

RECURSOS MINERAIS ENERGÉTICOS

Matheus Kuchenbecker

*Laboratório de Estudos Tectônicos, Centro de Geociências,
Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri*

*Centro de Pesquisa Prof. Manoel Teixeira da Costa,
Universidade Federal de Minas Gerais*

SUMÁRIO

1. ASPECTOS GERAIS.....	1
2. CARVÃO MINERAL.....	4
2.1. CARVÃO MINERAL NO BRASIL E EM MINAS GERAIS.....	6
2.2. ASPECTOS ECONÔMICOS DO CARVÃO MINERAL.....	8
3. URÂNIO.....	10
3.1. DEPÓSITOS DE URÂNIO.....	12
3.2. ASPECTOS ECONÔMICOS DO URÂNIO.....	14
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	16

1. ASPECTOS GERAIS

Os recursos minerais energéticos são materiais naturais que, após lavrados, podem ser utilizados para a obtenção de energia para diversas finalidades. Dentre as muitas possibilidades de utilização destes recursos, merece destaque a geração de energia elétrica, uma vez que são responsáveis por quase 77% da energia elétrica gerada no mundo atualmente (Figura 1).

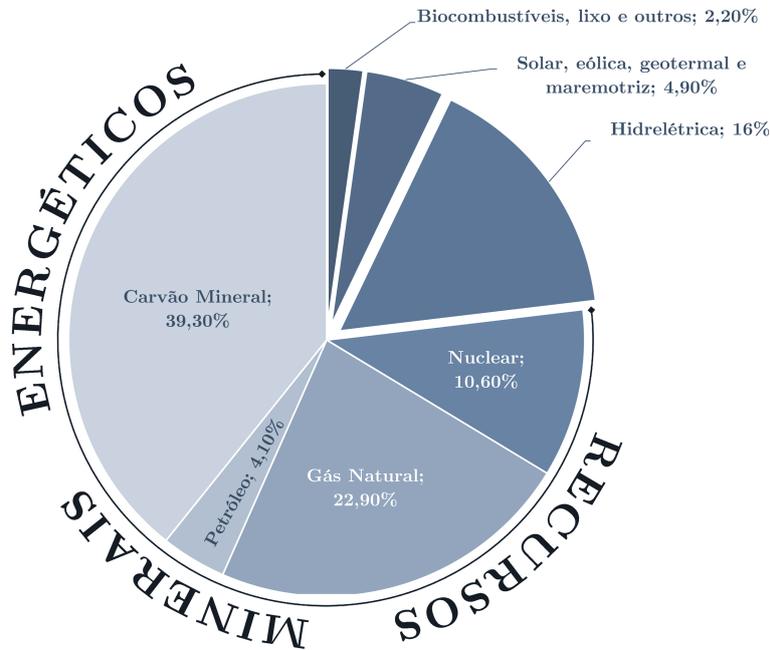


Figura 1. Produção mundial de energia elétrica, por fonte, em 2015. Dados de IEA (2017a).

Os recursos minerais energéticos podem ser divididos em dois grupos principais: combustíveis fósseis e minerais radioativos. Os combustíveis fósseis são materiais combustíveis (isto é, que podem ser queimados para a obtenção de energia), formados através da acumulação e preservação de matéria orgânica em bacias sedimentares. A matéria orgânica acumulada nestes locais é proveniente de organismos (principalmente plantas e animais) que, após sua morte, vão sendo acumulados e soterrados por sedimentos. Os três principais combustíveis formados desta maneira são o petróleo, o gás natural e o carvão mineral.

Em Minas Gerais, não são conhecidas ocorrências importantes de petróleo. Gás natural, por sua vez, ocorre com relativa abundância na região central do estado, na Bacia do São Francisco, relacionado a rochas pré-cambrianas. Por sua grande relevância e inúmeras particularidades, as jazidas mineiras de gás natural estão descritas em capítulo próprio deste livro. O terceiro e último tipo de combustível fóssil é o carvão mineral, que apresenta algumas jazidas conhecidas no estado de Minas Gerais e, por isto, será detalhado neste capítulo (Figura 2).

Os minerais radioativos, por sua vez, constituem um grupo de minerais que apresentam em sua composição elementos naturalmente radioativos, como Urânio (U), o Tório (Th) e o Potássio (K). Esses elementos são importantes recursos energéticos devido à possibilidade de se converter a energia liberada no decaimento radioativo (energia nuclear)

em outras formas de energia, como a energia elétrica, por exemplo. Do ponto de vista energético, o elemento mais relevante é o Urânio, que tem sido utilizado há várias décadas em usinas produtoras de energia elétrica. Outros elementos radioativos (como o Tório, por exemplo) também apresentam potencial para uso energético mas, devido a motivos econômicos e políticos, as pesquisas neste sentido tem tido um papel secundário nas últimas décadas. Neste capítulo abordaremos os principais depósitos mineiros de Urânio (Figura 3, Tabela 1), fornecendo informações sobre sua gênese e exploração (Figura 2).

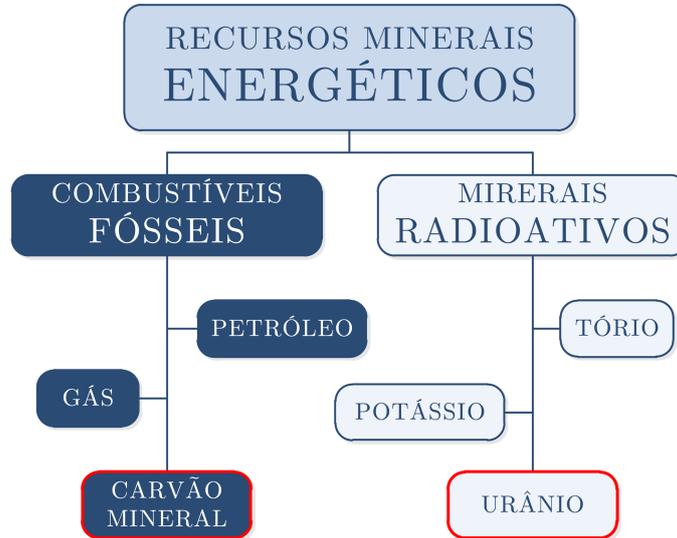


Figura 2. Esquema de classificação dos principais Recursos Minerais Energéticos, com destaque para aqueles abordados neste capítulo (em vermelho).

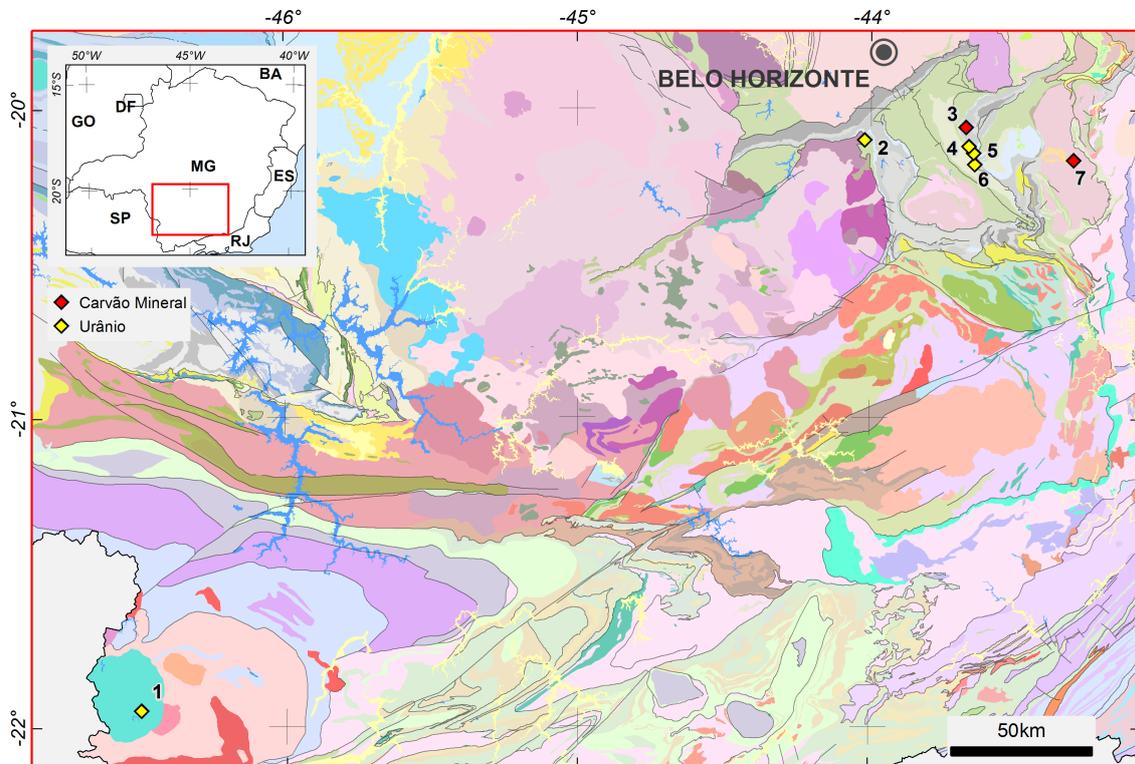


Figura 3. Principais ocorrências de carvão mineral e urânio no estado de Minas Gerais. A numeração se refere aos itens da Tabela 1. Mapa geológico modificado de Pinto & Silva 2014.

De acordo com o Balanço Energético Nacional de 2017 (EPE 2017), a oferta interna de energia elétrica no Brasil é fortemente baseada em fontes hidráulicas (68,1%). Neste cenário, os recursos minerais energéticos ocupam papel secundário na matriz energética do país, sendo o carvão mineral (e seus derivados) responsável por 4,2% e o Urânio por 2,6% (Figura 4).

Tabela 1. Principais ocorrências de carvão mineral e urânio no estado de Minas Gerais.

SUBSTÂNCIA	DESCRIÇÃO	TOPONÍMIA	MUNICÍPIO	Latitude	Longitude	
1	Urânio	Minério de urânio	INB Caldas	Poços de Caldas	-21,94695	-46,5002667
2	Urânio	Metaconglomerado com minerais de urânio	Serra das Gaivotas	Brumadinho	-20,1013667	-44,0204833
3	Carvão Mineral	Linhito	Bacia de Gandarela	Santa Bárbara	-20,0595667	-43,6770167
4	Urânio	Metaconglomerado com minerais de urânio	Mina Palmital	Rio Acima	-20,1212667	-43,6666167
5	Urânio	Metaconglomerado com minerais de urânio	Serra de Gandarela	Itabirito	-20,1428167	-43,6498
6	Urânio	Metaconglomerado com minerais de urânio	Mina de Ouro Fino	Itabirito	-20,1790333	-43,64685
7	Carvão Mineral	Linhito	Bacia de Fonseca	Alvinópolis	-20,1636167	-43,3097167

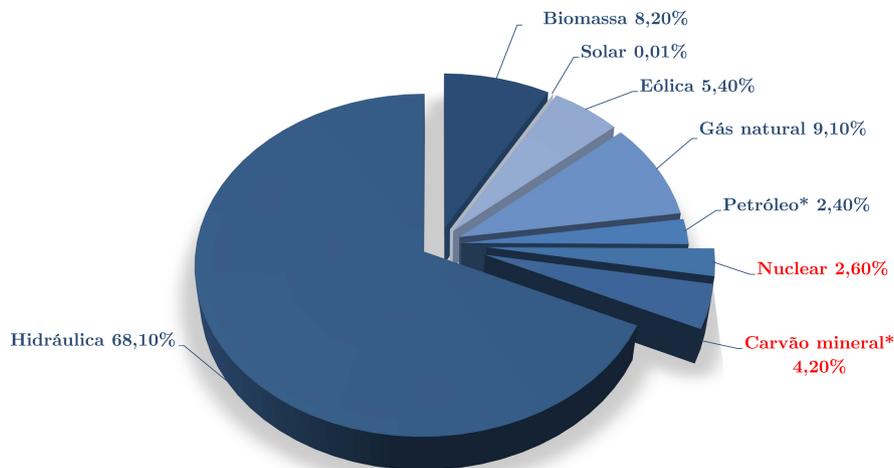


Figura 4. Oferta interna de Energia Elétrica no Brasil, por fonte. Dados do Balanço Energético Nacional 2017 (EPE 2017). *Inclui derivados.

Para que não se criem dúvidas em relação aos recursos minerais energéticos, é necessário que se faça uma ressalva em relação ao lítio. O lítio é um metal alcalino, muito leve, que, devido a seu elevado potencial eletroquímico, é largamente utilizado na fabricação de pilhas e baterias elétricas. Nos últimos anos, a preocupação com a redução de emissão de gases estufa tem acelerado as buscas por tecnologias alternativas à queima de combustíveis fósseis, sobretudo na indústria automotiva. A cada ano, têm sido apresentados modelos de carros elétricos mais eficientes, equipados com baterias de alta capacidade de armazenamento, geralmente fabricadas com lítio. Neste cenário, o lítio frequentemente tem sido chamado de “petróleo branco” ou “petróleo do futuro”, o que poderia sugerir sua classificação como recurso mineral energético. Entretanto, esclarece-se que, uma vez que não tem papel fundamental nos processos de geração de energia e é utilizado apenas na fabricação de dispositivos de armazenamento (pilhas e baterias), o lítio não é considerado um recurso mineral energético. Portanto, apesar de sua relevância como recurso mineral e sua abundância em Minas Gerais (a exemplo dos grandes depósitos existentes no Vale do Jequitinhonha), o lítio não será abordado aqui, dispondo de um capítulo específico neste livro.

2. CARVÃO MINERAL

O carvão mineral é um combustível fóssil muito abundante na Terra. Sua utilização, para fins de aquecimento doméstico, iluminação e preparação de alimentos, remonta aos primórdios da civilização, com registros de uso na Gália, na Grã-Bretanha e na China desde muito antes do século I A.C. (Gomes *et al.* 2003).

Sob a denominação de “carvão mineral”, estão agrupados diferentes tipos de rocha, que registram as várias etapas evolutivas que afetam a matéria orgânica, desde a sua sedimentação (geralmente em ambientes pantanosos) até a sua completa transformação em rocha sedimentar (Figura 5).

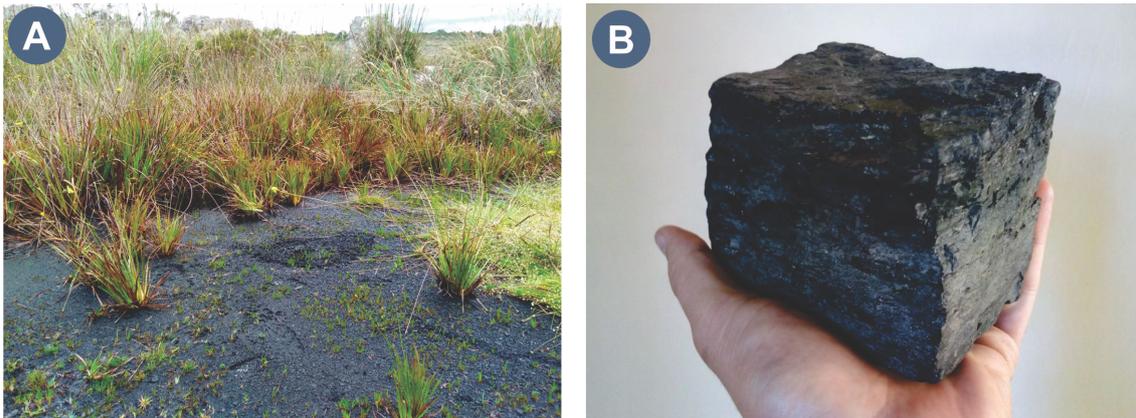


Figura 5. A) Uma turfeira, ambiente alagadiço onde está ocorrendo acumulação de matéria orgânica (notar a cor preta do solo). Serra do Espinhaço, Diamantina (MG), Campus JK/UFVJM (UTM23S, 652.170E, 7.986.530N, WGS84). **B)** Amostra de antracito, proveniente de Criciúma (SC). Fotos do autor.

Como resultado do progressivo soterramento, um depósito de matéria orgânica original é gradativamente compactado, com conseqüente perda d’água e aumento do teor de carbono (Figura 6). Ao longo desse processo, o material gerado passa a receber diferentes nomes: turfa (<60% de carbono), linhito (60% a 80%), hulha (80% a 90%) e antracito (>90%). A turfa pode apresentar até 75% de água quantidade que decresce para menos de 10% nos demais tipos de carvão (Branco 2014).

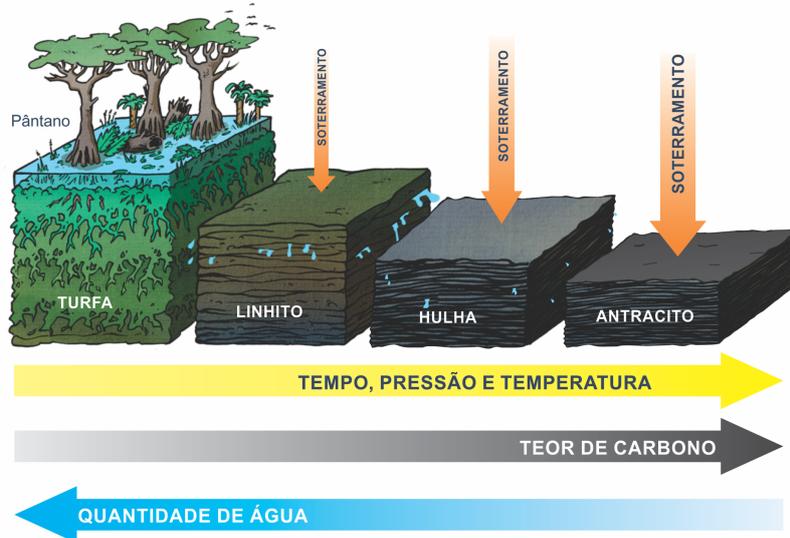


Figura 6. Etapas de formação do carvão mineral, com seus respectivos nomes. Figura modificada de BYJU'S.

O aumento no teor de carbono implica diretamente em um aumento no potencial calorífico (quantidade de calor gerada pela combustão de um determinado volume de rocha). Desta forma, antracitos são combustíveis mais eficientes do que linhitos, hulhas ou turfas e, portanto, são mais relevantes para uso humano (Figura 7).

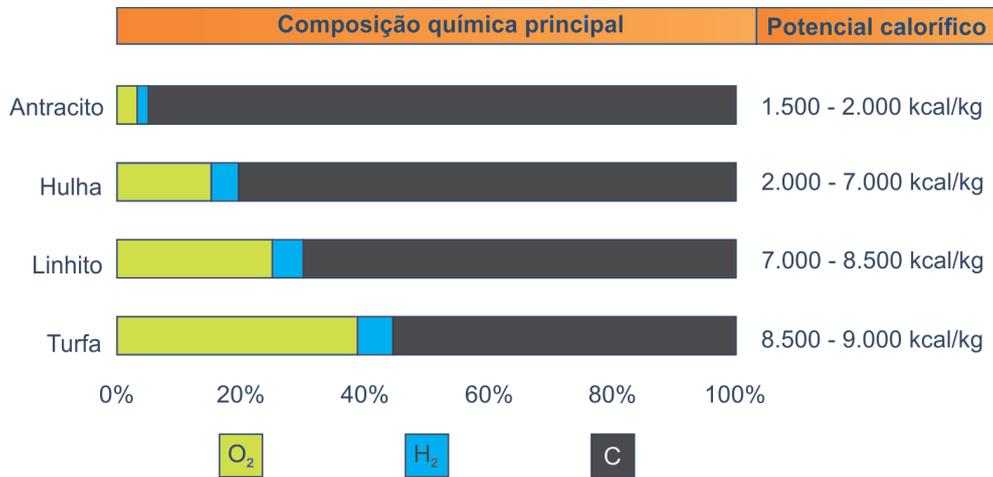


Figura 7. Composição química média e potencial calorífico aproximado dos diferentes tipos de carvão mineral. Fonte: Cano (2009).

O carvão mineral tem papel fundamental na história da civilização moderna, tendo sido um dos primeiros combustíveis utilizados em larga escala pela humanidade. Na Revolução Industrial (séc. XVIII), por exemplo, as máquinas a vapor que mudaram drasticamente os modos de produção humanos funcionavam a partir da queima de carvão mineral. Devido a sua abundância e relativa facilidade de exploração (se comparada à exploração de petróleo, por exemplo), o carvão mineral tem sido historicamente utilizado para a geração de energia elétrica no mundo (vide Figura 1). A combustão do carvão também tem ampla utilização em processos industriais, tais como siderurgia, secagem de produtos, cerâmicas e fabricação de vidros (ANEEL 2008).

O processo de geração elétrica a partir do carvão mineral ocorre nas usinas termelétricas e segue, de maneira sintética, o seguinte roteiro: depois de extraído do solo nas minas, o carvão é transportado à usina termelétrica, onde é transformado em pó. Este pó é então queimado em grandes fornalhas, e o calor liberado por esta queima aquece a água que circula nos tubos que envolvem a fornalha, gerando vapor. O fluxo de vapor é, então, utilizado para movimentar as turbinas de geradores elétricos, convertendo energia cinética em energia elétrica (Figura 8). No Brasil, existem atualmente 26 usinas termelétricas em atividade, fornecendo 3.727 MW, o que representa 2,35% da produção de energia elétrica do país (MME 2018).

Apesar de sua ampla utilização, o uso do carvão mineral tem sofrido crescentes restrições políticas, econômicas e ambientais, sobretudo devido à grande quantidade de gás carbônico emitida no processo de combustão. Desta forma, tem se estabelecido uma tendência mundial de redução na utilização de combustíveis fósseis e sua gradativa substituição por formas de energia limpas e sustentáveis.

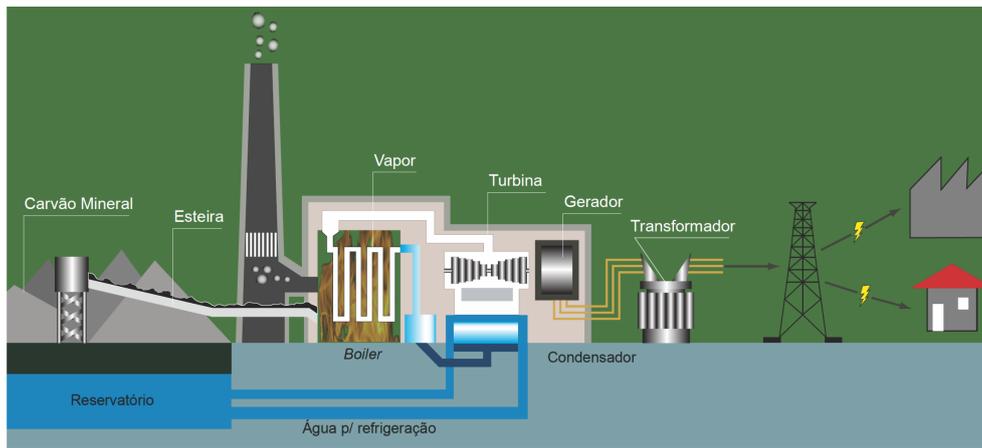


Figura 8. Esquema simplificado do processo de geração de energia elétrica através da combustão do carvão mineral em termelétricas. Fonte: ANEEL (2008).

2.1. Carvão Mineral no Brasil e em Minas Gerais

As primeiras jazidas de carvão mineral no Brasil foram descobertas entre o final do século XVIII e início do século XIX nos atuais estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina, e foram lavradas, à época, para produzir gás e energia elétrica para Porto Alegre. No século XX, a pesquisa e produção de carvão no Brasil foram muito intensificadas, a princípio em decorrência das duas grandes guerras mundiais. Em 1960, após um grande estudo de geração de energia em larga escala, o Brasil inaugurou a usina termelétrica de Candiota (RS), com capacidade de geração de 20 MW (Gomes *et al.* 2003).

As principais jazidas brasileiras de carvão mineral situam-se na região sul do país e estão inseridas na Formação Rio Bonito (Grupo Guatá, Supergrupo Tubarão), unidade de idade permiana que integra a Bacia do Paraná. De acordo com Gomes *et al.* (2003), merecem destaque as jazidas assim denominadas: Sul-Catarinense (SC), Santa Terezinha, Morungava-Chico Lomã, Charqueadas, Leão, Iruí, Capané e Candiota (RS) e Figueira-Sapopema (PR), além das jazidas do Baixo Jacuí (RS).

Em Minas Gerais, são conhecidas poucas ocorrências de carvão mineral. Na região do Quadrilátero Ferrífero ocorrem registros de ao menos duas bacias sedimentares paleógenas que hospedam camadas de linhito (Tabela 1): a Bacia de Gandarela, na região de Santa Bárbara, e a Bacia de Fonseca, na região de Alvinópolis (Figura 9).

Os principais depósitos da Bacia de Fonseca ocorrem nas vizinhanças de Fonseca, distrito de Alvinópolis (MG). As rochas desta bacia recebem a denominação de Formação Fonseca (Maxwell 1972) e jazem sobre um embasamento composto por rochas arqueanas dos Complexos Granito-Gnáissicos e rochas metassedimentares do Supergrupo Minas, de idade paleoproterozoica (Baltazar *et al.* 2005b). Nessa região, as rochas da Formação Fonseca encontram-se conformadas em *grabens* de idade cenozoica, que registram a reativação de antigas estruturas do embasamento (Sant’Anna *et al.* 1997).

Em sua seção-tipo, a Formação Fonseca apresenta um conglomerado basal recoberto por uma sucessão de arenitos, argilitos, siltitos e linhito, culminando em um pacote sedimentar da ordem de 15 metros de espessura. Linhito ocorre na porção basal do pacote, em uma camada principal de cerca de 1 metro de espessura. Essas rochas são interpretadas

como registro de um ambiente fluvial meandrante em clima úmido, desenvolvido na região durante o Eoceno/Oligoceno (Sant’Anna & Schorsch 1997).

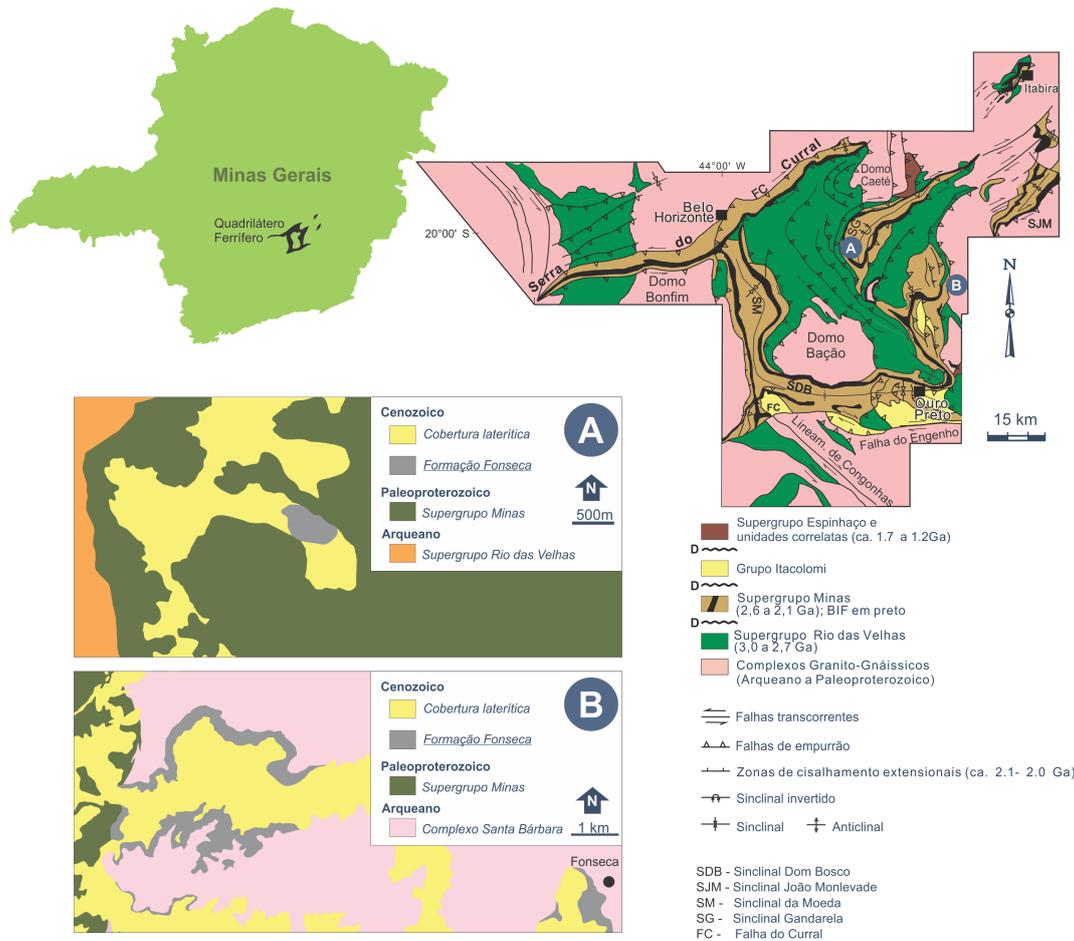


Figura 9. Mapa geológico simplificado do Quadrilátero Ferrífero, modificado de Dalstra & Rosière (2008). **A)** Geologia simplificada da região da Bacia de Gandarela, modificado de Baltazar *et al.* (2005a); **B)** Geologia simplificada da região da Bacia de Fonseca, modificado de Baltazar *et al.* (2005b) e CPRM (1980).

Do ponto de vista econômico, o depósito de linhito mais relevante de Minas Gerais é o que ocorre na Bacia de Gandarela, situada nas proximidades do distrito de Conceição do Rio Acima, município de Santa Bárbara (MG). Esse depósito foi explorado, na década de 70, pela empresa Minerações Brasileiras Reunidas (MBR), através de uma pequena mina a céu aberto que, em seu ápice, chegou a atingir uma dezena de metros de profundidade (Figura 10). A mina encontra-se desativada há vários anos e sua área, hoje de propriedade da empresa Vale S.A., encontra-se tombada pelo município de Santa Bárbara, integrando o chamado "Sítio Natural, Paisagístico e Paleontológico da Bacia do Gandarela".

A Bacia de Gandarela é limitada por falhas normais de direção N e NE e apresenta geometria em *hemi-graben*, com o depocentro em sua porção NE. A bacia encontra-se preenchida por uma sucessão sedimentar de, no mínimo, 125 metros (profundidade máxima de furos de sondagem realizados pela MBR), composta predominantemente por arenito, argilito e linhito (Figura 10C e D), com conglomerado subordinado (e.g. Maizatto 2001; Fanton 2013). Essas rochas são interpretadas como registros de ambientes lacustres e flúvio-deltaicos, ativos nessa região entre os períodos Eoceno e Mioceno. Existem evidências de

tectônica sin-sedimentar e migração do depocentro durante a evolução da bacia (Maizatto 2001).

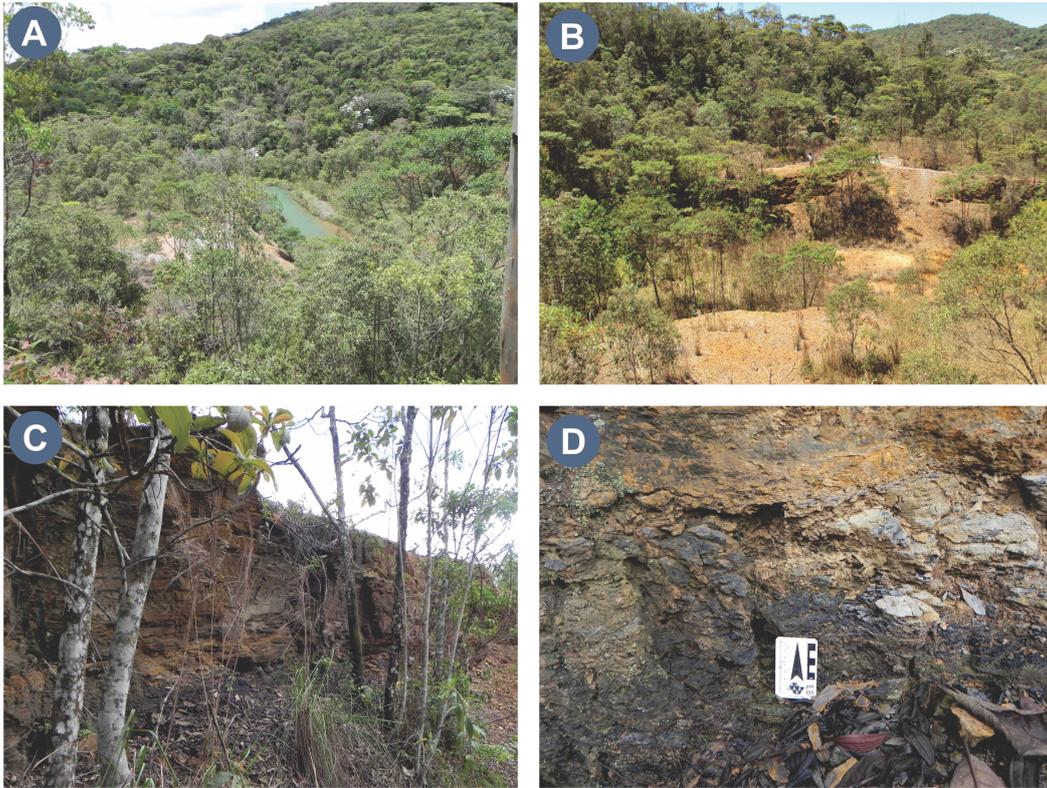


Figura 10. **A)** e **B)** Vistas da mina desativada de linhito na Bacia do Gandarela, em fotografias de 2014. Coordenadas da mina: UTM23S, 638.369E, 7.781.387, WGS84. **C)** e **D)** Detalhes de afloramentos de linhito no interior da mina. Fotos do autor.

Nas rochas das bacias de Fonseca e Gandarela são encontrados abundantes fitofósseis preservados na forma de compressões e impressões de folhas e caules de angiospermas, além de um rico acervo micropaleontológico (Figura 11).

Esse registro fóssil tem sido amplamente estudado, fornecendo importantes informações sobre as condições paleoambientais desta região durante o Eoceno/Oligoceno (ver resultados e síntese bibliográfica em Maizatto 2001 e Fanton 2013).

2.2. Aspectos econômicos do Carvão Mineral

De acordo com a *International Energy Agency* (IEA 2017b), desde 2014 a produção mundial de carvão mineral tem diminuído, fato inédito neste século (Figura 12A). Em 2016 foram produzidas cerca de 7,2 bilhões de toneladas de carvão mineral no mundo, contra 7,7 bilhões de toneladas produzidas no ano anterior.

A República Popular da China foi responsável por cerca de 45% da produção mundial, seguida por Índia (9,7%), Estados Unidos (9,3%), Austrália (6,9%) e Indonésia (6,4%). O Brasil tem uma participação pouco expressiva neste cenário, tendo sido responsável por apenas cerca de 0,1% da produção mundial de carvão mineral em 2016. Nesse ano, o Brasil produziu pouco mais de 7 milhões de toneladas deste recurso, dos quais 61,5% nas jazidas do Rio Grande do Sul, 37,3% em Santa Catarina e 1,2% no Paraná (Figura 12B).

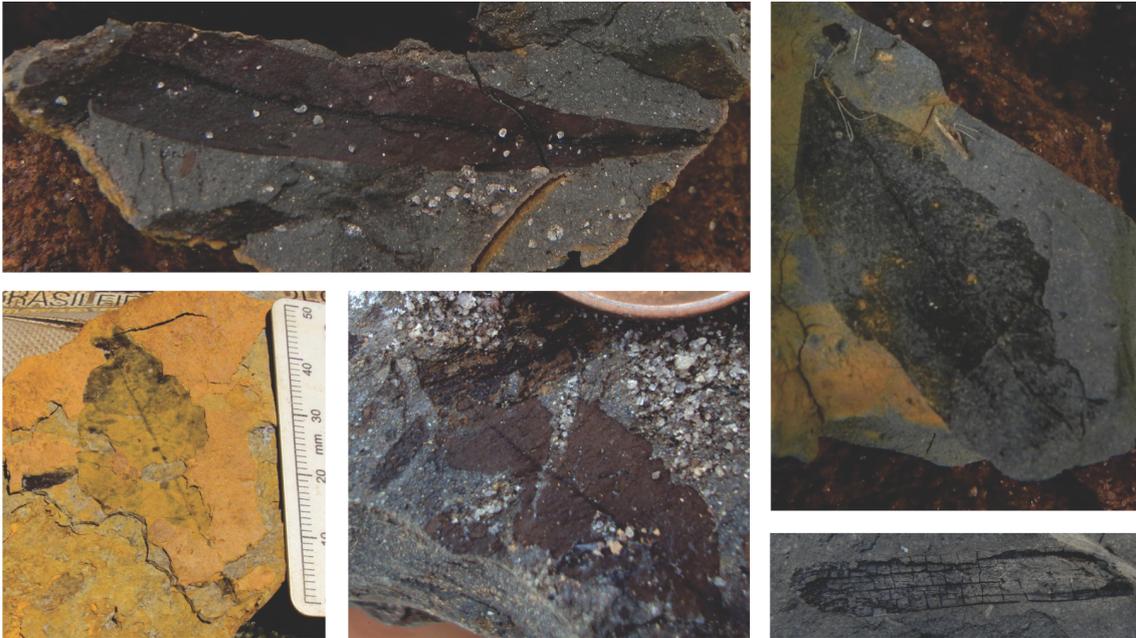


Figura 11. Exemplos de folhas e restos vegetais fósseis coletados nas camadas de linhito da Bacia de Gandarela. Fotos do autor.

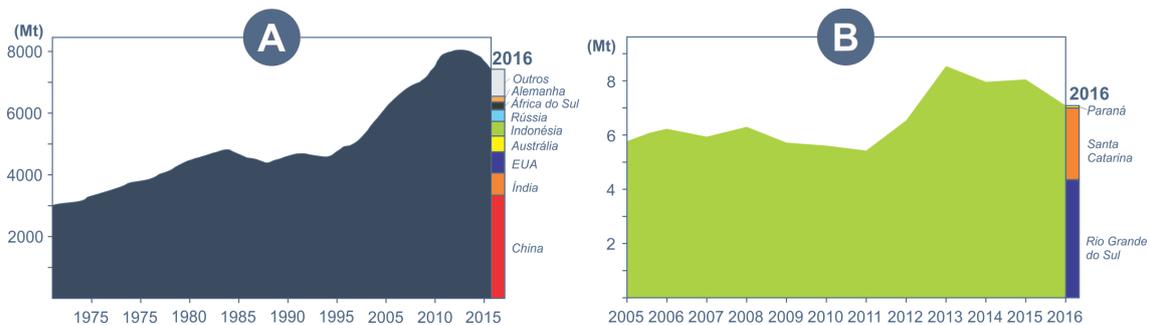


Figura 12. A) Evolução da produção mundial de carvão mineral entre 1970 e 2016, com a composição dos principais países produtores em 2016 (Dados: IEA 2017a). **B)** Evolução da produção brasileira de carvão mineral entre 2005 e 2016, com a composição dos principais estados produtores em 2016 (Dados dos relatórios de Balanço Energético Nacional entre 2007 – 2017, EPE 2007, 2010, 2014, 2017).

Em 2016, os cinco maiores exportadores mundiais de carvão mineral foram Austrália, Indonésia, Rússia, Colômbia e África do Sul, respectivamente. Em contrapartida, os maiores importadores foram China, Índia, Japão, Coreia do Sul e Taiwan (IEA 2017a). Como consequência da produção relativamente pequena, o Brasil não atua como exportador de carvão mineral. De acordo com o Balanço Energético Nacional 2017 (EPE 2017), no ano de 2016 o Brasil importou $6,5 \times 10^6$ toneladas de carvão.

Desde a descoberta do carvão mineral no Brasil e o início da exploração sistemática deste bem, as reservas nacionais têm sido constantemente atualizadas. Após rápida ascensão nas décadas de 70 e 80, as reservas conhecidas de carvão do Brasil atingiram seu ápice na década de 90 em torno de 32×10^9 toneladas, valor que permanece até os dias atuais (EPE 2017). O tamanho das reservas mineiras de carvão mineral, por sua vez, não é bem conhecido. Durante o período de atividade da mina da Bacia de Gandarela, a MBR realizou uma série de furos de sondagem, que indicaram uma reserva provável de 5×10^6 toneladas (CPRM 1980), mas este valor pode variar se revisitado de acordo com as metodologias atuais de mensuração de jazidas.

3. URÂNIO

O urânio (U) é um elemento químico pertencente à série dos actínídeos, que possui massa atômica 238 e número atômico 92. É um metal muito pesado que, à temperatura ambiente, encontra-se em estado sólido e, quando puro, possui cor branca metálica. Na natureza ocorrem diversos isótopos de urânio em concentrações diferentes, sendo mais comuns o ^{238}U (99,27%) e o ^{235}U (0,72%).

O urânio foi descoberto em 1789 pelo farmacêutico alemão Martin Klaproth e, mais de cem anos depois, foi o primeiro elemento em que se descobriu a radioatividade. Essa descoberta, feita em 1896 pelo físico francês Antoine Henri Becquerel, foi extremamente importante, e seus desdobramentos estão diretamente ligados ao uso moderno deste elemento.

O urânio é um elemento relativamente abundante na Terra, ocorrendo em pequenas concentrações em quase todos os tipos de rocha. No entanto, em alguns minerais o urânio é encontrado em maior concentração, e as rochas ricas nestes minerais são utilizadas como minério deste elemento. A uraninita (UO_2) é um óxido de urânio e é o principal mineral de minério deste elemento (Figura 13A), apresenta cor cinza escura ou preta, brilho submetálico e pode formar belos cristais. Devido ao decaimento radioativo do urânio, pode conter proporções diversas de chumbo, bem como traços de hélio. A carnotita ($\text{K}_2(\text{UO}_2)_2(\text{VO}_4)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$), outro importante mineral de urânio, é um vanadato de potássio e urânio, também usado como minério secundário de vanádio. Apresenta coloração amarela intensa e ocorre principalmente com hábito terroso, sem cristais visíveis. Entretanto, quando bem formada, pode apresentar-se na forma de belos cristais micáceos (Figura 12B).

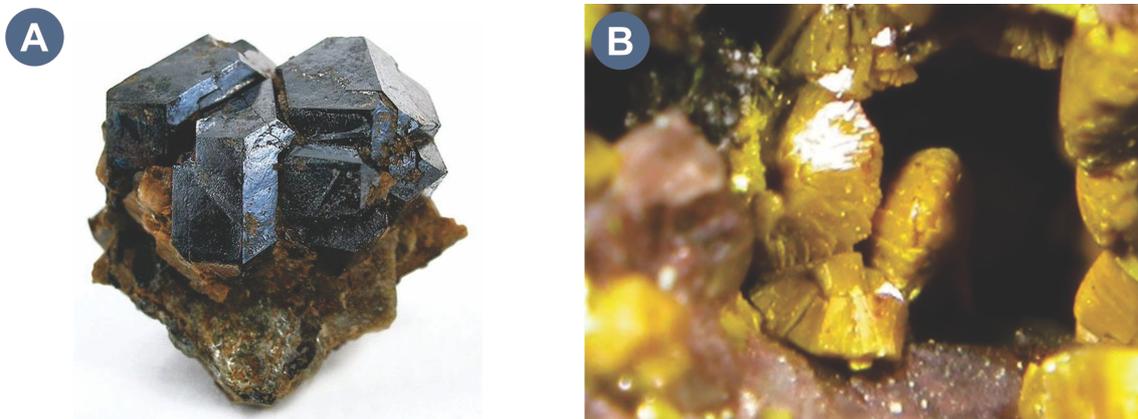


Figura 13. Fotografias ilustrativas dos principais minerais de urânio. **A)** Uraninita. Fonte: Rob Lavinsky, iRocks.com. **B)** Carnotita. Fonte: Rob Lavinsky, iRocks.com.

Os átomos de elementos radioativos, como o urânio, são instáveis e estão constantemente liberando energia na forma de radiação, através da emissão de partículas subatômicas (alfa, beta ou gama). Este processo, chamado de decaimento radioativo, faz com que estes átomos se convertam em átomos de outros elementos, chamados de “elementos radiogênicos”.

Por sua instabilidade, os átomos de urânio, em especial o ^{235}U , podem ser submetidos a um processo chamado de fissão nuclear. Quando bombardeados por nêutrons, os átomos

de ^{235}U são excitados e se partem, dando origem a dois átomos mais leves (como, por exemplo, ^{92}Kr e ^{141}Ba), radiação gama e alguns nêutrons (Figura 14). Esse processo libera uma grande quantidade de energia, que pode ser usada de diversas formas como, por exemplo, na produção de energia elétrica, na propulsão naval ou em armamentos nucleares.

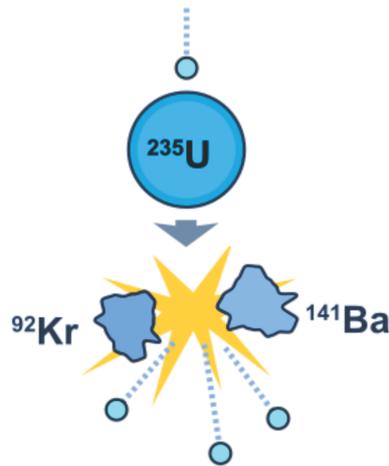


Figura 14. Diagrama simplificado ilustrando o processo de fissão nuclear. Modificado de: [Wikimedia Commons](#).

A grande vantagem da energia nuclear e, em especial, do urânio, reside em sua grande eficiência energética, se comparada à de outros recursos energéticos. Como exemplo, com 1 kg de urânio é possível gerar aproximadamente 50.000 kWh de energia elétrica, enquanto 1 kg de carvão mineral ou de petróleo podem gerar entre 3 a 4 kWh (Pires 2013).

A geração de energia elétrica a partir do urânio segue um roteiro parecido com o que ocorre nas termelétricas (Figura 15).

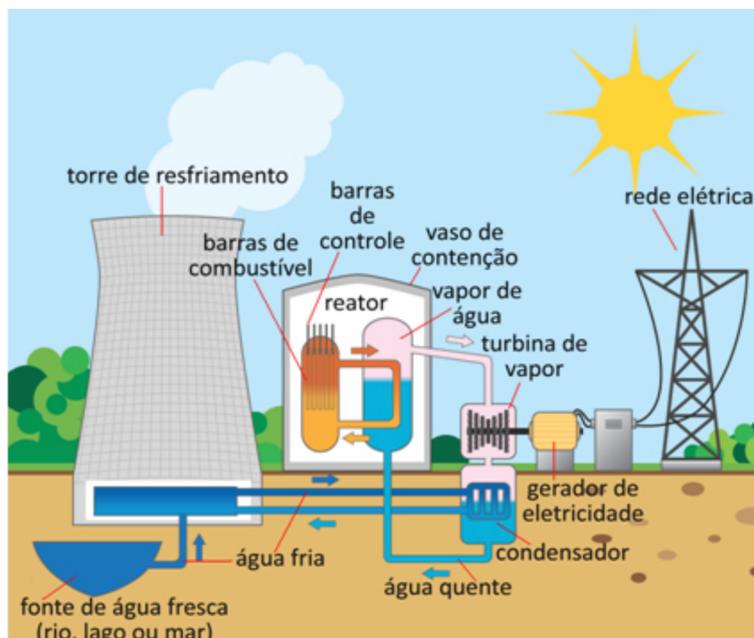


Figura 15. Desenho esquemático ilustrando a geração de energia elétrica em uma usina nuclear. Fonte: [Mundo Educação](#).

Após lavrado, o minério de urânio é processado de modo a se obter um concentrado de óxidos de urânio (popularmente chamado de "yellowcake"), composto predominantemente por U_3O_8 . Esse material serve de matéria prima para o processo de

enriquecimento do urânio, através do qual se aumenta a proporção do isótopo ^{235}U no material, de modo potencializar sua fissibilidade. O urânio enriquecido é levado aos reatores, onde é submetido a processos controlados de fissão nuclear, que liberam grande quantidade de energia na forma de calor. O calor emitido é utilizado para aquecer água e gerar vapor que, por sua vez, movimentam turbinas geradoras de energia elétrica (ANEEL 2008).

3.1. Depósitos de Urânio

Apesar de urânio ocorrer em pequenas quantidades em grande parte das rochas terrestres, sua exploração enquanto recurso mineral depende da descoberta de rochas e situações geológicas específicas em que este elemento esteja presente em concentrações mais altas. Quando isto ocorre e a rocha apresenta uma concentração tal de urânio que viabilize sua exploração comercial, ela pode ser classificada como *minério de urânio*. Em geral, os minérios de urânio apresentam uraninita como mineral mais importante, mas outros minerais que têm urânio na composição também podem estar presentes, como a carnotita, a autunita e a torbenita.

Os processos geológicos que podem levar à formação de um depósito de urânio são diversos. De acordo com a *International Atomic Energy Agency* (Agência Internacional de Energia Atômica), os depósitos de urânio podem ser classificados em pelo menos 15 tipos diferentes, que incluem desde a concentração por processos sedimentares até a formação de jazidas por processos magmáticos, metassomáticos ou intempéricos (IAEA 2018). Por essa gênese diversificada, depósitos de urânio podem ser encontrados junto a vários tipos de rochas, como granitos, brechas, conglomerados e arenitos, e também junto a materiais superficiais inconsolidados.

Os dois recursos minerais apresentados neste capítulo (carvão mineral e urânio) também ocorrem, por vezes, associados na natureza. Em média, o carvão mineral apresenta urânio em concentrações próximas a 2,4 mg/kg, mas este valor pode ultrapassar os 200 mg/kg em alguns casos, passando a apresentar importância econômica (Chen *et al.* 2017). Os processos naturais que levam ao enriquecimento de urânio em depósitos de carvão mineral são diversos, mas merecem destaque a lixiviação das áreas fonte, o acúmulo de cinzas vulcânicas e a circulação de fluidos hidrotermais.

As principais jazidas de urânio do mundo estão localizadas no Cazaquistão, na Austrália e no Canadá, locais onde também se situam as maiores minas de urânio. De acordo com o *World Nuclear Association* (Associação Nuclear Mundial), as duas maiores minas atualmente em atividade são as minas de *McArthur River*, no Canadá, e de *Tortkuduk & Moinkum*, no Cazaquistão, que em 2014 produziram 7356 e 4322 toneladas de urânio, respectivamente (o que corresponde a 21% da produção mundial naquele ano). É importante mencionar que, em algumas situações, o urânio pode ser obtido como subproduto em minas de outros recursos minerais. É o caso, por exemplo, da mina *Olympic Dam*, na Austrália, que é uma das mais importantes minas de cobre do mundo, mas também produz urânio em grandes quantidades, além de ouro e prata.

Em 2016, o Brasil possuía reservas conhecidas de urânio da ordem de 309.370 toneladas (EPE 2017), constituindo a quinta maior reserva mundial. De acordo com Pires (2013), estas reservas estão distribuídas principalmente nos depósitos de Santa Quitéria, no Ceará (58%), Lagoa Real/Caetité, na Bahia (41%), e Caldas (Tabela 1), em Minas Gerais (2%).

No depósito de Santa Quitéria, o urânio está associado a depósitos de fosfato, hospedado em mármore, gnaisses e episienitos do Complexo Caicó (Pires 2013). Já em Lagoa Real/Caetité, o depósito de urânio tem origem hidrotermal e está hospedado em albitos relacionados ao Complexo Granítico Gnáissico de Lagoa Real (Lobato *et al.* 2015).

Em Minas Gerais, o mais importante depósito de urânio localiza-se na região de Poços de Caldas, no sudoeste do estado. O depósito está associado a um conjunto de rochas alcalinas de natureza vulcânica, que compõem o Complexo Alcalino de Poços de Caldas (Figura 16). Essas rochas ocorrem em um conduto vulcânico de aproximadamente 30 km de diâmetro e ocupam mais de 800 km², configurando a maior chaminé alcalina do Brasil (Grohmann *et al.* 2007).

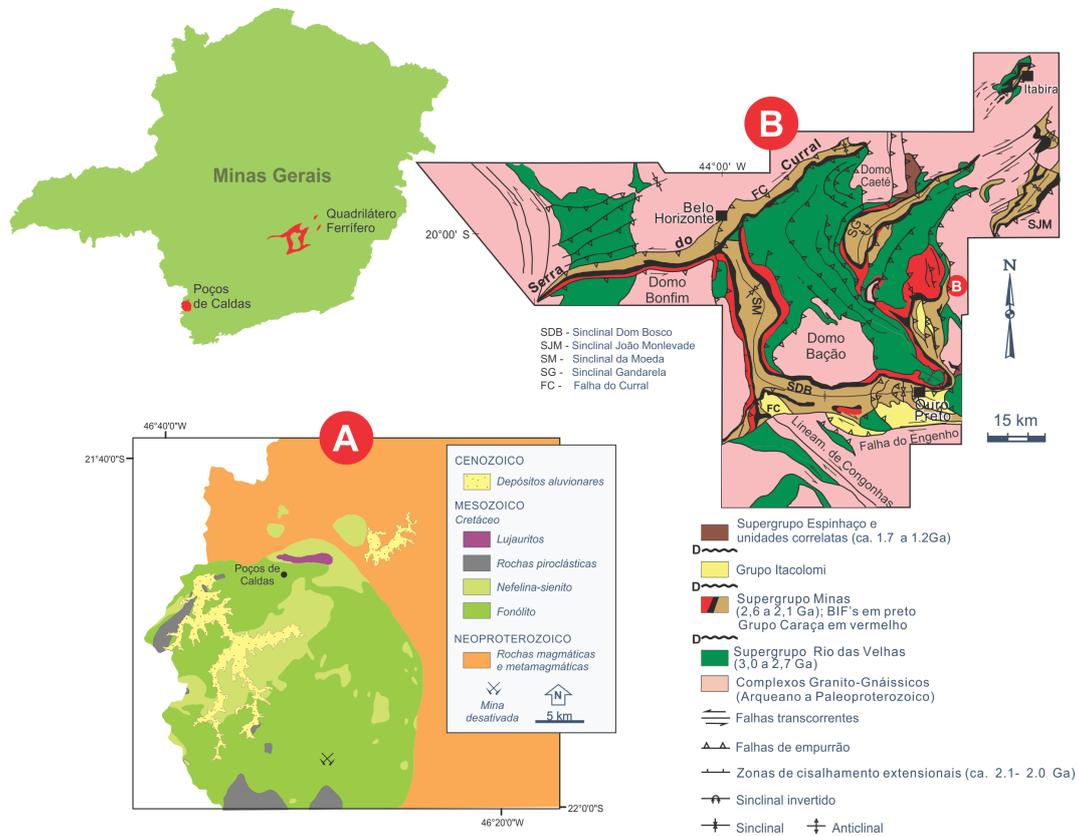


Figura 16. Principais depósitos e ocorrências de urânio em Minas Gerais. **A)** Mapa geológico da porção mineira do Complexo Alcalino de Poços de Caldas (modificado de Tedeschi *et al.* 2015); **B)** Mapa geológico simplificado do Quadrilátero Ferrífero, com destaque para as principais áreas de ocorrência do Grupo Carajá, unidade que contém a Formação Moeda (modificado de Dalstra & Rosière 2008).

O Complexo Alcalino de Poços de Caldas registra um grande evento magmático que ocorreu durante o período cretáceo, entre 75 e 90 milhões de anos atrás. Nesse processo são formados diferentes tipos de rochas alcalinas (Figura 16A), como fonolitos, nefelina sienitos, lujauritos e rochas de natureza piroclástica (Waber *et al.* 1992). Neste contexto, a mineralização de urânio está relacionada à circulação de fluidos hidrotermais, ocorrida cerca de 85 milhões de anos atrás (Takenaka *et al.* 2015).

Em 1982, foi inaugurada a primeira mina de urânio do Brasil: a mina de *Osamu Utsumi*, a sul da cidade de Poços de Caldas (Figura 17A), onde a mineralização de urânio se dá em veios contendo uraninita, pirita, zirconita, fluorita e jordisita (Pires 2013). As atividades na mina, desenvolvidas pela INB - Indústrias Nucleares Brasileiras, duraram até 1995, quando o depósito foi considerado inviável economicamente. Na mesma instalação, foi construída uma unidade de tratamento de minérios e o Laboratório Ambiental de Análises Químicas e Radiológicas, que atua até hoje no monitoramento ambiental da área afetada pelas atividades de mineração (Figura 17B).



Figura 17. A) Estado atual da mina de urânio desativada, em Poços de Caldas. Fonte: Senado Notícias 2015. **B)** Instalações da unidade de Caldas. Fonte: INB.

Minas Gerais possui ainda outra ocorrência relevante de urânio, na Formação Moeda (Grupo Caraça, Supergrupo Minas), unidade que ocorre em vários pontos do Quadrilátero Ferrífero (Figura 16B). A Formação Moeda é a unidade basal do Supergrupo Minas, e é composta por metaconglomerados, quartzitos e filitos, cuja idade remonta ao Paleoproterozoico (Alkmim & Teixeira 2017). Na base da unidade ocorrem metaconglomerados que apresentam ouro e uraninita, além de brannerita e arseniatos de urânio (Guimarães *et al.* 2016), em mineralização semelhante à que ocorre nos conglomerados de Witwatersrand, na África do Sul.

No contexto da Formação Moeda, merecem destaque as ocorrências descritas nas serras das Gaivotas e do Gandarela (Tabela 1), já estudadas pela Nuclebrás (extinta “Empresas Nucleares Brasileiras”). Os teores de urânio relativamente baixos (aproximadamente 0,03% U_3O_8) e a distribuição irregular das lentes de metaconglomerado (Pires 2013) fazem com que as ocorrências sejam consideradas desfavoráveis para a exploração no momento.

3.2. Aspectos econômicos do Urânio

Nos últimos dez anos, a produção anual mundial de urânio tem aumentado consistentemente, atingindo a marca de 62.366 toneladas em 2016 (Figura 18A). De acordo com a *World Nuclear Association* (Associação Nuclear Mundial), nesse mesmo ano, os cinco maiores produtores foram o Cazaquistão (39%), Canadá (23%), Austrália (10%), Níger (6%) e Namíbia (6%).

De acordo com o artigo 177 da Constituição Brasileira de 1988, “a pesquisa, a lavra, o enriquecimento, o reprocessamento, a industrialização e o comércio de minérios e minerais nucleares” constituem monopólio da União. Com o objetivo de se concentrar todos os processos relacionados à produção dos insumos nucleares foi criada, também em 1988, a Indústrias Nucleares do Brasil S.A. (INB), vinculada à Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN). A INB é hoje a única empresa autorizada a realizar a mineração e beneficiamento do urânio no Brasil e, desde 1995, a mineração de urânio passou a ocorrer apenas na mina de Caetité/Lagoa Real.

Ao longo dos últimos dez anos, a produção brasileira de urânio oscilou bastante, atingindo um pico de 415,1 toneladas no ano de 2011 (Figura 18B). Atualmente, a produção de urânio no Brasil encontra-se paralisada devido a problemas de licenciamento dos empreendimentos, mas há perspectiva de que as atividades sejam retomadas ainda no primeiro semestre de 2018, segundo entrevista do presidente da INB ao jornal Valor Econômico, em 15 de fevereiro de 2018 (Polito 2018).

O Brasil possui atualmente duas usinas nucleares em funcionamento, Angra 1 e Angra 2, localizadas no estado do Rio de Janeiro, que juntas fornecem 1990 MW, cerca de 1,25% da energia elétrica produzida no país (MME 2018). Uma terceira usina, chamada de Angra 3, está em construção no mesmo complexo das anteriores desde 1984, mas devido a inúmeras paralisações, não tem previsão de inauguração.

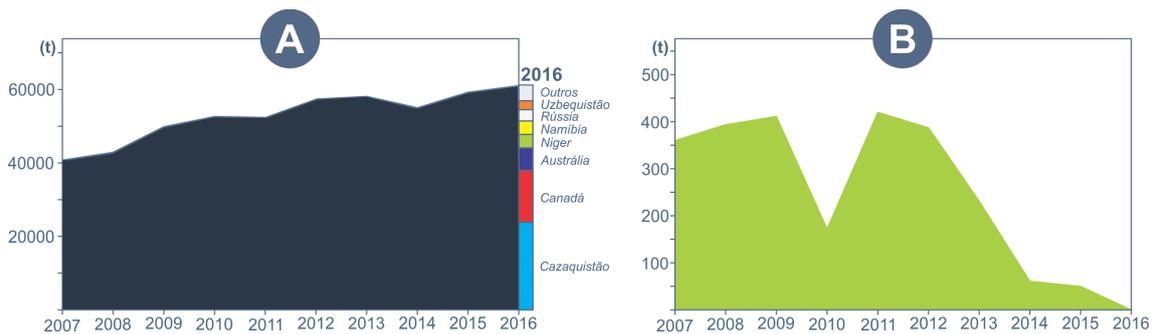


Figura 18. A) Evolução da produção mundial de urânio entre 2007 e 2016, com ênfase para os maiores países produtores no ano de 2016. Fonte: *World Nuclear Association*. **B)** Evolução da produção brasileira de urânio entre 2007 e 2016. Fonte: *EPE (2017)*.

Segundo a *World Nuclear Association* (Associação Nuclear Mundial), no ano de 2015 as reservas conhecidas de urânio no mundo situavam-se em 5.718.400 toneladas, concentradas principalmente na Austrália (29%), Cazaquistão (13%), Canadá (9%), Rússia (9%) e África do Sul (6%).

Semelhantemente ao que ocorre com o carvão mineral, entre as décadas de 70 e 80 houve grande aumento das reservas conhecidas de urânio do Brasil, culminando, na década de 90, em reservas da ordem de 309.000 toneladas, valor que permanece atual (EPE 2017).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alkmim F.F. & Teixeira W. 2017. The Paleoproterozoic Mineiro Belt and the Quadrilátero Ferrífero. *In: Heilbron M., Cordani U.G., Alkmim F.F. (eds.). São Francisco craton, eastern Brazil. Tectonic Genealogy of a Miniature Continent. Regional Geology Reviews, Springer International Publishing Co., p. 71-94. ISBN: 9783319017150, doi: 10.1007/978-3-319-01715-0_5*
- ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. 2008. *Atlas de Energia Elétrica do Brasil*. 3ª ed. Brasília. 236p. ISBN: 9788587491107
- Baltazar O.F., Baars F.J., Lobato L.M., Reis L.B., Achtschin A.B., Berni G.V., Silveira V.D. 2005a. Mapa Geológico Gandarela na Escala 1:50.000 com Nota Explicativa. *In: Lobato L.M., Baltazar O.F., Reis L.B., Achtschin A.B., Baars F.J., Timbó M.A., Berni G.V., Mendonça B.R.V., Ferreira D.V. 2005. Projeto Geologia do Quadrilátero Ferrífero - Integração e Correção Cartográfica em SIG com Nota Explicativa. Belo Horizonte, CODEMIG, CD-ROM.*
- Baltazar O.F., Baars F.J., Lobato L.M., Reis L.B., Achtschin A.B., Berni G.V., Silveira V.D. 2005b. Mapa Geológico Catas Altas na Escala 1:50.000 com Nota Explicativa. *In: Lobato L.M., Baltazar O.F., Reis L.B., Achtschin A.B., Baars F.J., Timbó M.A., Berni G.V., Mendonça B.R.V., Ferreira D.V. 2005. Projeto Geologia do Quadrilátero Ferrífero - Integração e Correção Cartográfica em SIG com Nota Explicativa. Belo Horizonte, CODEMIG, CD-ROM.*
- Branco P.M. 2014. *Carvão Mineral*. CPRM - Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais. Rede de Bibliotecas - Rede Ametista - Canal Escola. Disponível em <http://www.cprm.gov.br/publique/Redes-Institucionais/Rede-de-Bibliotecas---Rede-Ametista/Canal-Escola/Carvao-Mineral-2558.html>. Acesso em 11/5/2018.
- Cano T.M. 2009. Mineração de Energia – Carvão Mineral. *In: Rodrigues A.F.S. (coord.). Economia Mineral do Brasil*. Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM). Brasília, p. 51-69.
- Chen J., Chen P., Yao D., Huang W., Tang S., Wang K., Liu W., Hu Y., Zhang B., Sha J. 2017. Abundance, Distribution, and Modes of Occurrence of Uranium in Chinese Coals. *Minerals*, **7**(12):239. doi: 10.3390/min7120239
- CPRM – Serviço Geológico do Brasil. 1980. *Anteprojeto Linhito na Bacia Fonseca*. Relatório Interno, 16p.
- Dalstra H.J. & Rosière C.A. 2008. Structural Controls on High-Grade Iron Ores Hosted by Banded Iron Formation: A Global Perspective. Society of Economic Geologists. *In: Hagemann S., Rosière C.A., Gutzmer J., Beukes N.J. Banded Iron Formation-Related High-Grade Iron Ore*. Society of Economic Geologists. **15**(03):73-106. ISBN: 9781934969076, doi: 10.5382/Rev.15.03.
- EPE - Empresa de Pesquisa Energética. 2007. ME - Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética. *Balanco Energético Nacional 2007: Ano Base 2006*. Rio de Janeiro, 194 p. ISS 0101-6636
- EPE - Empresa de Pesquisa Energética. 2010. MME - Ministério de Minas e Energia. *Balanco Energético Nacional 2010: Ano Base 2009*. Rio de Janeiro, 276 p.
- EPE – Empresa de Pesquisa Energética. 2014. MME - Ministério de Minas e Energia. *Balanco Energético Nacional 2014: Ano Base 2013*. Rio de Janeiro, 288 p.
- EPE – Empresa de Pesquisa Energética. 2017. MME - Ministério de Minas e Energia. *Balanco Energético Nacional 2017: Ano Base 2016*. Rio de Janeiro, 296 p.
- Fanton J.C.M. 2013. *Reconstruindo as florestas tropicais úmidas do Eoceno–Oligoceno do sudeste do Brasil (Bacias de Fonseca e Gandarela, Minas Gerais) com folhas de Fabaceae, myrtaceae e outras angiospermas: origens da Mata Atlântica*. Tese de doutorado, Universidade Estadual de Campinas, 433 p.
- Gomes A.J.P., Cruz P.R., Borges L.P. 2003. Parte IV - Recursos Minerais Energéticos: Carvão e Urânio. *In: Bizzi L.A., Schobbenhaus C., Vidotti R.M., Gonçalves J.H. (eds.). Geologia, Tectônica e Recursos Minerais do Brasil*. CPRM, Brasília. p. 577-628. ISBN: 8523007903

- Grohmann C.H., Riccomini C., Alves F.M. 2007. SRTM-based morphotectonic analysis of the Poços de Caldas Alkaline Massif, southeastern Brazil. *Computers & Geosciences*, **33**(1):10–19. doi: 10.1016/j.cageo.2006.05.002
- Guimarães F.S., Rios F.J., Freitas M.E., Lopes N.B., Amorim L.E.D., Pedrosa T.A., Palmieri H.E.L. 2016. Origem e composição dos minerais de urânio da mineralização tipo Witwatersrand da Formação Moeda, Serra do Gandarela, Quadrilátero Ferrífero (MG). 48º Congresso Brasileiro de Geologia, Porto Alegre, *Anais...* 382 p. ISBN: 9788599198131.
- IAEA – International Atomic Energy Agency. 2018. *Geological classification of uranium deposits and description of selected examples*. Viena, 430p. Disponível em https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/TE1842_web.pdf. Acesso em 3/5/2018
- IEA – International Energy Agency. 2017a. *Key world energy statistics 2017*. 97 p. ISBN: 979264283213.
- IEA – International Energy Agency. 2017b. *Coal information: overview*. 500 p. ISBN: 9789264278172.
- Lobato L.M., Pimentel M.M., Cruz S.C.P., Machado N., Noce C.M., Alkmim F.F. 2015. U-Pb geochronology of the Lagoa Real uranium district, Brazil: Implications for the age of the uranium mineralization. *Journal of South American Earth Sciences*, **58**:129-140. doi: 10.1016/j.jsames.2014.12.005
- Maizatto J.R. 2001. *Análise bioestratigráfica, paleoecológica e sedimentológica das bacias terciárias do Gandarela e Fonseca - Quadrilátero Ferrífero - Minas Gerais, com base nos aspectos palinológicos e sedimentares*. Tese de doutorado, Universidade Federal de Ouro Preto, Minas Gerais, Brasil. 333 p.
- Maranhão C.M.L. 1979. *Os conglomerados uraníferos da Formação Moeda, Quadrilátero Ferrífero - Minas Gerais - Brasil*. Dissertação de mestrado. Instituto de Geociências, Universidade de Brasília.
- Maxwell C.H. 1972. Geology and ore deposits of the Alegria District, Minas Gerais, Brasil. Washington, *United States Geological Survey Professional Papers*, 341-J, 72 p.
- MME - Ministério de Minas e Energia - BRASIL 2018. *Boletim Mensal de Monitoramento do Sistema Elétrico Brasileiro - Fevereiro/2018*. Brasília. 32 p.
- Pires F.R.M. 2013. *Urânio no Brasil: geologia, jazidas e ocorrências*. Eletrobrás Eletronuclear. Rio de Janeiro. 299 p. ISBN: 9788588071025
- Pinto C.P. & Silva M.A. 2014. *Mapa Geológico do Estado de Minas Gerais, Escala 1:1.000.000*. Companhia de Desenvolvimento Econômico de Minas Gerais, CODEMIG e Serviço Geológico do Brasil, CPRM.
- Polito R. 2018. INB quer retomar extração de urânio e lançar um PDV. *Valor Econômico*. 15/2/2018. Disponível em <https://www.valor.com.br/empresas/5322579/inb-quer-retomar-extracao-de-uranio-e-lancar-um-pdv>. Acesso em 11/5/2018.
- Sant'Anna L.G. & Schorscher H.D. 1997. Estratigrafia e mineralogia dos depósitos cenozoicos da região da Bacia de Fonseca, Estado de Minas Gerais. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, **69**(2):211-226.
- Sant'Anna L.G., Schorscher H.D., Riccomini C. 1997. Cenozoic tectonics of the Fonseca Basin Region, eastern Quadrilátero Ferrífero, MG, Brazil, *Journal of South American Earth Sciences*, **10**(3-4):275-284. doi: 10.1016/S0895-9811(97)00016-3
- Senado Notícias. 2015. *PEC quebra monopólio estatal sobre minérios nucleares*. Disponível em <https://www12.senado.leg.br/noticias/materias/2015/09/25/pec-quebra-monopolio-estatal-sobre-minerios-nucleares>. Acesso em 10/5/2018.
- Takenaka L.B., Lana C., Scholz R., Nalini Jr. H.A., Abreu A.T. 2015. Optimization of the *in-situ* U-Pb age dating method via LA-Quadrupole-ICP-MS with applications to the timing of U-Zr-Mo mineralization in the Poços de Caldas Alkaline Complex, SE Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, **62**:70-79. doi: 10.1016/j.jsames.2015.04.007
- Tedeschi M.F., Novo T.A. Azevedo R.A., Amaral L.F.S., Degler R., Vieira P.L.N.C.R. 2015. Mapa geológico: Folha Caldas SF.23-V-D-IV, Folha Poços de Caldas SF.23-V-C-VI, 1:100.000. In: *Projeto Fronteiras de Minas*, Belo Horizonte, UFMG-IGC-CPMTC-CODEMIG.

- Waber N., Schorscher H.D., Peters Tj. 1992. Hydrothermal and supergene uranium mineralization at the Osamu Utsumi mine, Poços de Caldas, Minas Gerais, Brazil. *Journal of Geochemical Explotation*, **45**(1-3):53-112. doi: 10.1016/0375-6742(92)90122-O
- World Nuclear Association. 2017. World Uranium Mining Production (Updated February 2017). Disponível em <http://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/mining-of-uranium/world-uranium-mining-production.aspx>. Acesso em 2/5/2018.