uma rota paralela à do item (T3d1), embora com alguma defasagem, em função de estar, de início, em um estágio mais atrasado. Não se supõe, neste item, o desenvolvimento de todas as etapas da tecnologia, como também não se prevê o desenvolvimento de todo o processo IGCC. No entanto, há uma possibilidade concreta de pesquisas para o desenvolvimento de processos e produtos para separação de gases, em sinergia com o proposto no item seguinte (T3e2).

A captura de CO₂ pós-combustão (T3e2), por sua aplicabilidade a diversos processos, é um item tecnológico atraente e deve ser incentivado. À medida que plantas mais eficientes forem instaladas no Brasil – o que se espera que aconteça – conforme a rota (T3a), os sistemas de separação passarão a ser viáveis. Além disto, é muito provável que a pressão para redução das emissões



aumente nos próximos anos. Dos vários processos disponíveis, alguns estão em estágio inicial de desenvolvimento e, como já existem grupos de pesquisa no Brasil desenvolvendo trabalhos neste sentido, pode-se supor que a evolução seja paralela, embora com algum atraso, à rota do item (T3a).

A oxidação (T3e3), embora seja uma tecnologia em desenvolvimento no mundo, não deverá ser uma rota preferencial no Brasil, devido às características do carvão nacional e às melhores oportunidades oferecidas por outras tecnologias. O seu posicionamento na região inferior direita do mapa indica que seu desenvolvimento no Brasil (adaptação às características do carvão) poderá ocorrer, mas será bem mais tarde e quando a viabilidade econômica de separação de CO_2 proporcionada por esta tecnologia estiver estabelecida. A oxidação está sendo estudada como uma forma de fazer retrofit de plantas a carvão pulverizado, incorporando a separação do CO_2 . Neste sentido, talvez haja uma possibilidade de desenvolvimento antecipado, com o processo sendo implantado diretamente nas plantas existentes.

A captura de CO_2 por biofixação, (T3e4), que, no caso de algas, já inicia em fase piloto (MORAIS e COSTA, 2007), deverá ter um crescimento acentuado, prevendo-se que, com o devido incentivo, esteja em fase de comercialização um pouco após o horizonte de 2022.

2.3.4 – Pontos de atenção e necessidades de ações de suporte

Para se chegar aos posicionamentos estratégicos pretendidos em relação a cada um dos tópicos associados ao desafio abordado, no período de 2012 a 2035, identificam-se vários gargalos que precisam ser superados, mas também inúmeras oportunidades estratégicas para o país.

Como pode ser observado na Figura 2.21, apontam-se no próprio mapa tecnológico os pontos de atenção que indicam a necessidade de ações de suporte relacionadas aos respectivos gargalos e ao aproveitamento de oportunidades estratégicas identificadas ao longo do processo de construção do mapa.

É necessária uma ênfase especial ao aspecto de formação de recursos humanos. Há, indubitavelmente, uma insuficiência qualitativa e quantitativa na formação de engenheiros e técnicos no Brasil, em todos os setores e em todos os níveis. Este assunto já foi tratado, em minúcias, no documento Inova Engenharia (INSTITUTO EUVALDO LODI, 2006). Em se tratando do setor carbonífero, em todos os seus aspectos, o problema parece ser ainda mais pronunciado.



Este fato, possivelmente se deve, além da sinalização negativa que o setor vem recebendo nos últimos anos (falta de novos investimentos, não sinalização da entrada de novas térmicas a carvão, com exceção das já licitadas, até 2020, etc.), também ao estigma do carvão como tecnologia poluidora e responsável pelo aquecimento global. Portanto, a ênfase na formação de recursos humanos como suporte ao desenvolvimento das trajetórias propostas não se restringe a uma tecnologia ou etapa, mas deve ser geral e continuada. Por isto a marcação laranja, relativa a recursos humanos, foi colocada no próprio espaço relativo ao estágio de desenvolvimento.

Quanto ao aspecto Infraestrutura, é fato que existem poucos laboratórios de desenvolvimento e de prestação de serviços. A criação, ampliação e modernização de laboratórios é, junto com a formação de mão-de-obra, o aspecto estratégico mais urgente para a realização das metas propostas. Além disto, há uma carência generalizada de unidades de bancada, piloto e demonstração nas diversas tecnologias preconizadas neste roadmap. Dispositivos de bancada geralmente têm como objetivo o estudo aprofundado de aspectos parciais do processo maior e têm operação e manuseio mais fácil. São elementos fundamentais na formação de recursos humanos em pesquisa. Já plantas piloto e demonstração envolvem em geral todos os aspectos do processo ou de uma etapa do mesmo. Sua operação e manuseio são mais complexos, envolvendo também problemas logísticos, de mão de obra e segurança. Por isto recomenda-se que projetos deste tipo sejam realizados em rede.

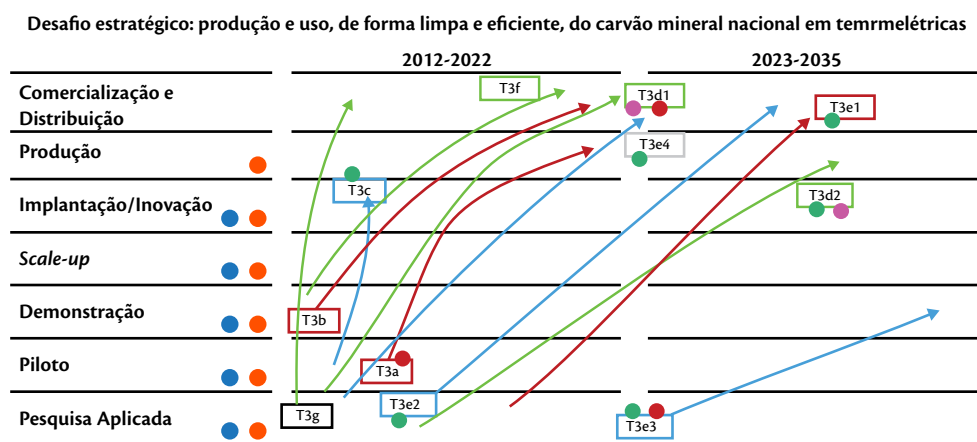


Figura 2.21 – Pontos de atenção para ações de suporte ao desenvolvimento das trajetórias associadas ao desafio: 2012-2035.

Notação: T3a - Plantas supercríticas de carvão pulverizado e leito fluidizado circulante; T3b - Plantas de leito fluidizado borbulhante subcrítica multicomcombustível; T3c - Estudo de condições para captura



de CO₂ em novas plantas a carvão; T3d1 - Gaseificadores para IGCC e poligeração; T3d2 - Gaseificação in situ para IGCC e poligeração; T3e1 - Captura de CO₂ (pré-combustão); T3e2 - Captura de CO₂ (pós-combustão); T3e3 - Captura de CO₂ (oxicombustão); T3e4 - Captura de CO₂ (biofixação); T3f - Cofiring; T3g - Aproveitamento de coprodutos da combustão.

Convenção de cores: recursos humanos (cor laranja); infraestrutura física (cor azul); investimentos (cor rosa); aspectos regulatórios (cor verde); e aspectos mercadológicos (cor vermelha).

Os aspectos regulatórios impactam fortemente todos os processos de captura de CO₂. As exigências quanto aos índices de emissões balizarão o desenvolvimento das tecnologias em todas as etapas. Além disso, em vista do que ocorre no mundo, já se pode antecipar que haverá restrições quanto às condições de armazenamento do CO₂, o que deverá gerar regulamentação específica. A melhor solução parece ser o aproveitamento do CO₂ em recuperação avançada de petróleo (enhanced oil recovery - EOR) ou metano (enhanced coal bed methane - ECBM), mas as viabilidades econômicas ainda não estão completamente estabelecidas.

Com respeito à gaseificação in situ (T3d2), os aspectos regulatórios ambientais poderão ter um efeito positivo, pois há alteração mínima da superfície e também os resíduos são minimizados, favorecendo esta tecnologia em relação à exploração convencional.

Ainda quanto a aspectos regulatórios, é necessário que se busque, nos leilões e nas regras de financiamento, o posicionamento do setor e a apresentação de tecnologias competitivas que permitam buscar a isonomia entre o carvão e as demais fontes primárias de energia, respeitando os critérios ambientais. Sem isto, os investimentos no setor ficam prejudicados, com o conseqüente desestímulo do setor de PD&I. Como resultado, o Brasil perderá a oportunidade de desenvolver expertise em tecnologias de carvão limpo e de ter uma posição de destaque mundial em pesquisa neste setor, compatível com sua posição de país com matriz elétrica “verde”.

Investimentos são necessários em todas as etapas e em todos os tópicos propostos. Um aspecto fundamental dos investimentos, em se tratando de PD&I, é a sua continuidade, ou seja, uma vez definidas as tecnologias a desenvolver, deverá buscar-se a manutenção de um aporte mínimo de apoio financeiro, para que não haja o risco de perda do avanço realizado e do interesse das partes envolvidas, além de dispersão dos recursos humanos reunidos e treinados para o objetivo proposto.

Especial atenção deve ser dada ao tópico ‘Gaseificadores para IGCC e Poligeração’ (T3d1) e ao tópico relacionado ‘Captura de CO₂ pré-combustão’ (T3e1), pois são rotas tecnológicas com gran-



de potencial de adaptação ao carvão nacional e aplicabilidade a outras linhas deste roadmap. Os investimentos deverão ser direcionados ao desenvolvimento de gaseificadores adequados para o carvão nacional e de tecnologias para separação de gases nas condições de uma planta termelétrica, tanto para produção de O_2 como para separação de CO_2 , além de armazenamento geológico de CO_2 .

Os aspectos de mercado deverão se fazer sentir intensamente nas tecnologias que demandam grandes investimentos, como 'Plantas supercríticas de carvão pulverizado e leito fluidizado circulante', item (T3a), pois o investidor só irá aplicar se tiver alguma garantia de retorno.

Quanto ao desenvolvimento de gaseificadores, é importante viabilizar tecnologias adequadas ao carvão nacional, inclusive buscando, no exterior, soluções tecnológicas que possam alavancar, no curto prazo, via transferência de tecnologia e formação de recursos humanos o desenvolvimento desta indústria no Brasil, face à demanda atualmente existente de gás, especialmente no sul do Brasil. Deve-se buscar a fabricação destes equipamentos no Brasil e ao mesmo tempo desenvolver gaseificadores adequados ao carvão nacional com tecnologia nacional. Essas ações darão o impulso de curto e médio prazo para o desenvolvimento da indústria metal-mecânica brasileira. Essa política deve incorporar ações tais como estabelecimento de índices de nacionalização para o financiamento de projetos no setor.

2.3.5 – Portfólio estratégico de PD&I

A Figura 2.22 representa o portfólio estratégico de PD&I relacionado à produção e ao uso, de forma limpa e eficiente do carvão mineral na geração termelétrica, no período de 2012 a 2035. Para a construção do portfólio, os tópicos associados a esse desafio foram classificados segundo dois critérios: 1) sustentabilidade, calculada em função do impacto econômico e socioambiental das aplicações potenciais do tópico; e, 2) grau de esforço requerido para atingir o posicionamento desenhado no mapa tecnológico.

A partir da visão conjunta do mapa tecnológico, com os pontos de atenção, e do portfólio estratégico de PD&I, identificam-se diversas oportunidades e gargalos, conforme discutido a seguir.

A Figura 2.22 mostra que as oportunidades mais promissoras, numa visão de mais longo prazo, situam-se no quadrante superior direito e referem-se a 'apostas' a serem priorizadas. São elas: 'gaseificadores para IGCC e poligeração' (T3d1); 'gaseificação *in situ* para IGCC e poligeração'



(T3d2); 'captura de CO₂ (pré-combustão)' (T3e1); 'captura de CO₂ (pós-combustão)' (T3e2) e 'captura de CO₂ (oxicombustão)' (T3e3).

A gaseificação é um processo que, além de se adaptar às características do carvão nacional, é, por assim dizer, polivalente, pois o gás gerado pode ser utilizado para energia elétrica (IGCC), carboquímica e siderurgia, além da poligeração, em que se otimiza a combinação de vários processos a partir da gaseificação. Por isto os itens 'gaseificadores para IGCC e poligeração' (T3d1) e 'gaseificação in situ para IGCC e poligeração' (T3d2) são considerados de alta sustentabilidade. No entanto, o desenvolvimento de tecnologia nacional para a gaseificação dependerá de fortes investimentos em capacitação de recursos humanos, infraestrutura laboratorial e plantas-piloto e demonstração, justificando o posicionamento dos referidos itens como "apostas" para o Brasil.

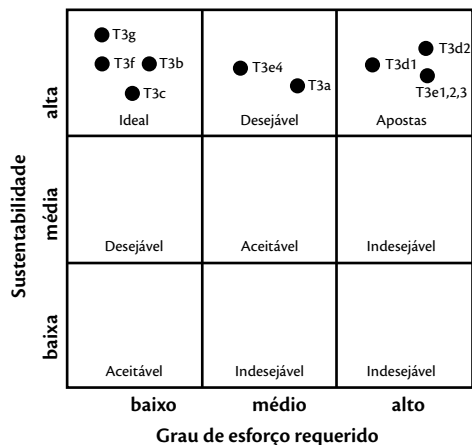


Figura 2.22 – Portfolio estratégico de PD&I referente à produção e uso, de forma limpa e eficiente do carvão mineral em termelétricas: 2012-2035.

Notação: T3a - Plantas supercríticas de carvão pulverizado e leito fluidizado circulante; T3b - Plantas de leito fluidizado borbulhante subcríticas multicombustível; T3c - Estudo de condições para captura de CO₂ em novas plantas a carvão; T3d1 - Gaseificadores para IGCC e poligeração; T3d2 - Gaseificação in situ para IGCC e poligeração; T3e1 - Captura de CO₂ (pré-combustão); T3e2 - Captura de CO₂ (pós-combustão); T3e3 - Captura de CO₂ (oxicombustão); T3e4 - Captura de CO₂ (biofixação); T3f - Cofiring; T3g - Aproveitamento de coprodutos da combustão.

A importância dos aspectos ambientais é inegável, e deverá haver exigências cada vez mais estritas neste sentido nos licenciamentos de novos empreendimentos. Portanto, o desenvolvi-



mento de processos eficientes e economicamente viáveis de separação de gases e, em especial, separação e armazenagem de CO₂, será imprescindível para a sustentabilidade futura da geração termelétrica e de toda a cadeia produtiva, incluindo a lavra e o beneficiamento do carvão. Os itens 'captura de CO₂ (pré-combustão)' (T3e1); 'captura de CO₂ (pós-combustão)' (T3e2) e 'captura de CO₂ (oxicombustão)' (T3e3) são considerados "apostas", pois tem aplicações distintas nos vários processos de conversão energética do carvão e também em outros processos industriais, sendo estrategicamente interessante investir no domínio destas tecnologias.

Já os tópicos 'plantas leito fluidizado borbulhante subcrítica multicomcombustível' (T3b); 'co-firing' (T3f); e 'aproveitamento de coprodutos da combustão' (T3g); encontram-se em situação "ideal" no portfólio, ou seja, com pouco esforço poderá se chegar a resultados de PD&I com alta sustentabilidade. Esses deveriam ser foco de atenção já no curto prazo, pois não exigirão altos investimentos em infraestrutura e capacitação de recursos humanos. Já há pesquisas e plantas de demonstração nos itens (T3b) e (T3f) e o aproveitamento de coprodutos da combustão, na construção civil, já se faz em larga escala, restando a desenvolver a opção por aproveitamentos com alto valor agregado, para os quais as pesquisas são ainda incipientes. Tanto as zeólitas derivadas da cinza como a possibilidade de recuperação de metais para semicondutores são tópicos que, se desenvolvidos, poderão trazer muitas oportunidades de negócios e colocarão o Brasil em ótima posição no ranking da pesquisa internacional.

Também 'Estudo de condições para captura de CO₂ em novas plantas a carvão' (T3c) encontra-se na situação 'ideal' pois o esforço requerido é mínimo, tratando-se apenas de realizar estudos para determinar os critérios que definem uma planta *capture ready* e sua viabilidade técnica e econômica.

Dois são os tópicos que se encontram em posição "desejável" no portfólio estratégico de PD&I: 'plantas supercríticas de carvão pulverizado e leito fluidizado circulante' (T3a) e 'captura de CO₂ (biofixação)' (T3e4).

Para que se tenha plantas termelétricas com maior rendimento, que atendam à condição de menos emissões de CO₂ por unidade de energia gerada, a tecnologia disponível comercialmente e que pode se adaptar ao carvão nacional é a de plantas de carvão operando em um ciclo térmico supercrítico. Os gargalos que ainda existem e apresentam oportunidades de investimento em P&D são os relativos à adaptação dos carvões nacionais e misturas com carvões importados (*blendagem*) e ao desenvolvimento de materiais resistentes às condições físicas do



processo. Com exigências bem definidas, quanto aos índices de nacionalização exigidos nas licitações e concessão de financiamento, haverá também ótimas oportunidades para a indústria metal-mecânica. É importante estudar a integração destas plantas supercríticas com o sistema hidro/eólico/térmico do Brasil.

Na 'captura de CO₂ por biofixação' (T3e4) a tecnologia mais promissora é a captura por micro algas, que já está em estágio de plantas piloto. Há, ainda, a necessidade de investimentos em pesquisa para o domínio completo dos parâmetros do processo, bem como de otimização do mesmo, para torná-lo comercialmente viável. Entre os diversos produtos obtidos, o biodiesel, de alto valor agregado, fornece alta sustentabilidade do processo também do ponto de vista econômico.

2.3.6 – Considerações finais sobre a geração termelétrica

A geração termelétrica é fator de estabilidade e segurança do sistema elétrico e deve representar uma parcela significativa da matriz elétrica nacional, com o emprego das grandes reservas de carvão disponíveis. Além disto, a geração termelétrica a carvão é indutora fundamental para que seja viável produzir carvão para atender à siderurgia no Brasil.

Os índices de emissões de gases de efeito estufa associados ao carvão devem ser substancialmente reduzidos mediante a adoção de tecnologias de carvão limpo (CCT). Deve-se investir em desenvolvimento de tecnologias de captura de CO₂ para aplicação em médio prazo, tanto ao parque termelétrico nacional como a demais setores com altos índices de emissões, como siderurgia, petroquímica e cimenteiras.

O desenvolvimento industrial e tecnológico que pode ser obtido com o esforço para dominar e implantar estas tecnologias irá beneficiar todos os setores da sociedade, com ampliação da base de conhecimentos tecnológicos do país e geração de empregos e riquezas.

As principais tecnologias apontadas para o maior e melhor aproveitamento do carvão nacional em termelétricas são:

- Plantas supercríticas e ultrasupercríticas.
- Plantas de ciclo combinado integrado à gaseificação – IGCC.



- Captura de CO₂.
- Aproveitamento de coprodutos.

Para a implantação dessas tecnologias, recomenda-se que os seguintes tópicos associados sejam priorizados nas pesquisas:

- Desenvolvimento de materiais e equipamentos resistentes às condições supercríticas.
- Desenvolvimento de gaseificadores adaptados às características dos carvões nacionais.
- Desenvolvimento de técnicas de separação de gases.
- Desenvolvimento de produtos de alto valor agregado a partir das cinzas.

Outros tópicos importantes na minimização de impactos ambientais são:

- Desenvolvimento das pesquisas de gaseificação *in situ*.
- Plantas multicompostível e *cofiring*.

Para atingir as metas que levarão à produção e uso, de forma limpa e eficiente, do carvão mineral em termelétricas, as principais recomendações são:

- Formação de recursos humanos especializados em todos os níveis.
- Criação, ampliação e modernização de laboratórios de pesquisa e prestação de serviços.
- Investimento em plantas de bancada, piloto e demonstração, operadas em rede ou em parceria entre indústrias e laboratórios de pesquisa.
- Regulamentação dos licenciamentos de novas plantas quanto aos níveis de emissões e índices de nacionalização.
- Regulamentação das condições de armazenamento de CO₂ e de gaseificação *in situ*, para amparar pesquisas e investimentos.
- Busca de isonomia entre as fontes de energia nos leilões e nas regras de financiamento, respeitando critérios ambientais.
- Garantia de fluxo contínuo de recursos para projetos em andamento (projetos estruturantes, projetos encubados, etc).
- Estudos de integração entre a operação das plantas térmicas e o sistema renovável .



2.4 – Cooperações internacionais

Visando acelerar o desenvolvimento tecnológico nacional, podem ser firmadas parcerias internacionais e direcionamento de estudantes do programa Ciência Sem Fronteiras para países de referência em pesquisas relacionadas à carboquímica, siderurgia e geração termelétrica. A tabela 2.10 apresenta sugestão de países e instituições que podem ser contatadas para tal.

Tabela 2.10 – Sugestão de países e instituições de referência em pesquisas relacionadas à carboquímica, siderurgia e geração termelétrica, para possibilidade de cooperação internacional.

País /Instituição	Aplicação
Alemanha - Universidades Técnicas de Julich (e Forschungszentrum Julich), Freiberg e Stuttgart (Institute of Combustion Technology), Instituto Max Planck para Pesquisa do Carvão (Max Planck Institute für Kohlenforschung)	Carboquímica, termelétricas e siderurgia
Alemanha – Universidade Técnica de Aachen	Beneficiamento de carvão e siderurgia
Alemanha – Universidade Técnica de Berlin	Coqueificação
Austrália – Universidade de New South Wales, Queensland	Termelétricas e siderurgia
China	Termelétricas e carboquímica
Espanha - Instituto Nacional del Carbon, Oviedo	Carboquímica, termelétricas e siderurgia
Estados Unidos - Universidade de Pittsburgh - Escola de Engenharia Swanson (Swanson School of Engineering)	Carboquímica
França - Ecole Centrale Paris	Biomassa e coqueificação
Índia	Carboquímica
Inglaterra - Universidade de Nottingham	Carboquímica, termelétricas e siderurgia (concentrou os estudos de carvão do Reino Unido)
Itália	Carboquímica
Polônia – Central Mining Institute, Katowice	Termelétricas e siderurgia.
Polônia – Silesian Technical University, Gliwice.	Termelétricas e siderurgia.
Reino Unido – Universidades Leeds, Nottingham, Cambridge	Termelétricas



CAPÍTULO 3

AÇÕES NECESSÁRIAS PARA PROPICIAR UM AMBIENTE FAVORÁVEL AO MAIOR USO DO CARVÃO MINERAL NACIONAL

Neste capítulo, consolida-se o “*Roadmap* tecnológico da produção, uso limpo e eficiente do carvão mineral nacional: 2022 e 2035”, segundo uma visão estratégica. Integra-se a visão de futuro preconizada nos mapas tecnológicos e portfólios estratégicos de PD&I – associados aos três desafios estratégicos – a um conjunto de ações de suporte para materialização das trajetórias preconizadas nos referidos mapas.

A visão conjunta dos mapas tecnológicos, marcados com os pontos de atenção, e dos portfólios estratégicos de PD&I, apresentados no capítulo anterior, permitiu identificar diversas oportunidades de PD&I, e também gargalos e necessidades que foram alvo das ações apresentadas neste documento.

3.1 – Ambiente favorável ao maior uso do carvão mineral nacional

Espera-se que um ambiente favorável ao maior uso do carvão mineral nacional seja estabelecido, e que contenha, pelo menos, as características apresentadas a seguir.

Mercado:

- Ambiente favorável ao aproveitamento do carvão mineral para geração de energia elétrica, respeitando-se critérios técnico-ambientais.
- Aproveitamento ampliado de coprodutos da cadeia produtiva do carvão mineral nacional.
- Início da implantação de polo carboquímico.



- Consolidação do polo carboquímico.
- Opinião pública com percepção positiva do carvão mineral como insumo industrial e gerador de empregos.
- Impacto ambiental da cadeia produtiva do carvão mineral (incluindo lavra e beneficiamento) avaliado e comparado com outros insumos.

Recursos humanos:

- Conhecimento do cenário completo de recursos humanos nas áreas de aplicação do carvão mineral e das tecnologias limpas.
- Ampliação do número de alunos de escolas técnicas, de graduação e de pós-graduação interessados no carvão mineral.
- Fixação local dos recursos humanos desenvolvidos para não perdê-los para outras áreas.
- Ampliação do número de projetos de pesquisa que se tornem produtos comercializáveis, aumentando o depósito de patentes.
- Ampliação do número de mestres e doutores nas indústrias.
- Valores de bolsas de pós-graduação atrativos em relação ao mercado de trabalho, evitando a evasão de alunos dos programas de pós-graduação.
- Parcerias internacionais estabelecidas, com participação do Brasil como um dos líderes do conhecimento do setor.

Infraestrutura física:

- Novas jazidas identificadas e caracterizadas, e melhor conhecimento das existentes.
- Conhecimento do potencial dos carvões para uso limpo em carboquímica, gaseificação, combustão, siderurgia e CCT/CCS.
- Conhecimento do potencial das jazidas nacionais, sob a ótica CCT.
- Laboratórios para modelagem numérica e simulação dos processos químicos e para caracterização de concentrados para uso limpo na siderurgia, carboquímica e geração termelétrica.
- Áreas selecionadas e priorizadas para desenvolvimentos de projetos em escala piloto (CCS, UCG, CBM, ECBM, EOR).
- Infraestrutura para caracterização e monitoramento de sites em escala industrial e demonstrativa (CCS, UCG, CBM, ECBM, EOR).



- Unidades de bancada/piloto/demonstração implantadas para simulação dos processos de produção (lavra e beneficiamento), carboquímica, gaseificação, combustão, siderurgia e CCT/CCS.
- *Scale-up* de pilotos/protótipos e plantas de demonstração e comerciais em lavra, beneficiamento, carboquímica, gaseificação, combustão, siderurgia e CCT/CCS.
- Logística de distribuição para usos limpos de carvão (convencionais e tecnologias limpas) ampliada.
- Tecnologias limpas desenvolvidas com infraestrutura adequada para novos usos siderúrgicos, adequadas às características do carvão mineral nacional.
- Utilização industrial de tecnologias limpas, para novos usos siderúrgicos, adequadas às características do carvão mineral nacional.
- Processos de utilização do carvão mineral nacional desenvolvidos para uso em novas tecnologias de coqueificação, redução direta (carvão e gás) e processos de fusão-redutora (ênfase no TecnoRed).
- Utilização industrial do carvão mineral nacional para uso em pelotização de minério de ferro, coqueificação e na injeção em altos-fornos.
- Tecnologias de gestão para recuperação, monitoramento e controle ambiental desenvolvidas e adaptadas.
- Aplicação comercial das tecnologias de gestão para recuperação, monitoramento e controle ambiental desenvolvidas.
- Disponibilidade de um parque gerador de energia elétrica moderno a partir de carvão mineral.
- Parque gerador de energia elétrica limpo, eficiente e ampliado, com maior participação do carvão mineral.
- Viabilizar a modernização do atual parque termelétrico brasileiro.

Investimentos:

- A exemplo do Estado de Santa Catarina, a CFEM recolhida em função da exploração do carvão é aplicada nos próprios estados produtores, em projetos de CCT.
- BNDES fornecendo aos investimentos em carvão mineral as mesmas condições de financiamento disponibilizadas para as outras fontes de energia, considerando critérios ambientais.
- Os recursos recolhidos pelas termelétricas a carvão sejam utilizados em projetos estruturantes, evitando a solução de continuidade (fluxo ininterrupto de recurso). Os investimentos em



CCT que beneficiem outros setores (por exemplo, sequestro de carbono) recebam suporte financeiro também de outras empresas.

- Participação de empresas privadas nos investimentos de PD&I.
- Ambiente onde a empresa privada deseja investir em PD&I.
- Centros de pesquisa nacionais voltados ao CCT com custeio garantido, além de investimento articulados e financiados com a iniciativa privada.

Aspectos regulatórios:

- Ambiente favorável ao aproveitamento do carvão mineral para geração de energia elétrica, respeitando-se critérios técnico-ambientais.
- Eficiência energética das termelétricas de 40% a 45% com redução na geração de impactos/emissões.
- Impacto ambiental caracterizado baseado em parâmetros definidos.
- Legislação que regula a seleção de locais para desenvolvimentos em escala piloto de armazenamento geológico de CO₂.
- Protótipos para simulação dos processos de gaseificação de carvão incluindo eficiência térmica
- Plantas comerciais de gaseificação de carvão, competitivas e com controle de emissões.
- Setor carbonífero envolvido nas demandas do Fundo Nacional de Mudanças Climáticas.
- Criação de cursos para formação de RH (transversal) e ampliação do número de grupos de pesquisa dedicados ao tema de tecnologias limpas do setor carbonífero.
- Capacitação de pessoal e laboratorial.
- Criar um local institucional para o setor carbonífero dentro da estrutura do MME.
- Participação da indústria nacional com pelo menos 60% de equipamentos e serviços nos projetos de grande porte. Incentivo fiscal para importação de componentes específicos não produzidos pela indústria nacional.



3.2 – Ações a serem tomadas

Visando estabelecer esse ambiente favorável, são apresentadas a seguir as ações de suporte, segundo as cinco dimensões de análise e os dois horizontes temporais, endereçando-as aos atores que tornarão plausível a visão estratégica apresentada no presente *roadmap*.

3.2.1 – Aspectos de mercado

ASPECTOS REGULATÓRIOS – RE 01 / MERCADO – ME 01	
Situação atual	Carvão mineral não contemplado nos leilões de energia elétrica.
Ações visando modificar o cenário atual	Posicionar o setor e promover discussões a respeito do estabelecimento de critérios técnico-ambientais mínimos, que possibilitem a participação de termelétricas nos leilões de energia em isonomia com as demais fontes, vis-à-vis os ditames da política energética nacional.
Atores envolvidos	CNPE, MME e EPE
Situação a ser alcançada até 2022	Ambiente favorável ao aproveitamento do carvão mineral para geração de energia elétrica, respeitando-se critérios técnico-ambientais.
Ações visando melhorar o cenário alcançado em 2022	Posicionar a indústria do carvão de modo a permitir a manutenção da isonomia do carvão mineral nos leilões de energia elétrica via portarias ministeriais.
Atores envolvidos	CNPE, MME e EPE
Situação a ser alcançada até 2035	Manutenção do ambiente favorável ao aproveitamento do carvão mineral para a geração de energia elétrica, respeitando-se critérios técnico-ambientais.
MERCADO – ME 02	
Situação atual	Aproveitamento reduzido de coprodutos da cadeia produtiva do carvão mineral nacional.
Ações visando modificar o cenário atual	Investir em infraestrutura de PD&I para aproveitamento de coprodutos e sua inserção no mercado.
Atores envolvidos	CNPE, MME e EPE
Situação a ser alcançada até 2022	Aproveitamento ampliado de coprodutos da cadeia produtiva do carvão mineral nacional.



MERCADO – ME 03	
Situação atual	Inexistência de pólos carboquímicos, mas existência de produção de insumos oriundos de coquearias.
Ações visando modificar o cenário atual	Avaliar o perfil de mercado nacional e a viabilidade econômica dos produtos a partir de carvão. Identificar possíveis investidores interessados em investir na carboquímica. Criar incentivos fiscais temporários para a implantação inicial de empreendimentos na área da carboquímica.
Atores envolvidos	MDIC, BNDES, ABDI, empresas potencialmente interessadas, MF.
Situação a ser alcançada até 2022	Início da implantação de pólo carboquímico.
Ações visando melhorar o cenário alcançado em 2022	Avaliar a participação dos produtos carboquímicos no mercado e propor ações de ajuste..
Atores envolvidos	Indústria, universidades e centros de pesquisa.
Situação a ser alcançada até 2035	Consolidação do pólo carboquímico.
MERCADO – ME 04	
Situação atual	Percepção negativa do carvão como insumo em geral..
Ações visando modificar o cenário atual	Divulgar campanhas informativas das técnicas modernas de exploração e uso limpo e eficiente do carvão mineral.
Atores envolvidos	ABCM, ABDI, Rede Carvão Mineral.
Situação a ser alcançada até 2022	Opinião pública com percepção positiva do carvão mineral como insumo industrial.
Ações visando melhorar o cenário alcançado em 2022	Continuar com ações de comunicação dirigidas para a percepção positiva como insumo industrial, com foco em realizações bem sucedidas no Brasil de produção, lavra, beneficiamento, uso eficiente e limpo do carvão mineral nacional.
Atores envolvidos	Indústria, universidades, centros tecnológicos, MME, MMA, MCTI e fundações estaduais de amparo a pesquisa
Situação a ser alcançada até 2035	Opinião pública com percepção positiva do carvão mineral como insumo industrial.



MERCADO – ME 05	
Situação atual	Poucos estudos nacionais relativos aos impactos ambientais da cadeia produtiva do carvão mineral a partir de tecnologias limpas.
Ações visando modificar o cenário atual	Realizar o estudo com a participação dos agentes interessados.
Atores envolvidos	ABCM, ABDI, MMA, Cetem, Ibama, Ministério Público, Rede Carvão Mineral, SATC.
Situação a ser alcançada até 2022	Impacto ambiental da cadeia produtiva do carvão mineral (incluindo lavra e beneficiamento) avaliado e comparado com outros insumos.



3.2.2 – Recursos humanos

RECURSOS HUMANOS – RH 01	
Situação atual	Desconhecimento da necessidade atual de capacitação dos recursos humanos atuantes na área no tema de tecnologias limpas do carvão.
Ações visando modificar o cenário atual	Estabelecer programa de visita de alunos de ensino médio e de engenharia nas instalações e universidades (vide práticas ABM). Criar concursos de trabalhos de iniciação científica, monografias, dissertações e teses de interesse na área carbonífera. Replicar programas de bolsas de estudo do MEC, CNPq, FAPs e instituições de ensino em parceria com a Rede Carvão Mineral.
Atores envolvidos	Associações de classe, Rede Carvão Mineral.
Situação a ser alcançada até 2022	Conhecimento do cenário completo de recursos humanos nas áreas de aplicação do carvão mineral e das tecnologias limpas.



RECURSOS HUMANOS – RH 02	
Situação atual	Desinteresse de alunos de escolas técnicas, de graduação e pós-graduação pelas áreas de conhecimento relativas ao carvão mineral.
Ações visando modificar o cenário atual	Avaliar o perfil de mercado nacional e a viabilidade econômica dos produtos a partir de carvão. Identificar possíveis investidores interessados em investir na carboquímica. Criar incentivos fiscais temporários para a implantação inicial de empreendimentos na área da carboquímica.
Atores envolvidos	ABCM (modelo ABM), MEC, CNPq, FAPs, instituições de ensino, Rede Carvão Mineral.





Situação a ser alcançada até 2022	Ampliação do número de alunos de escolas técnicas, de graduação e de pós-graduação interessados no carvão mineral.
Ações visando melhorar o cenário alcançado em 2022	Criar uma rede de laboratórios nacionais para fixação dos recursos humanos formados.
Atores envolvidos	ANEEL, MCTI (CNPq, Finep), Empresas do setor de carvão mineral, Capes, FAPs.
Situação a ser alcançada até 2035	Fixação local dos recursos humanos desenvolvidos para não perdê-los para outras áreas.



RECURSOS HUMANOS – RH 03

Situação atual	Baixa integração empresa/academia, gerando desconhecimento das áreas carentes de recursos humanos e a não fixação desses recursos ao longo do processo.
Ações visando modificar o cenário atual	<p>Alinhar as demandas de empresas com o desenvolvimento acadêmico.</p> <p>Criar projetos estruturantes de médio e longo prazo envolvendo empresas, centros de pesquisa e universidades nacionais e internacionais.</p> <p>Modificar os critérios de pontuação acadêmica e incentivar o corpo docente das instituições de ensino para realizarem consultoria no setor produtivo.</p> <p>Criar laboratórios regionais compondo a rede da EMBRAPPII e SIBRATEC para desenvolvimento de pesquisa aplicada de médio e longo prazos em conjunto com as empresas.</p>
Atores envolvidos	Instituições de pesquisa, Rede Carvão Mineral, associações de empresas, Aneel.
Situação a ser alcançada até 2022	Ampliação do número de projetos de pesquisa que se tornem produtos comercializáveis, aumentando o depósito de patentes.



RECURSOS HUMANOS – RH 04

Situação atual	Deficiências na política de PD&I das empresas
Ações visando modificar o cenário atual	Aumentar a eficiência da política de PD&I das empresas, criando mecanismos para premiação de funcionários que realizam melhorias e otimizações em produtos e processos industriais carboníferos, assim como especialização, mestrado e doutorado.
Atores envolvidos	MDIC, BNDES, ABDI, empresas potencialmente interessadas, MF.
Estimular a participação no RHAE e PNPD.	Ampliação do número de mestres e doutores nas indústrias.





RECURSOS HUMANOS – RH 05	
Situação atual	Valor das bolsas de pós-graduação não competitivos com o mercado de trabalho.
Ações visando modificar o cenário atual	Adequar os valores das bolsas de pós-graduação não competitivos com contrapartidas da indústria em projetos de interesse do setor.
Atores envolvidos	Capes, CNPq, FAPs, Setor industrial.
Situação a ser alcançada até 2022	Valores de bolsas de pós-graduação atrativos em relação ao mercado de trabalho, evitando a evasão de alunos dos programas de pós-graduação.



RECURSOS HUMANOS – RH 06	
Situação atual	Poucas parcerias internacionais estabelecidas com instituições de pesquisa nacionais.
Ações visando modificar o cenário atual	Estabelecer iniciativas de ampliação de parcerias internacionais com instituições de pesquisa nacionais.
Atores envolvidos	Universidades nacionais e estrangeiras, centros tecnológicos, MCTI, Capes, BNDES, FAPs.
Situação a ser alcançada até 2022	Parcerias internacionais estabelecidas, com participação do Brasil como um dos líderes do conhecimento do setor.



3.2.3 – Infraestrutura física

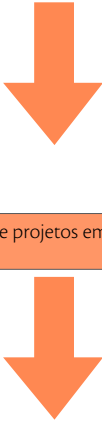
INFRAESTRUTURA FÍSICA – IF 01	
Situação atual	Infraestrutura insuficiente para prospecção geológica (conhecimento restrito das jazidas nacionais).
Ações visando modificar o cenário atual	Criar condições para a modernização de equipamentos, em instituições públicas e privadas, para prospecção geológica e caracterização tecnológica.
Atores envolvidos	Buscar o desenvolvimento e a aquisição de equipamentos para sondagens direcionais. CPRM, Rede Carvão Mineral, empresas, MME, Petrobras.
Situação a ser alcançada até 2022	Início da implantação de pólo carboquímico.
Ações visando melhorar o cenário alcançado em 2022	Criar condições para a modernização de equipamentos para prospecção geológica em instituições públicas e privadas.
Atores envolvidos	Centros de pesquisa da área. CPRM, MME/SGM.
Situação a ser alcançada até 2035	Conhecimento do potencial das jazidas nacionais, sob a ótica CCT.





INFRAESTRUTURA FÍSICA – IF 02	
Situação atual	Poucos centros com laboratórios para modelagem numérica, simulação dos processos físico-químicos e caracterização de concentrados para uso na siderurgia, carboquímica e geração termelétrica..
Ações visando modificar o cenário atual	Desenvolver sistemas e equipar e aumentar o número de laboratórios para modelagem numérica e simulação dos processos físico- químicos e para caracterização de concentrados para uso limpo na siderurgia, carboquímica, geração termelétrica.
Atores envolvidos	MCTI (fundos setoriais), Petrobras, Rede Carvão Mineral, Finep.
Situação a ser alcançada até 2022	Laboratórios para modelagem numérica e simulação dos processos químicos e para caracterização de concentrados para uso limpo na siderurgia, carboquímica e geração termelétrica.

INFRAESTRUTURA FÍSICA – IF 03	
Situação atual	Falta mapeamento e seleção de áreas para desenvolvimentos de projetos em escala piloto(CCS, UCG, CBM, ECBM, EOR).
Ações visando modificar o cenário atual	Criar condições para o investimento no desenvolvimento e aquisição de equipamentos de geofísica de detalhe, caracterização hidrogeológica, rochas selo e monitoramento ambiental. Estimular o fortalecimento de empresas e instituições de PD&I de prestação de serviços em geofísica de detalhes..
Atores envolvidos	Petrobras, CPRM, DNPM, Rede Carvão Mineral, empresas do setor carbonífero.
Situação a ser alcançada até 2022	Áreas selecionadas e priorizadas para desenvolvimentos de projetos em escala piloto (CCS, UCG, CBM, ECBM, EOR).
Ações visando melhorar o cenário alcançado em 2022	Consolidar equipamentos e metodologias de integração de sistemas.
Atores envolvidos	Centros de pesquisa da área, CPRM, MME/SGM.
Situação a ser alcançada até 2035	Infraestrutura para caracterização e monitoramento de sites em escala industrial e demonstrativa (CCS, UCG, CBM, ECBM, EOR).





INFRAESTRUTURA FÍSICA – IF 04	
Situação atual	Falta de unidades de bancada/piloto/demonstração para tecnologias de produção (lavra e beneficiamento), carboquímica, gaseificação, combustão, siderurgia e CCT/CCS. Inexistência de equipamentos e processos adequados para a produção e uso limpo do carvão mineral nacional.
Ações visando modificar o cenário atual	<p>Criar condições para o investimento em unidades de bancada/piloto/demonstração para tecnologias de produção (lavra e beneficiamento) de carboquímica, gaseificação, combustão, siderurgia e CCT/CCS.</p> <p>Criar condições para o investimento em logística para viabilização de produção (lavra e beneficiamento) e uso limpos de produtos e coprodutos nas várias rotas químicas.</p> <p>Buscar o estabelecimento de consórcios e parcerias de instituições e centros de pesquisa com empresas (produtoras, usuárias e fornecedoras de produtos, equipamentos e serviços).</p> <p>Estimular a criação de núcleos para promoção de transferência de tecnologia em instituições de pesquisa e empresas.</p>
Atores envolvidos	MCTI (fundos setoriais), Petrobras, Rede Carvão Mineral, ABCM, empresas do setor carbonífero, MMA, CNPq, MME, MDIC, EPE, Aneel.
Situação a ser alcançada até 2022	Unidades de bancada/piloto/demonstração implantadas para simulação dos processos de produção (lavra e beneficiamento), carboquímica, gaseificação, combustão, siderurgia e CCT/CCS.
Ações visando melhorar o cenário alcançado em 2022	Criar condições para investimento em scale-up de pilotos/protótipos e plantas de demonstração e comerciais em lavra, beneficiamento, carboquímica, gaseificação, combustão, siderurgia e CCT/CCS.
Atores envolvidos	Indústrias, Universidades, centros tecnológicos. MCTI, CAPES, BNDES, FAPs.
Situação a ser alcançada até 2035	Scale-up de pilotos/protótipos e plantas de demonstração e comerciais em lavra, beneficiamento, carboquímica, gaseificação, combustão, siderurgia e CCT/CCS.



INFRAESTRUTURA FÍSICA – IF 05	
Situação atual	Logística de distribuição insuficiente para a ampliação das atividades relacionadas ao uso do carvão.
Ações visando modificar o cenário atual	Criar condições para investimento na ampliação da logística e da rede de distribuição (portos, rodovias, ferrovias, gasodutos, etc)
Atores envolvidos	MDIC, MME, Ministério dos Transportes, ANTF, ANTT, Ministério do Planejamento, MMA, Secretaria de Portos, DNIT, Valec.
Situação a ser alcançada até 2022	Logística de distribuição para usos limpos de carvão (convencionais e tecnologias limpas) ampliada.



INFRAESTRUTURA FÍSICA – IF 06	
Situação atual	Falta infraestrutura adequada para o desenvolvimento de tecnologias limpas para novos usos siderúrgicos, adequadas às características do carvão mineral nacional.
Ações visando modificar o cenário atual	Buscar investimentos em infraestrutura de PD&I adequada para o desenvolvimento de tecnologias limpas para novos usos siderúrgicos, considerando as características do carvão mineral nacional.
Atores envolvidos	ABM, Rede Carvão Mineral, MDIC, MME, IABR, ABCM.
Situação a ser alcançada até 2022	Tecnologias limpas desenvolvidas com infraestrutura adequada para novos usos siderúrgicos, adequadas às características do carvão mineral nacional.
Ações visando melhorar o cenário alcançado em 2022	Buscar investimentos na manutenção da infraestrutura de PD&I e implantação industrial de tecnologias. Estabelecer consórcios e parcerias de instituições e centros de pesquisa com empresas (produtoras, usuárias e fornecedoras de produtos, equipamentos e serviços)
Atores envolvidos	Indústrias, universidades, centros tecnológicos, MCTI, Capes, BNDES, FAPs.
Situação a ser alcançada até 2035	Utilização industrial de tecnologias limpas, para novos usos siderúrgicos, adequadas às características do carvão mineral nacional.





INFRAESTRUTURA FÍSICA – IF 07	
Situação atual	Ausência de infraestrutura de PD&I para uso do carvão mineral nacional em pelotização de minério de ferro.
Ações visando modificar o cenário atual	Buscar o investimento em infraestrutura de PD&I para o desenvolvimento de processos de utilização do carvão mineral nacional para uso em pelotização de minério de ferro.
Atores envolvidos	ABM, Rede Carvão Mineral, MDIC, MME, IABR, ABCM, Vale.
Situação a ser alcançada até 2022	Processos de utilização do carvão mineral nacional desenvolvidos para uso em novas tecnologias de coqueificação, redução direta (carvão e gás) e processos de fusão-redutora (ênfase no Tecnored).
Ações visando melhorar o cenário alcançado em 2022	Buscar o estabelecimento de parcerias com indústrias para aplicação comercial dos processos de utilização industrial do carvão mineral nacional para uso em pelotização de minério de ferro, coqueificação e na injeção em altos-fornos. Buscar o estabelecimento de parcerias com indústrias para aplicação comercial dos processos para utilização do carvão mineral nacional desenvolvidos para uso em novas tecnologias de coqueificação, redução direta (carvão e gás) e processos de fusão-redutora (ênfase no Tecnored).
Atores envolvidos	Indústrias, universidades, centros tecnológicos. MCTI, Capes, BNDES, FAPs.
Situação a ser alcançada até 2035	Utilização industrial do carvão mineral nacional para uso em pelotização de minério de ferro, coqueificação e na injeção em altos-fornos.

INFRAESTRUTURA FÍSICA – IF 08	
Situação atual	Poucas tecnologias disponíveis para gestão da recuperação, monitoramento e controle ambiental.
Ações visando modificar o cenário atual	Criar condições para o investimento em infraestrutura de PD&I para o desenvolvimento e aquisição de equipamentos de recuperação, monitoramento e controle ambiental nos segmentos de lavra, beneficiamento e uso.
Atores envolvidos	MMA, Ibama, ABCM, CETEM, SATC, Rede Carvão Mineral.
Situação a ser alcançada até 2022	Tecnologias de gestão para recuperação, monitoramento e controle ambiental, desenvolvidas e adaptadas.
Ações visando melhorar o cenário alcançado em 2022	Buscar o estabelecimento de consórcios e parcerias de instituições e centros de pesquisa com empresas (produtoras, usuárias e fornecedoras de produtos, equipamentos e serviços).
Atores envolvidos	Indústrias, universidades, MME, MMA, centros tecnológicos, MCTI, Capes, BNDES, FAPs.
Situação a ser alcançada até 2035	Aplicação comercial das tecnologias de gestão para recuperação, monitoramento e controle ambiental desenvolvidas.



INFRAESTRUTURA FÍSICA – IF 08	
Situação atual	Poucas tecnologias disponíveis para gestão da recuperação, monitoramento e controle ambiental.
Ações visando modificar o cenário atual	Criar condições para o investimento em infraestrutura de PD&I para o desenvolvimento e aquisição de equipamentos de recuperação, monitoramento e controle ambiental nos segmentos de lavra, beneficiamento e uso.
Atores envolvidos	MMA, Ibama, ABCM, CETEM, SATC, Rede Carvão Mineral.
Situação a ser alcançada até 2022	Tecnologias de gestão para recuperação, monitoramento e controle ambiental, desenvolvidas e adaptadas.
Ações visando melhorar o cenário alcançado em 2022	Buscar o estabelecimento de consórcios e parcerias de instituições e centros de pesquisa com empresas (produtoras, usuárias e fornecedoras de produtos, equipamentos e serviços).
Atores envolvidos	Indústrias, universidades, MME, MMA, centros tecnológicos, MCTI, Capes, BNDES, FAPs.
Situação a ser alcançada até 2035	Aplicação comercial das tecnologias de gestão para recuperação, monitoramento e controle ambiental desenvolvidas.

INFRAESTRUTURA FÍSICA – IF 09	
Situação atual	Parque gerador com tecnologia defasada de energia elétrica a partir de carvão mineral
Ações visando modificar o cenário atual	Buscar investimentos em projetos e implantação de novas usinas termelétricas de ciclo supercrítico. Pesquisar possibilidades de capture ready.
Atores envolvidos	Tractebel, ABCM, MME, MMA, CGTEE/ Eletrobras, MPX, EPE.
Situação a ser alcançada até 2022	Disponer de um parque gerador de energia elétrica moderno a partir de carvão mineral.
Ações visando melhorar o cenário alcançado em 2022	Criar condições para o investimento em projetos e implantação de novas usinas com eficiência acima de 45%. Criar condições para o investimento em limpeza de gases e separação de CO2.
Atores envolvidos	MME, ANEEL, indústria.
Situação a ser alcançada até 2035	Parque gerador de energia elétrica ampliado, a partir de carvão mineral, limpo e eficiente




INFRAESTRUTURA FÍSICA – IF10	
Situação atual	Parque gerador com tecnologia defasada de energia elétrica a partir de carvão mineral
Ações visando modificar o cenário atual	Buscar o investimento em plantas de demonstração em escala industrial para viabilizar novas usinas IGCC.
Atores envolvidos	Indústrias, universidades, MME, MMA, centros tecnológicos, MCTI, Capes, ABCM, redes de pesquisa.
Situação a ser alcançada até 2022	Dispor de um parque gerador de energia elétrica, moderno, a partir de carvão mineral.
Ações visando melhorar o cenário alcançado em 2022	Criar condições para investimentos em projetos e implantação de novas usinas IGCC.
Atores envolvidos	Indústrias, universidades, MME, MMA, centros tecnológicos, MCTI, Capes, ABCM, redes de pesquisa.
Situação a ser alcançada até 2035	Parque gerador de energia elétrica limpo, eficiente e ampliado, com maior participação do carvão mineral.

INFRAESTRUTURA FÍSICA – IF10	
Situação atual	Parque gerador com tecnologia defasada de energia elétrica a partir de carvão mineral
Ações visando modificar o cenário atual	Buscar o investimento em plantas de demonstração em escala industrial para viabilizar novas usinas IGCC.
Atores envolvidos	Indústrias, universidades, MME, MMA, centros tecnológicos, MCTI, Capes, ABCM, redes de pesquisa.
Situação a ser alcançada até 2022	Dispor de um parque gerador de energia elétrica, moderno, a partir de carvão mineral.
Ações visando melhorar o cenário alcançado em 2022	Criar condições para investimentos em projetos e implantação de novas usinas IGCC.
Atores envolvidos	Indústrias, universidades, MME, MMA, centros tecnológicos, MCTI, Capes, ABCM, redes de pesquisa.
Situação a ser alcançada até 2035	Parque gerador de energia elétrica limpo, eficiente e ampliado, com maior participação do carvão mineral.




3.2.4 – Investimentos


INVESTIMENTOS – IN 01	
Situação atual	Compensação Financeira pela Exploração Mineral - CFEM – com legislação estadual diferente para SC, RS e PR.
Ações visando modificar o cenário atual	Discutir a modificação da legislação estadual (RS e PR) sobre a CFEM.
Atores envolvidos	Assembleias legislativas estaduais; ABCM; Governos estaduais.
Situação a ser alcançada até 2022	A exemplo do Estado de SC, CFEM recolhida em função da exploração do carvão é aplicada nos próprios estados produtores, em projetos de CCT.



INVESTIMENTOS – IN 02	
Situação atual	O spread do BNDES para o carvão mineral é mais caro e o nível de participação é menor, em relação às demais fontes de energia.
Ações visando modificar o cenário atual	Rediscutir a política de incentivo e financiamento ao carvão mineral do BNDES.
Atores envolvidos	BNDES, MME, MDIC, frente parlamentar, ABCM.
Situação a ser alcançada até 2022	BNDES fornecendo aos investimentos em carvão mineral as mesmas condições de financiamento disponibilizadas para as outras fontes de energia, considerando critérios ambientais.



INVESTIMENTOS – IN 03	
Situação atual	Existência de Fundos Setoriais - FNDCT (CT-Energ, CT-Mineral, CT-Petro, etc), P&D ANEEL disponíveis.
Ações visando modificar o cenário atual	Discutir uma ação política e de regulação, junto ao MCTI (Conselho Diretor do FNDCT e Conselho de Ciência e Tecnologia) e Aneel para projetos estruturantes em CCT.
Atores envolvidos	ABCM, Aneel, MCTI, Rede Carvão mineral, ANP.
Situação a ser alcançada até 2022	Os recursos recolhidos pelas termelétricas a carvão sejam utilizados em projetos estruturantes, evitando a solução de continuidade (fluxo ininterrupto de recurso). Os investimentos em CCT que beneficiem outros setores (por exemplo, sequestro de carbono) recebam suporte financeiro também de outras empresas.





INVESTIMENTOS – IN 04	
Situação atual	Baixo investimento de empresas privadas em PD&I.
Ações visando modificar o cenário atual	<p>Incentivar a participação de empresas privadas em PD&I através da divulgação dos incentivos fiscais existentes.</p> <p>Buscar o estímulo via incentivos fiscais, parcerias com empresas privadas, onde haja interesse, potencialidade e possibilidade, para que elas aportem recursos como contrapartida (risco) desde a fase de pesquisa.</p> <p>Discutir a promoção da postergação e isenção de obrigações fiscais para empreendimentos destinados a pesquisa (planta de demonstração) e empreendimentos "first of a kind" (Revisão da Lei "do Bem" n.º 11.196/2005).</p>
Atores envolvidos	ABCM, frente parlamentar, MCTI, MDIC.
Situação a ser alcançada até 2022	Participação de empresas privadas nos investimentos de PD&I.
Ações visando melhorar o cenário alcançado em 2022	Promover a integração público-privada com ampliação da participação da indústria no financiamento.
Atores envolvidos	Indústria de Carvão Mineral, Rede Carvão Mineral, Aneel, Ministério da Fazenda
Situação a ser alcançada até 2035	Ambiente onde a empresa privada deseja investir em PD&I.

INVESTIMENTOS – IN 05	
Situação atual	Centros de pesquisa não recebem recursos suficientes para operar em nível de excelência.
Ações visando modificar o cenário atual	<p>Rever a legislação orçamentária estadual para que os estados garantam seu funcionamento. Buscar outras linhas de financiamento junto à iniciativa privada. Discutir o aumento da participação do pesquisador nos royalties de patentes, seguindo o modelo norte-americano, onde os pesquisadores ganham até 80% dos royalties e tem direito de negociar a patente.</p>
Atores envolvidos	Governos estaduais, ABCM, centros de pesquisa, Rede Carvão Mineral.
Situação a ser alcançada até 2022	Centros de pesquisa nacionais voltados ao CCT com custeio garantido, além de investimento articulados e financiados com a iniciativa privada.



3.2.5 – Aspectos regulatórios

ASPECTOS REGULATÓRIOS – RE 01 / MERCADO – ME 01	
Situação atual	Carvão mineral não contemplado nos leilões de energia elétrica.
Ações visando modificar o cenário atual	Posicionar o setor e promover discussões a respeito do estabelecimento de critérios técnico-ambientais mínimos, que possibilitem a participação de termelétricas nos leilões de energia em isonomia com as demais fontes, vis-à-vis os ditames da política energética nacional.
Atores envolvidos	CNPE, MME e EPE
Situação a ser alcançada até 2022	Ambiente favorável ao aproveitamento do carvão mineral para geração de energia elétrica, respeitando-se critérios técnico-ambientais.
Ações visando melhorar o cenário alcançado em 2022	Posicionar a indústria do carvão de modo a permitir a manutenção da isonomia do carvão mineral nos leilões de energia elétrica via portarias ministeriais.
Atores envolvidos	CNPE, MME e EPE
Situação a ser alcançada até 2035	Manutenção do ambiente favorável ao aproveitamento do carvão mineral para a geração de energia elétrica, respeitando-se critérios técnico-ambientais.

ASPECTOS REGULATÓRIOS – RE 02	
Situação atual	Média brasileira de eficiência energética das termelétricas em torno de 28%
Ações visando modificar o cenário atual	Criar condições para a criação de regras para implantação e renovação periódica de licença de funcionamento, com exigência de um índice máximo, a ser definido, de emissões de CO2 por MW gerado.
Atores envolvidos	ANEEL
Situação a ser alcançada até 2022	Eficiência energética das termelétricas de 40% com redução na geração de impactos/emissões
Ações visando melhorar o cenário alcançado em 2022	Discutir a revisão das regras para implantação e renovação periódica de licença de funcionamento, reduzindo o índice máximo de emissões de CO2 por MW gerado.
Atores envolvidos	Aneel
Situação a ser alcançada até 2035	Eficiência energética das termelétricas de 45% com redução na geração de impactos/emissões.



ASPECTOS REGULATÓRIOS – RE 03	
Situação atual	Caracterização insuficiente do impacto ambiental
Ações visando modificar o cenário atual	Estabelecer parâmetros claros, em atos normativos, para caracterizar o impacto ambiental.
Atores envolvidos	Conama, MMA, Ibama e órgãos ambientais estaduais/municipais
Situação a ser alcançada até 2022	Impacto ambiental caracterizado baseado em parâmetros definidos.



ASPECTOS REGULATÓRIOS – RE 04	
Situação atual	Inexistência de legislação específica para a seleção de locais para o armazenamento geológico de CO2.
Ações visando modificar o cenário atual	Discutir a criação de regulamentação sobre a seleção dos locais para armazenamento geológico de CO2.
Atores envolvidos	MMA/MME.
Situação a ser alcançada até 2022	Legislação que regula a seleção de locais para desenvolvimentos em escala piloto de armazenamento geológico de CO2.



ASPECTOS REGULATÓRIOS – RE 05	
Situação atual	Existência de plantas piloto e pesquisas em gaseificação em estado inicial.
Ações visando modificar o cenário atual	Discutir a identificação e priorização da criação de incentivos para pesquisa relacionada ao desenvolvimento de gaseificadores e plantas para simulação dos processos de gaseificação de carvão.
Atores envolvidos	CNPq, Finep e Aneel
Situação a ser alcançada até 2022	Protótipos para simulação dos processos de gaseificação de carvão incluindo eficiência térmica.
Ações visando melhorar o cenário alcançado em 2022	Buscar a criação de incentivos para pesquisas continuadas e consolidação das experiências de sucesso.
Atores envolvidos	Aneel
Situação a ser alcançada até 2035	Plantas comerciais de gaseificação de carvão, competitivas e com controle de emissões.





ASPECTOS REGULATÓRIOS – RE 06	
Situação atual	Não há financiamento, no setor carbonífero, para medidas que atendam às demandas do Fundo Nacional de Mudanças Climáticas.
Ações visando modificar o cenário atual	Identificar empresas ou consórcios interessados em investir em projetos de abatimento de CO2. Buscar a criação de novos mecanismos e localizar novas fontes de financiamento.
Atores envolvidos	MME/Aneel
Situação a ser alcançada até 2022	Setor carbonífero envolvido nas demandas do Fundo Nacional de Mudanças Climáticas.

ASPECTOS REGULATÓRIOS – RE07	
Situação atual	As pesquisas e laboratórios direcionados às tecnologias limpas recebem poucos recursos.
Ações visando modificar o cenário atual	Discutir o direcionamento das verbas de P&D Aneel das termelétricas a carvão para pesquisas e laboratórios dedicados às tecnologias limpas, vis-à-vis a política energética nacional e suas prioridades. Discutir a adoção do programa de P&D da Aneel para o setor carbonífero, incluindo as demais empresas que utilizam o carvão (siderurgias, por exemplo) e não apenas as termelétricas.
Atores envolvidos	MEC, MCTI, MME.
Situação a ser alcançada até 2022	Criação de cursos para formação de RH (transversal) e ampliação do número de grupos de pesquisa dedicados ao tema de tecnologias limpas do setor carbonífero.
Ações visando melhorar o cenário alcançado em 2022	Estimular o intercâmbio com instituições de pesquisa no mundo e a rede de laboratórios.
Atores envolvidos	MEC, MCTI, MME.
Situação a ser alcançada até 2035	Capacitação de pessoal e laboratorial.





ASPECTOS REGULATÓRIOS – RE08	
Situação atual	Predominância de tecnologias e serviços importados.
Ações visando modificar o cenário atual	Buscar a garantia de participação mínima da indústria nacional nos projetos de grande porte de toda a cadeia produtiva do carvão mineral nacional
Atores envolvidos	Rede carvão, Abimaq, Abinee, ABCM. MIDIC, frente parlamentar.
Situação a ser alcançada até 2022	Participação da indústria nacional com pelo menos 60% de equipamentos e serviços nos projetos de grande porte.
Ações visando melhorar o cenário alcançado em 2022	Discutir a elaboração de projeto de lei federal nos mesmos moldes do PADIS para importação com incentivo fiscal de componentes específicos não produzidos pela indústria nacional.
Atores envolvidos	Indústria de Carvão Mineral. MDIC/BNDES e Min. da Fazenda
Situação a ser alcançada até 2035	Participação da indústria nacional com pelo menos 60% de equipamentos e serviços nos projetos de grande porte. Incentivo fiscal para importação de componentes específicos não produzidos pela indústria nacional.



REFERÊNCIAS

- ADAHAMA, A.B.; ADELEKE, A.O.; OLULANA, A.O.; IBITOYE, S.A. Effects of stamped charging on the strength of coke from the weakly caking australian agro-allied coal blend mixed with coke breeze. *Journal of Minerals & Materials Characterization & Engineering*, 2008.
- ARROYO, F.; CAMACHO, N P.; COCA, P.; FERNÁNDEZ-PEREIRA, C. Recovery of germanium from coal fly ash leachate by precipitation. In: 2009 WorldofCoalAsh (WOCA) Conference. Lexington, KY: Anais ..., 2009.
- BAGATINI, M.C. Self-reducing and the use of steelmaking waste briquettes in electric arc furnace. 2011. PPGEM/ UFRGS.
- BARE, S. Methanol to olefins (MTO): development of a commercial catalytic process. Lecture Series. Fritz Haber Institute of the Max Planck Society. Department of Inorganic Chemistry, 2007.
- BASTOS, V.D. Desafio da petroquímica brasileira no cenário global. BNDES Setorial, n. 29, mar. 2009.
- BENNETT, P.A. Queensland bowen basin coals for the COREX® market. Coaltech, Australia, 1999.
- BP. BP Statistical Review of World Energy, June 2011.
- BRASIL. Ministério da Ciência e Tecnologia - MCT. Segunda comunicação nacional do Brasil à convenção. Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima, 2010.
- BRASIL, N.I. et.al. Processamento de Petróleo e Gás. Editora LTC, 2011.
- CALDEIRA FILHO, J. G. Effects of solvent extraction upon the porous nature of coals. Tese (Mestrado) - The Pennsylvania State University, 1981.
- CARBON RECYCLING INTERNATIONAL. Disponível em: <www.carbonrecycling.is>. Acesso em: jun. 2012.
- CARPENTER, A.M. Use of coal in direct ironmaking processes. IEA Coal Research, 2004.
- _____. Use of PCI in blast furnaces. London: IEA Clean Coal Center, 2006.
- CAVALCANTI, M.M. Plataforma continental: a última fronteira da mineração brasileira. Programa de Avaliação de Distritos Mineiros. Brasília: MME-DNPM, 2011.
- CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS - CGEE. Documento subsidiário para construção do roadmap tecnológico: proposta de roadmap para discussão na oficina de trabalho. Brasília: mar. 2012.
- _____. Siderurgia no Brasil 2010-2025, Brasília: 2010.



_____. Tecnologias críticas e sensíveis em setores prioritários: hidrogênio energético no Brasil. Subsídios para políticas de competitividade: 2010-2025. Brasília: 2010.

CHAVAN, P.; DATTA, S.; SAHA, S.; SAHU, G.; SHARMA, T. Influence of high ash indian coals in fluidized bed gasification under different operating conditions. *Solid Fuel Chemistry*, v. 46, n. 2, p. 108–113, 2012.

CHEELEY, R.; LEU, MARKUS; MIDREX TECHNOLOGY, INC. Coal gasification based DRI solution for Indian ironmaking. In: ANNUAL INTERNATIONAL STEEL SEMINAR AND EXIBITION KOLKATA, 17. 2010.

COLLOT, A.G. Matching gasification technologies to coal properties. *International Journal of Coal Geology*, v. 65, p.191– 212, 2006.

CORRÊA, M.L. et. al. Zeólita do tipo AIPO: síntese, caracterização e propriedades catalíticas. *Química Nova*, n. 19, 1996.

COUCH, G.R. Metallurgical coke production. IEA, 2001.

DERBYSHIRE, F. Carbon material from coal. Center for Applied Energy Research. 1997.

DOE-EIA. International energy outlook 2011. Disponível em: [www.eia.gov/ieo/pdf/0484\(2011\).pdf](http://www.eia.gov/ieo/pdf/0484(2011).pdf) . Acesso em: 03 mar. 2012.

EMPRESA DE PESQUISAS ENERGÉTICAS. Balanço energético nacional – BEN 2011: ano base 2010. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/Estudos/Paginas/Balan%C3%A7o%20Energ%C3%A9tico%20>. Acesso em: 2011

_____. Plano Nacional de Energia 2030 – PNE 2030. 2007. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/PNE/Forms/Empreendimento.aspx>. Acesso em: 20 fev. 2012.

FAHIM, M.A.; AL-SAHHAH, A.T. Introdução ao refino de petróleo. 1 ed. Editora Campus, 2011.

FERREIRA, N. F. Estudo tecnológico para o beneficiamento do carvão da Camada Bonito, Tese (Doutorado). PPGEM da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2012. Orientador: Hoffmann, C. S.

FINEMAN, J.R.; MACRAE, D.R. Direct reduced iron. Warrendale, PA: AIST, 1999.

FLEISCH, T.H. Syngas chemistry: key technology for the 21st. Century. In: SYNGAS CHEMISTRY SYMPOSIUM. Dresden, Alemanha, out. 2006.

FUNGARO, D.A. Adsorção de corantes em zeólitas em cinzas de carvão visando à remoção de azul de metileno em água. *The Electronic Journal of Chemistry*, v.1, n.1, 2009, p. 49-63. Disponível em: <http://www.orbitalufms.br/index.php/chemistry>



- GASIFICATION TECHNOLOGY COUNCIL. Underground coal gasification: converting unminerable coal to energy. GTC Database and Library.
- GEIM A.K.; NOVOSELOV, K.S. The rise of graphene . Nature Materials, n. 6, 2007.
- GOMES. A. P. ET. AL. Carvão Mineral. Estudos Avançados, v. 13, n. 33, 1998.
- GUDENAU, H.W. Vom erz zum stahl. Institut fur Eisenhutenkunde, RWTH Aachen, 1989, 497p.
- HABIB, M.A.; BADR, H.M.; AHMED, S.F.; BEN-MANSOUR, R.; MEZGHANI K.; IMASHUKU, S.; LA O', G.J.; SHAO-HORN, Y.; MANCINI, N.D.; MITSOS, A.; KIRCHEN, P.; GHONEIM, A.F. A review of recent developments in carbon capture utilizing oxy-fuel combustion in conventional and ion transport membrane systems. Int. Journal of Energy Research, v. 35, p. 741–764, 2011.
- HAWKEN, P. et. al .Capitalismo Natural. 1. ed. Cultrix, 2000.
- HINDMAN, M. Methanol to gasoline (MTG) technology: an alternative for liquid fuel production. In: WORLD CTL CONFERENCE, 2010.
- HOFFMANN, C.S.; CARLOS, H.; TAVARES, L.M.M. Beneficiamento gravimétrico. Porto Alegre: Ed. UFRGS, 2005. 600p.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE SIDERURGIA. Anuário Estatístico, Rio de Janeiro, 2010.
- INSTITUTO EUVALDO LODI, Núcleo Nacional. Inova engenharia - propostas para a modernização da educação em engenharia no Brasil / IEL.NC, SENAI.DN. Brasília: IEL.NC/SENAI.DN, 2006.
- INTERNATIONAL ENERGY AGENCY - IEA, CLEAN COAL CENTRE. Clean coal roadmaps to 2030, 2009.
- _____. 2011 Key world energy statistics, 2011.
- _____. Technology roadmap: carbon capture and storage, 2009.
- IZIDORO, J.C.; FUNGARO, D.A.; SANTOS, F.S.; WANG, S. Characteristics of Brazilian coal fly ashes and their synthesized zeolites. Fuel Processing Technology, v.97, p. 38–44, 2012.
- KENNEL, E.B. ET. AL. Development of continuous solvent extraction for coal derived carbon products. Quarterly Report. Department of Chemical Engineering. West Virginia University, 2006.
- KRUEGER, A. Carbon materials and nanotechnology. 1. ed. Editora Wiley, 2010.
- LEVINE, G.; SCHLOSBERG, H. ET AL. Understanding the chemistry and physics of coal structure (a review); Proceeding National Academy of Science, USA, v. 29, 1982.
- LEVITT, T. A Imaginação de marketing. 2. ed. Atlas, 1990.



- LI, J.; LIANG, X.; COCKERILL, T.; GIBBINS, J.; REINER, D. Opportunities and barriers for implementing CO₂ capture ready designs: A case study of stakeholder perceptions in Guangdong, China. *Energy Policy*, v. 45, p. 243–251, 2012.
- LOISON, R.; FOCH, P.; BOYER, A. *Coke: quality and production*. 2ed. England: Butterworths, 1989. 555p.
- LOVELOCK, J. *A vingança de Gaia*. 1. ed. Intrínseca, 2006.
- MACHADO, J.G.M.S.; OSORIO, E.; VILELA, A.C.F.; BABICH, A.; SENK, D.; GUDENAU, H.W. Reactivity and conversion behaviour of brazilian and imported coals, charcoal and blends in view of their injection into blast furnaces. *Steel Research International*. v. 81, p.9-16, 2010.
- MEAWAD, A.S.; BOJINOVA, D.Y.; PELOVSKI, Y.G. Review - an overview of metals recovery from thermal power plant solid wastes. *Waste Management*, v. 30, p. 2548–2559, 2010.
- METHANOL INSTITUTE. *Carbon recycling international: the CO₂ to liquid fuel company*. Methanol Facts. jul. 2011.
- MIDREX. *World direct reduction statistics*. 2011.
- MINCHENER, A. J. Coal gasification for advanced power generation. *Fuel*, v. 84, p. 2222-2235, 2005.
- MINTZBERG, H. *Ascensão e queda do planejamento estratégico*. 1. ed. Bookman. 2004.
- MONDAL, P.; DANG, G.S.; GARG M.O. Syngas production through gasification and cleanup for downstream applications, recent developments. *Fuel Processing Technology*, v. 92, p. 1395–1410, 2011.
- MORAIS, M.G.; COSTA, J.A.V. Biofixation of carbon dioxide by *Spirulina* sp. and *Scenedesmusobliquus* cultivated in a three-stage serial tubular photobioreactor. *Journal of Biotechnology*, v. 129, p. 439–445, 2007.
- NATIONAL ACADEMY OF SCIENCE. *Understanding and responding to climate change. Highligths of National Academies Reports*, 2008.
- NOLDIN JR, J.H.; CONTRUCCI, M.A.; D'ABREU, J.C.; JACOMINI, N. Fuel flexibility in the tecored process. In: *INTERNATIONAL MEETING ON IRONMAKING*, 2., v.1, p. 201-212, ABM, Vitoria, 2004.
- NOLDIN, J.H.Jr. An overview of the new and emergent ironmaking technologies. In: *IAS-8TH IRONMAKING CONFERENCE*. Rosario, 2011
- OLAH G. Beyond oil and gas: the methanol economy. *Angew. Chem. Int.Ed.* 44, 2005.
- OLAH, G. ET AL. Chemical recycling of carbon dioxide to methanol and dimethyl ether: from



- greenhouse gas to renewable, environmentally carbon neutral fuels and synthetic hydrocarbons. *J. Org. Chem*, 74, n. 2, 2009.
- OSÓRIO, E. Utilização de carvões da jazida de Chico-Loma para a produção de coque. Tese (Doutorado), PPGEM/UFRGS, Porto Alegre, 1997.
- OSÓRIO, E.; VILELA, A.F. Utilização do carvão na siderurgia. In: TEIXEIRA, E.C.; PIRES, M.J.R. (Org.). *Meio Ambiente e Carvão*. Porto Alegre, 2002, p.149-171.
- RIFKIM, J. *A Economia do hidrogênio*. 1 ed. M.Books, 2003.
- RODDY, D.J.; YOUNGER, P.L. Underground coal gasification with CCS: a pathway to decarbonising industry. *Energy & Environmental Science*, v. 3, p. 400–407, 2010.
- SAMANTA, A.; ZHAO, A.; SHIMIZU, J.K.H.; SARKAR, P.; GUPTA, R. Post-combustion CO₂ capture using solid sorbents: a review. *Ind. Eng. Chem. Res.*, v. 51, p. 1438–1463, 2012.
- SÁNCHEZ, C.G. Tecnologia da gaseificação. UNICAMP, Departamento Engenharia Térmica e Fluidos, 20??.
- SCHEFFKNECHT, G.; AL-MAKHADMEH, L.; SCHNELL, U.; MAIER, J. Oxy-fuel coal combustion. A review of the current state-of-the-art. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, v. 55, p. 516–535, 2011.
- SCOTT, D.H. *Developments affecting metallurgical uses of coal*. London: I.E.A. Coal Research. 1994. 94p.
- SHIN Y.-J.; SHEN, Y.-H. Preparation of coal slurry with organic solvents. *CHEMOSPHERE*, n. 68, 2007.
- SILVA, A.M.; BENTES M. A.G.; MEDRADO, S.B.; SOBRINHO, P.M.; CARVALHO JR, J.A. Estudo da utilização de biomassa em substituição parcial ao carvão mineral na fabricação de coque na coqueria da CSN. In: SEMINÁRIO DE REDUÇÃO DE MINÉRIO DE FERRO E MATÉRIA-PRIMAS, ABM, Salvador, 2007.
- TAKAMATSU, N.; KURIHARA, K. Iron-making technology progress in Japan. In: *European Coke & Ironmaking Conference*, 6., Dusseldorf: METEC, 2011.
- THOMAS, S.; MCKNIGHT, S.J.; SERRANO, E.J. Laboratory evaluation of biomass usage for coke and sinter production. In: *EUROPEAN COKE & IRONMAKING CONFERENCE*, 6., Dusseldorf: METEC, 2011.
- TOFLER, A. *A terceira onda*. 29. ed. Ed. Record, 2007.
- U.S. DEPARTMENT OF ENERGY. *Hydrogen from Coal Program. Research, development and demonstration plan*. 2008.
- U.S. GEOLOGICAL SURVEY - USGS. *Coal, a complex natural resource*. Circular n. 1143, 2002.



VAZ, A.P. M. Metano como fonte de olefinas leves: um estudo técnico-econômico dos processos MTO. Projeto Final de Curso: Escola de Química- UFRJ-2007.

VIELA, A.C.F. A redução de pelotas de minério de ferro pela utilização de carvões não desgaseificados e desgaseificados com diferentes relações Cfix/Ctot. Dissertação (Mestrado), PPGEM/UFRGS, 1981.

WORLD COAL INSTITUTE. The coal resource: a comprehensive overview of coal, 2005.

ZHOU, W.; SWANSON, L.; MOYEDA, D.; XU, G. Process evaluation of biomass cofiring and reburning in utility boilers. *Energy Fuels*, v. 24, p. 4510–4517, 2010.



LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Comparação dos países com maiores reservas provadas de carvão mineral e dos maiores produtores de carvão mineral, em 2010.	17
Figura 1.2 – Comparação dos recursos e reservas energéticas brasileiras em 2010.	18
Figura 1.3 – Consumo brasileiro e origem do carvão mineral utilizado para fins energéticos e siderúrgicos.	19
Figura 1.4 – Previsão de emissão de gases de efeito estufa para 2020 no Brasil, com expectativa de aumento das emissões no setor energético e diminuição das emissões geradas pelo desmatamento.	21
Figura 1.5 – Gráfico comparativo da emissão de CO ₂ por energia primária nos países com as maiores reservas provadas de carvão mineral.	23
Figura 1.6 – Comparação do valor agregado dos produtos obtidos a partir do carvão.	26
Figura 1.7 – Usos e aplicações do syngas a partir da gaseificação do carvão mineral.	27
Figura 2.1 – Estágio de evolução das tecnologias no mundo e no Brasil.	40
Figura 2.2 – Esquema de funcionamento do gaseificador de carvão Winkler (1920).	41
Figura 2.3 – Ilustração demonstrando o processo gaseificação in situ – Underground Coal Gasification (UCG).	42
Figura 2.4 – Mapa tecnológico da produção e uso, de forma limpa e eficiente do carvão mineral na carboquímica: 2012-2035.	43
Figura 2.5 – Esquema básico das reações do processo MTO (Methanol to Olefins).	46
Figura 2.6 – Pontos de atenção para ações de suporte ao desenvolvimento das trajetórias associadas ao desafio: 2012-2035	50
Figura 2.7 – Portfólio estratégico de PD&I referente à produção e uso, de forma limpa e eficiente, do carvão mineral na carboquímica: 2012-2035	51
Figura 2.8 – Estágio de evolução das tecnologias no mundo e no Brasil.	57
Figura 2.9 – Fluxograma das rotas de produção de aço (GUDENAU, 1989).	58



Figura 2.10 – Mapa tecnológico da produção e uso, de forma limpa e eficiente do carvão mineral na siderurgia: 2012-2035	63
Figura 2.11 – Esquema do processo de coqueificação SCOPE 21.	65
Figura 2.12 – Processo de redução direta com carvão em forno rotativo.	67
Figura 2.13 – Estágios de maturidade tecnológica de processos emergentes de redução.	69
Figura 2.14 – Configuração esquemática de uma planta COREX®	70
Figura 2.15 – Processo de autorredução TecnoRed e suas fontes de carbono.	71
Figura 2.16 – Pontos de atenção para ações de suporte ao desenvolvimento das trajetórias associadas ao desafio: 2012-2035.	74
Figura 2.17 – Portfolio estratégico de PD&I referente à produção e uso, de forma limpa e eficiente do carvão mineral na siderurgia: 2012-2035.	75
Figura 2.18 – Estágio de evolução das tecnologias no mundo e no Brasil.	81
Figura 2.19 – Separação de CO ₂ pré-combustão.	83
Figura 2.20 – Mapa tecnológico da produção e uso, de forma limpa e eficiente do carvão mineral em termelétricas: 2012-2035	86
Figura 2.21 – Pontos de atenção para ações de suporte ao desenvolvimento das trajetórias associadas ao desafio: 2012-2035.	90
Figura 2.22 – Portfolio estratégico de PD&I referente à produção e uso, de forma limpa e eficiente do carvão mineral em termelétricas: 2012-2035.	93



LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 – Compromissos assumidos pelo Brasil para mitigação das emissões de gases de efeito estufa (valores em milhões de toneladas de CO ₂ equivalente).	21
Tabela 2.1 – Metas da carboquímica para 2022 e 2035.	38
Tabela 2.2 – Tópicos associados à produção e uso, de forma limpa e eficiente do carvão mineral na carboquímica.	39
Tabela 2.3 – Produtos e compostos obtidos a partir do metanol produzido através do <i>syngas</i> .	47
Tabela 2.4 – Metas da siderurgia para 2022 e 2035.	55
Tabela 2.5 – Tópicos associados à produção e uso, de forma limpa e eficiente do carvão mineral na siderurgia.	56
Tabela 2.6 – Características básicas do Carvão para uso no processo Corex®	70
Tabela 2.7 – Composição das diversas matérias-primas testadas na planta-piloto Tecnored	72
Tabela 2.8 – Metas da geração termelétrica para 2022 e 2035.	78
Tabela 2.9 – Tópicos associados à produção e uso, de forma limpa e eficiente, do carvão mineral na geração termelétrica.	79
Tabela 2.10 – Sugestão de países e instituições de referência em pesquisas relacionadas à carboquímica, siderurgia e geração termelétrica, para possibilidade de cooperação internacional.	97



LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABCM	Associação Brasileira do Carvão Mineral
ABDI	Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial
ABM	Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
BNDES	Banco Nacional do Desenvolvimento
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
CCS	Carbon Capture and Storage
CCT	Clean Coal Technologies / Tecnologias de carvão limpo
CETEM	Centro de Tecnologia Mineral
CFEM	Compensação Financeira pela Exploração Mineral
CGEE	Centro de Gestão e Estudos Estratégicos
CIENTEC	Fundação de Ciência e Tecnologia
CNPq	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
CPRM	Serviço Geológico do Brasil
CTL	Coal to Liquids
CVRD	Companhia Vale do Rio Doce
DME	Dimetiléter
DRI	Direct Reduced Iron
ECBM	Enhanced Coal Bed Methane
EMBRAPII	Empresa Brasileira de Pesquisa e Inovação Industrial
EOR	Enhanced Oil Recovery
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
FAP	Fundação de Apoio à Pesquisa
FINEP	Financiadora de Estudos e Projetos
IBAMA	Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis
IGCC	Gaseificação integrada com ciclo combinado
MCTI	Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação
MDIC	Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior
MEC	Ministério da Educação
MF	Ministério da Fazenda
MMA	Ministério do Meio Ambiente
MME	Ministério de Minas e Energia



MTO	Methanol to Olefins
PD&I	Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação
PNE	Plano Nacional de Energia
PNMC	Política Nacional sobre Mudança do Clima
ROM	Run of Mine
SATC	Associação Beneficente da Indústria Carbonífera de Santa Catarina
SIBRATEC	Sistema Brasileiro de Tecnologia
tep	Tonelada Equivalente de Petróleo
UCG	Underground Coal Gasification / Gaseificação in situ
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
UNFCCC	Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima



Centro de Gestão e Estudos Estratégicos
Ciência, Tecnologia e Inovação

Ministério da
**Ciência, Tecnologia
e Inovação**

GOVERNO FEDERAL
BRASIL
PAÍS RICO É PAÍS SEM POBREZA