

# Adversidades e Oportunidades na Transição para a Energia Sustentável: Explorando as Tecnologias Nucleares

International Nuclear Atlantic Conference (INAC) - 2024

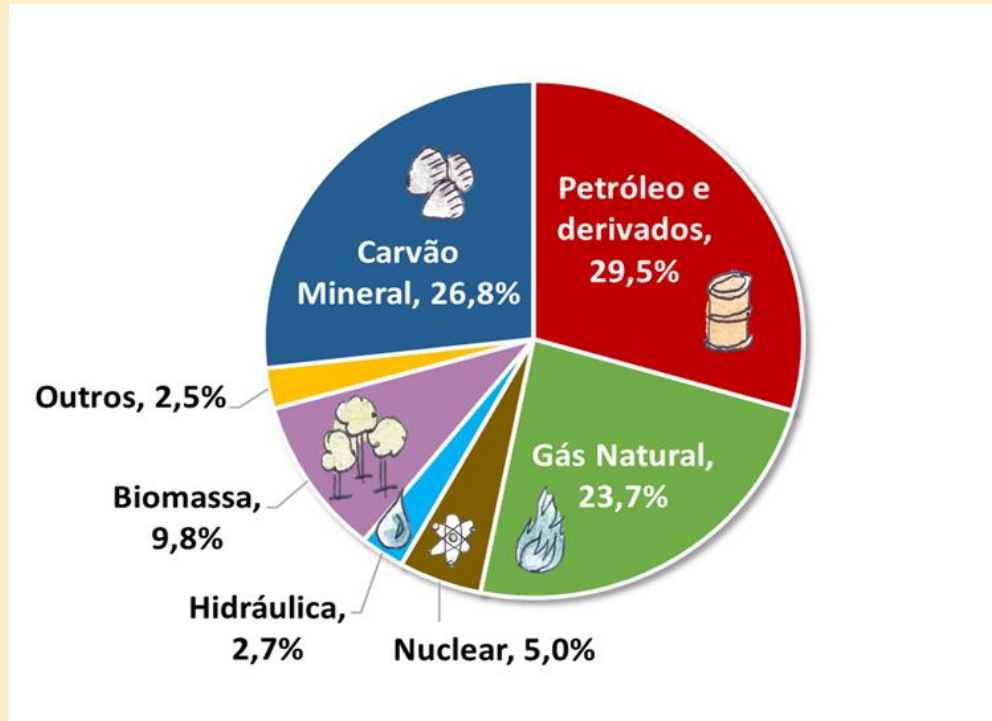
Escola de Guerra Naval

Rio de Janeiro

**José Mauro Esteves dos Santos**  
**Agência Nacional de Mineração - ANM**

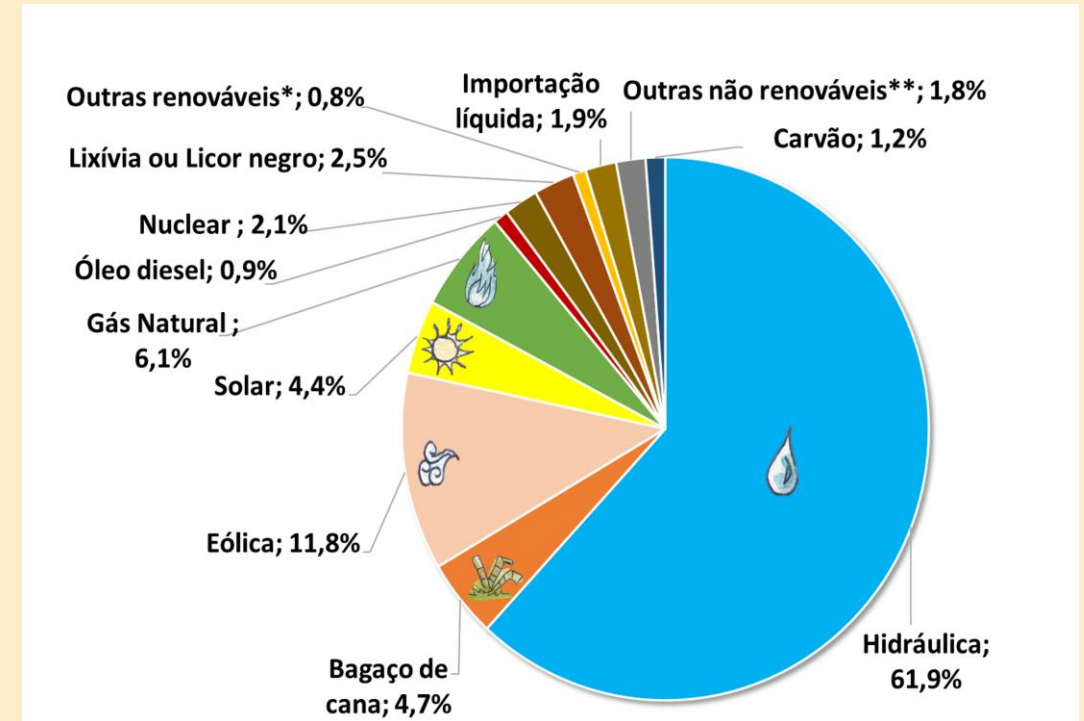
# Oportunidades na Transição para a Energia Sustentável

## Matriz Elétrica Mundial



(Fonte: IEA, 2022; total em 2020: 27 milhões de GWh)

## Matriz Elétrica Brasileira



Fonte: (BEN, 2023; total em 2022: 677 TWh  
(\*incluindo lenha, biodiesel e outras renováveis; \*\*incluindo óleo combustível, gás de coqueria, outras secundárias e outras não renováveis)

# Segurança Energética – evitar instabilidades no Sistema Integrado - SI

- Em 15/8/23, ocorreu a queda no fornecimento de **19 mil MWe**, cerca de 27% da carga total (73 mil MWe), devido à **falha no desempenho de equipamentos de parques eólicos e solares**, localizados próximos à linha de transmissão Quixadá – Fortaleza II, no Ceará.
- O “blackout” afetou **25 estados e o Distrito Federal** e cerca de **29 milhões de brasileiros** ficaram sem energia.

# Oportunidades

# Oportunidades na transição energética

- A transição energética com base na energia nuclear cria dois tipos de oportunidades principais:
  - **No campo interno** – trazer mais segurança para o Sistema Integrado de geração;
  - **No campo externo ou internacional** – participar do mercado internacional de urânio e do combustível nuclear.

# Oportunidades na transição energética no campo interno

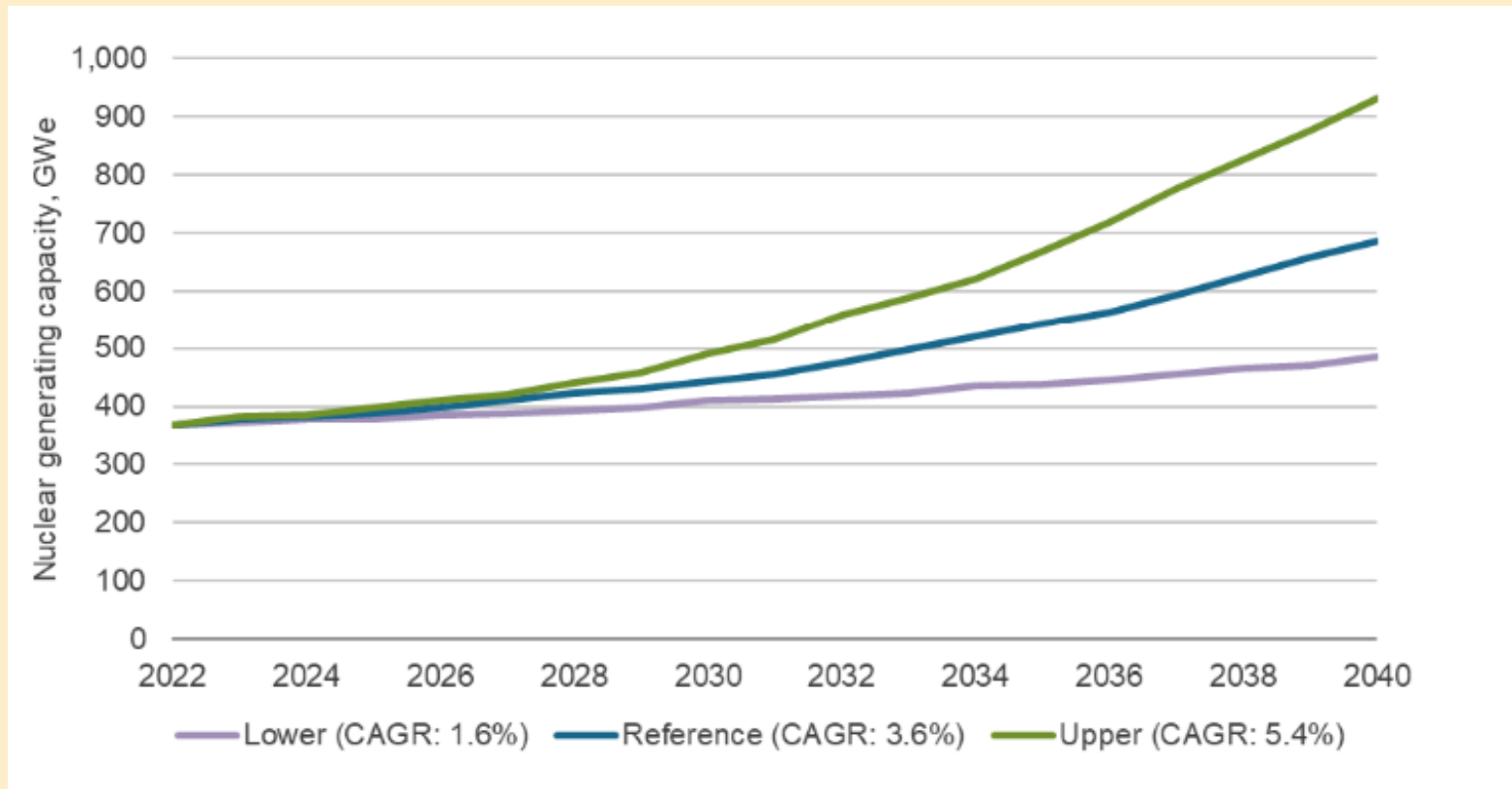
O aumento do percentual de energia nuclear na matriz elétrica traria maior estabilidade ao Sistema Integrado:

- Permitiria a utilização das reservas brasileiras de urânio;
- Permitiria a melhoria da cadeia de suprimentos do setor nuclear;
- Traria a volta da formação de recursos humanos para a área nuclear;
- Beneficiaria a formação técnica e científica no setor nuclear.

# Oportunidades na transição energética no campo externo

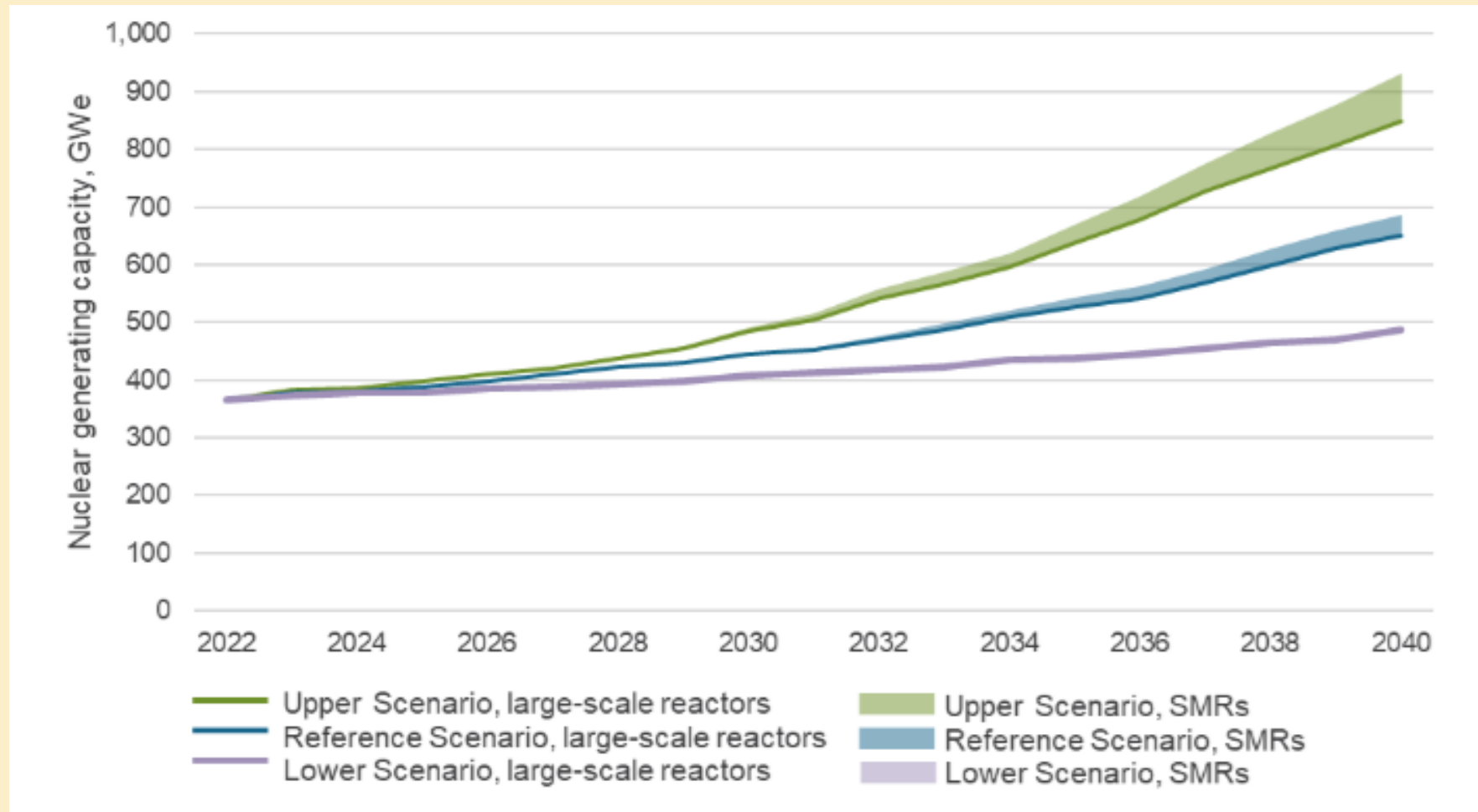
- Em junho de 2023, havia 437 usinas nucleares em operação no mundo, que representam uma capacidade instalada de 391 Gwe.
  - Além disso, havia 63 usinas em construção (64 GWe), na Ásia, extremo Oriente, Europa, América do Norte e do Sul e África.
  - Permitiria a participação brasileira no imenso mercado de combustível nuclear que está se formando a partir da transição energética.
- Fonte: The Nuclear Fuel Report – WNA – 2023).

# Cenários de Geração Nuclear em função da transição energética

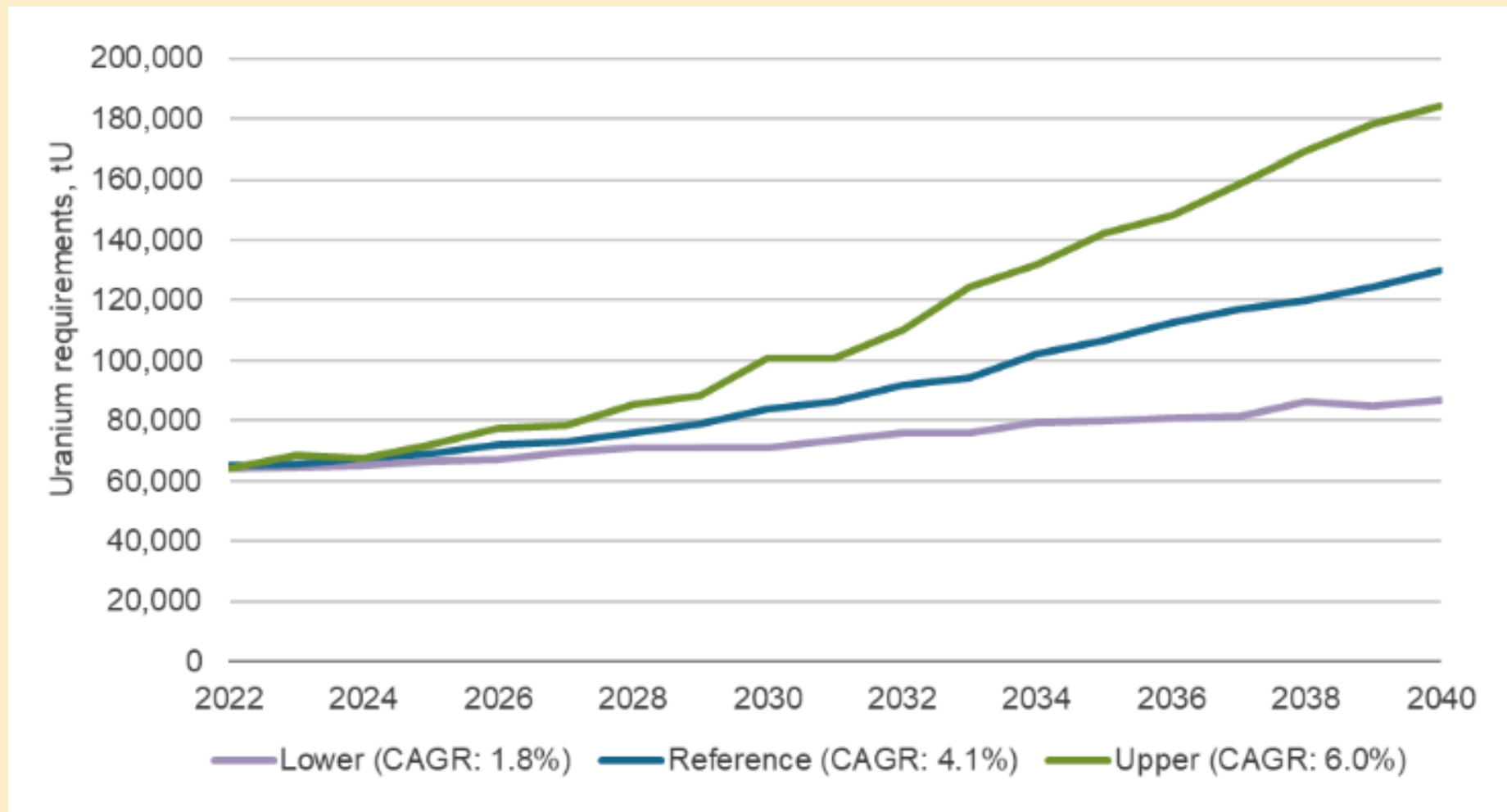




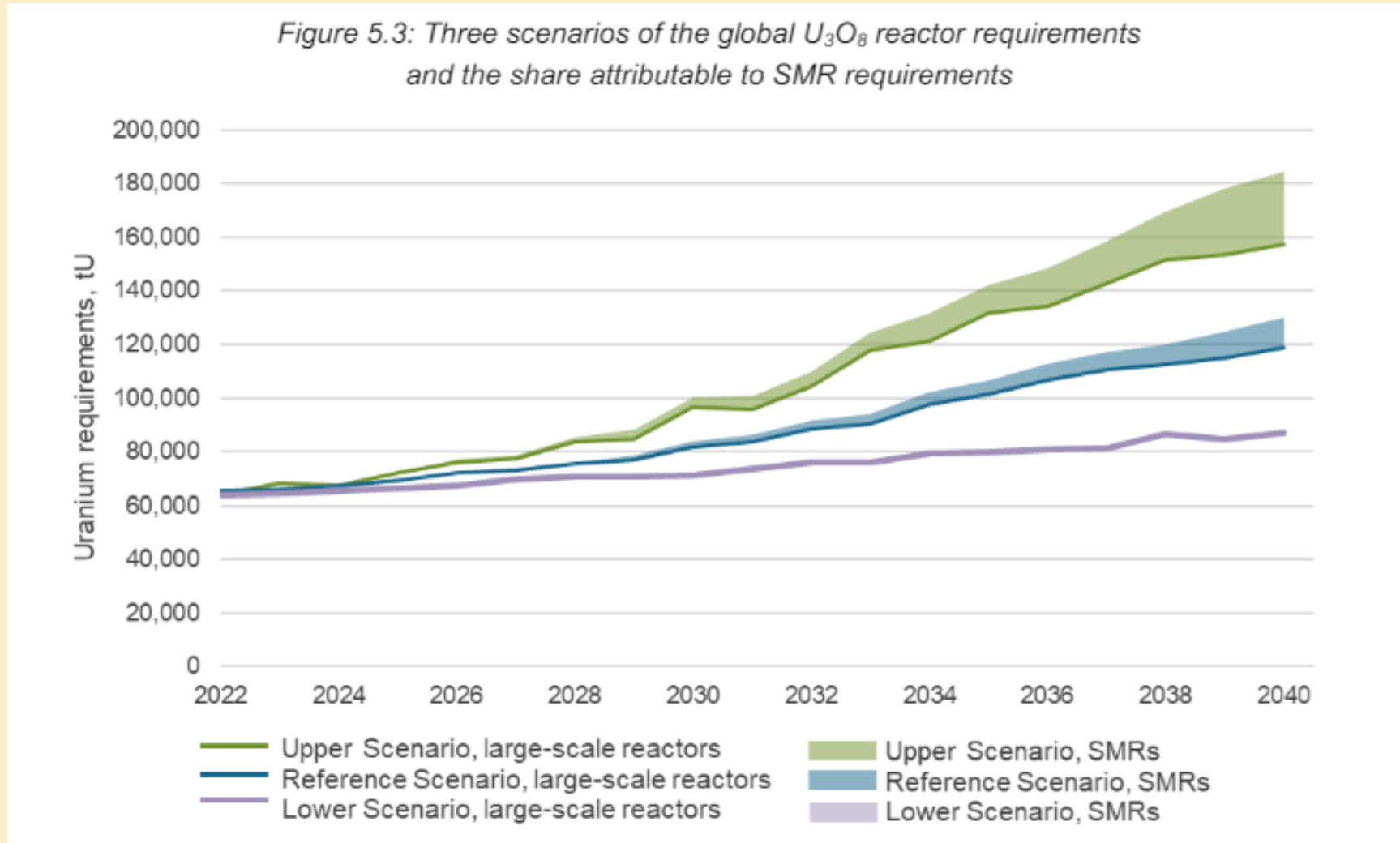
# Cenários de Geração Nuclear em função da transição energética, com a entrada de SMR



# Cenário da demanda global de $U_3O_8$

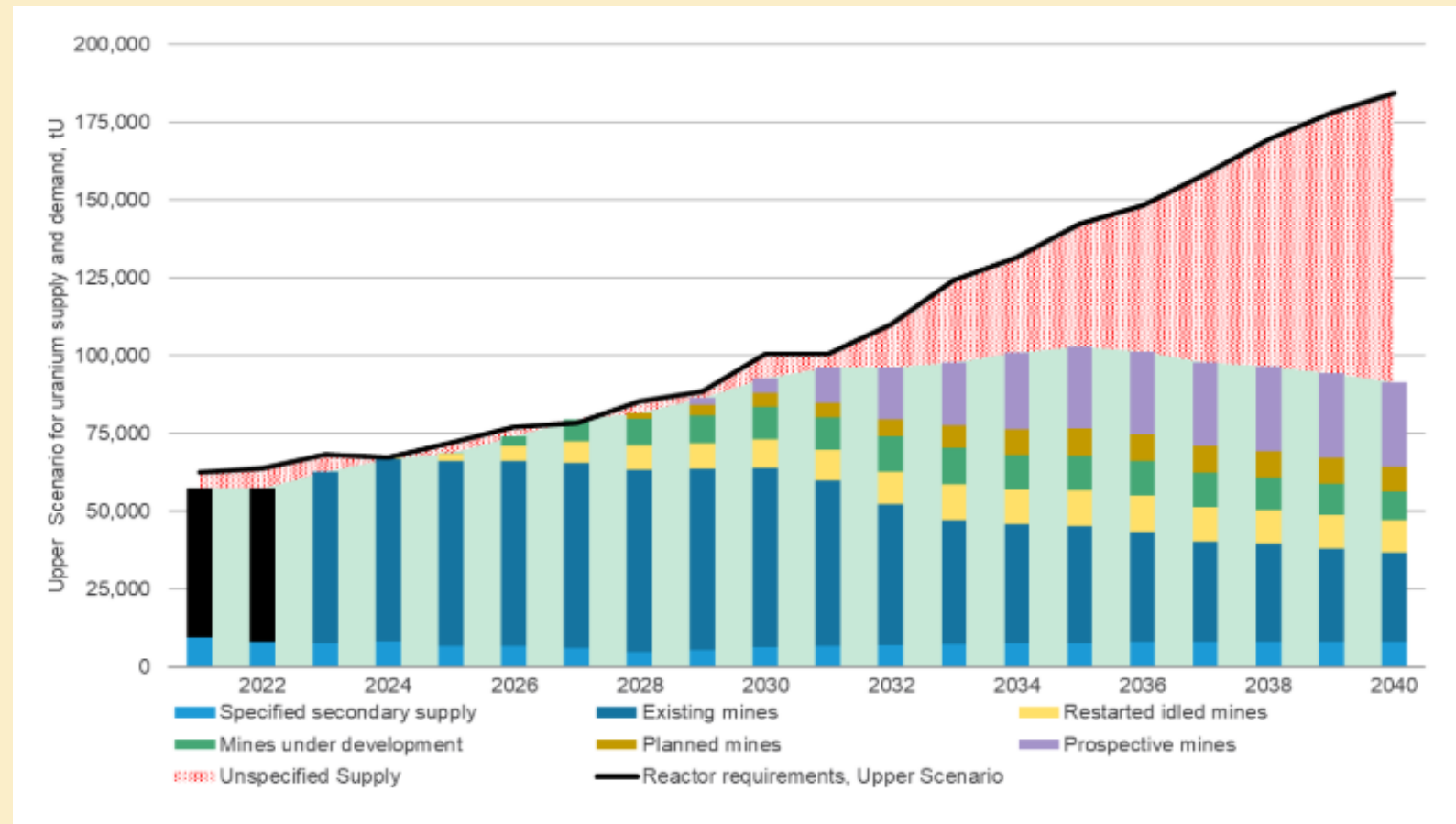


# Cenário da demanda global de $U_3O_8$ com a entrada dos SMR



# Retomada dos programas nucleares e “gap” entre produção e demanda de urânio

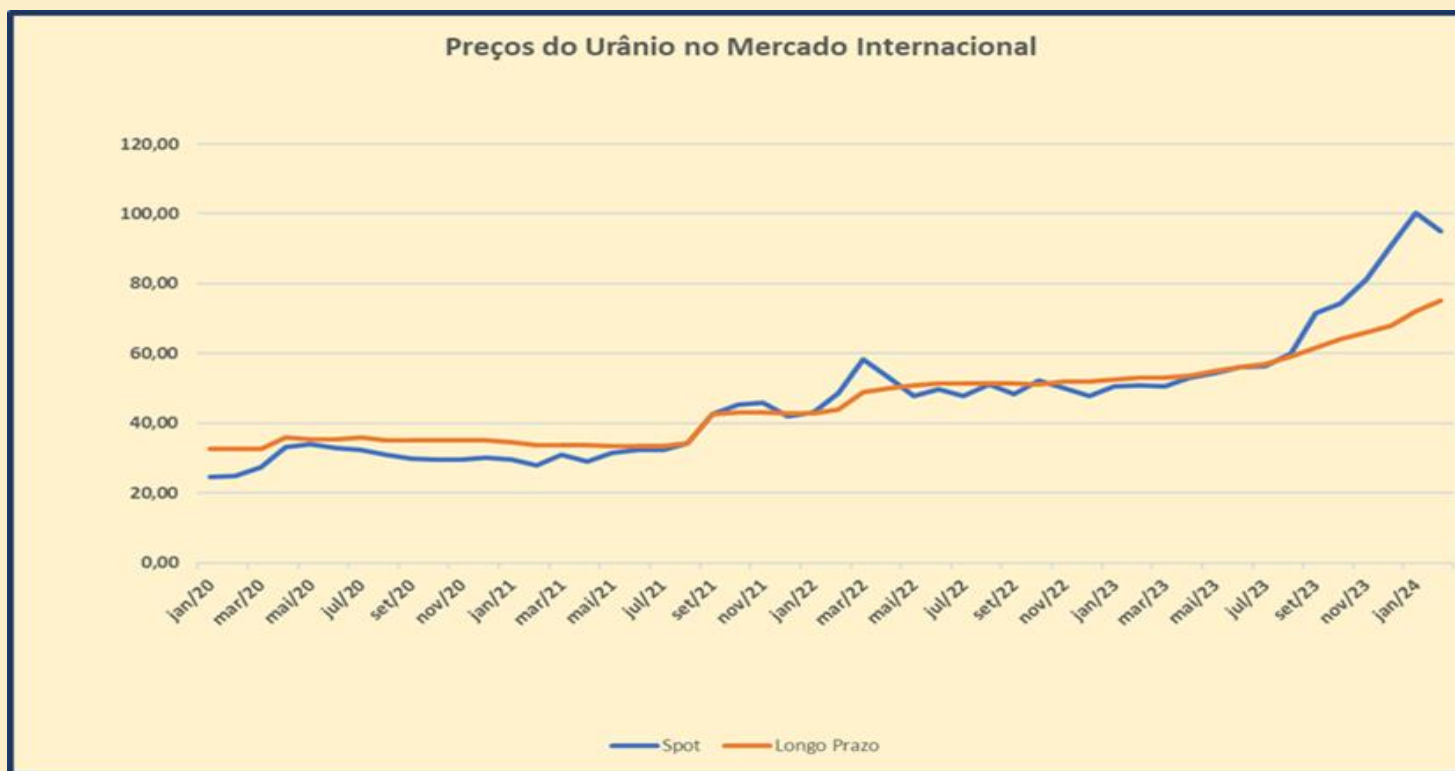
- A expectativa da retomada de programas nucleares em nível mundial levou à criação de um “gap” entre produção e demanda de urânio no mercado internacional que, segundo algumas análises, chegaria a 680 mil toneladas em 2040.



Fonte: The Nuclear Fuel Report – WNA - 2023

# Preços do urânio no mercado internacional

- Esse fato, teve como efeito imediato o aumento no preço internacional do urânio que chegou a US\$ 100.00 por libra - peso ou US\$ 220.00 por kg, no mercado “spot” e US\$ 72.00 por libra – peso ou US\$ 158.70 por kg, no mercado de longo prazo.



Fonte: Cameco/Invest/Uranium Price – February 2024.

# Valores de mercado dos maiores produtores de urânio

- Esse cenário levou à valorização dos principais supridores mundiais de urânio,

Nº Ordem	Empresa	Valor MKT Value (US\$ Billions)
1	Cameco Corporation (Canadá)	21,0
2	National Atomic Company Kazatomprom (Cazaquistão)	10,5
4	NexGen Energy Comany (Canadá)	4,38
4	Uranium Energy Corporation (EUA)	3,0
5	Denisson Mines (Canadá)	1,9



Figura: Denisson mines

# Recursos e reservas brasileiras de urânio

## Recursos Minerais e Potencial de Mineralização



Depósitos	Conteúdo de U <sub>3</sub> O <sub>8</sub> (t)		
	Medido e Indicado	Inferido	Total
Caetité	51.520	35.569	87.089
Santa Quitéria	91.200	51.300	142.500
Outros	39.500	26.300	65.800
<b>TOTAL</b>	<b>182.220</b>	<b>113.169</b>	<b>295.389</b>
<b>Potencial de Mineralização:</b>			
Pitinga/AM		150.000 t U <sub>3</sub> O	
Rio Cristalino/PA		150.000 t U <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	

# Reservas mundiais de urânio

Country	2019			2021		
	Reasonably assured resources	Inferred resources	Total	Reasonably assured resources	Inferred resources	Total
Australia	1,285	765	2,049	1,318	642	1,960
Kazakhstan	465	504	969	387	487	875
Canada	652	221	873	649	216	865
Russia	257	405	662	252	405	657
Namibia	321	184	504	323	187	510
Niger	316	124	439	335	133	468
South Africa	258	190	448	256	189	445
Brazil	156	121	277	156	121	277
China	123	147	270	111	134	245
India	188	8	196	213	8	221
Ukraine	122	65	187	121	65	185
Uzbekistan	51	82	132	49	82	131
United States	102	NA	102	112	NA	112
Others	430	532	962	407	560	967
<b>Total</b>	<b>4,724</b>	<b>3,346</b>	<b>8,070</b>	<b>4,688</b>	<b>3,229</b>	<b>7,918</b>



# Oportunidades para o Brasil no mercado internacional de urânio.

- Até o ano 2022, no entanto, a exploração de urânio no Brasil **era atividade exclusiva das Indústrias Nucleares do Brasil (INB)**;
- A partir da promulgação da Lei nº 14.514/22, houve uma mudança radical nesse cenário.
- A Lei nº 14.514/22 abriu novas oportunidades para a exploração de urânio no Brasil, **por meio de parcerias estratégicas** das Indústrias Nucleares do Brasil (INB).

# Oportunidades para o Brasil no mercado internacional de urânio

- A Lei nº 14.514/22, permite que a exploração de elementos nucleares, como o urânio, **nos casos em que seu valor econômico seja superior ao valor de uma outra substância mineral** que esteja sendo pesquisada ou lavrada mediante:
  - a. **associação entre a INB e o titular da autorização de pesquisa mineral ou da concessão de lavra (parcerias);**
  - b. **encampação do direito minerário pela INB.**

# Oportunidades para o Brasil no mercado internacional de urânio

- Para a remuneração da parceira privada, a Lei 14.514/22 permite a compra do produto da lavra **com exportação previamente autorizada**, conforme seu Art. 4º:
  - *Art. 4º Para a execução das atividades a que se refere o art. 3º desta Lei, a INB poderá firmar contratos com pessoas jurídicas e remunerá-las por meio de:*
    - ....
    - *IV - direito de compra do produto da lavra **com exportação previamente autorizada**, conforme definido em contrato e regulamento; ou*

# Oportunidades para o Brasil no mercado internacional de urânio

- A exportação de urânio no Brasil é regida por duas leis:
  - a. **Lei nº 9.112, de 10 de outubro de 1995**, que dispõe sobre a exportação de bens sensíveis e serviços diretamente vinculados;
  - a. **Lei nº 14.222, de 15 de outubro de 2021**, que criou a Autoridade Nacional de Segurança Nuclear (ANSN) e dá outras providências.

# A exportação de urânio e a Lei nº 9.112/95

- A **Lei nº 9.112/95** que estabelece que **são consideradas exportações**, as transferências, a partir do território brasileiro, para qualquer destino fora da jurisdição ou controle nacional, **de qualquer Equipamento, Material e Tecnologia constantes da Lista de Equipamento, Material e Tecnologia Nuclear, ou da Lista de Equipamento e Material de Uso Duplo e Tecnologia a eles Relacionadas.**
- **Publicação das listas:** Coordenação – Geral de Bens Sensíveis do Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação e obedecem às **Diretrizes de Transferência Nucleares do “Nuclear Suppliers Group”** (do qual o Brasil faz parte) estabelecidas por meio da Informação Circular - INFCIRC/254/Parte 1, da Agência Internacional de Energia Atômica – AIEA.

# A Exportação de urânio e a Lei n º 9.112/95

- Para **determinar se a transferência não criará qualquer risco, inaceitável de desvio** e de forma a atender os objetivos dessas Diretrizes, o Governo brasileiro deverá exigir do usuário final, antes de autorizar a transferência, o seguinte:
  - a. declaração** especificando os usos e as localizações **do uso final**, quando aplicável, de tal transferência; e
  - b. garantia explícita** de que tal transferência **não será usada em atividade explosiva de natureza nuclear ou instalação nuclear não salvaguardada do ciclo de combustível nuclear.**

# A exportação de urânio e a Lei n.º 14.222/21

- A Lei 14.222/21 requer que a Autoridade Nacional de Segurança Nuclear - ANSN autorize a exportação do urânio, nos seguintes termos:

- *Art. 6º Compete à ANSN:*

.....

***III - editar normas e conceder licenças e autorizações para a transferência e o comércio interno e externo de minerais, de minérios e de seus concentrados e escórias metalúrgicas, com urânio ou tório associados;***

# A Exportação de urânio

- Dessa forma, a exportação de urânio no Brasil é **permitida e tem dois órgãos anuentes: a Coordenação – Geral de Bens Sensíveis do Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações – MCTI e a Autoridade Nacional de Segurança Nuclear (ANSN).**
- Os processos de exportação de urânio são feitos por meio do Sistema Integrado de Comércio Exterior do Governo Federal – **SISCOMEX. Um processo de exportação, uma vez anuído, resulta na emissão da devida Licença de Exportação.**



# Oportunidade para o Brasil

- Autorizada a exportação, a empresa privada parceira das Indústrias Nucleares do Brasil (INB) **será remunerada pelo recebimento no exterior do produto da lavra**, na forma de contrato previamente firmado.
- **Com isso, torna-se possível a participação de empresas privadas na exploração das reservas nacionais de urânio do país.**



# Um momento histórico de oportunidade na transição energética

- Com isso, o país tem grandes possibilidades de alavancar recursos com suas reservas de urânio que são mais do que **suficientes para financiar o Programa Nuclear Brasileiro e, eventualmente, o Programa Nuclear o Programa de Submarinos da Marinha.**
- O país tem uma oportunidade histórica de **transformar as Indústrias Nucleares do Brasil (INB) em empresa global de combustível nuclear.**



**Adversidades**

# Adversidades na Transição para a Energia Sustentável: Explorando as Tecnologias Nucleares

- Criação do modelo de negócio;
- Estabelecimento de parcerias – escolha do parceiro;
- Informações geológicas organizadas;
- Informações geológicas, muitas vezes incompletas;
- Bloqueio de áreas;
- Tempo para desenvolvimento de áreas greenfield;
- Tempo entre a elaboração da parceria e o início de produção.

# Um momento histórico: Reflexão

A transição energética acontecerá de qualquer jeito. A participação da energia nuclear é certa. **O que precisamos decidir é se vamos ser os atores principais ou simples espectadores dessa mudança de paradigma na forma como utilizamos a energia nuclear.**



# Muito Obrigado pela Atenção

José Mauro Esteves dos Santos

[jose.esteves@anm.gov.br](mailto:jose.esteves@anm.gov.br)

[jmauro77@gmail.com](mailto:jmauro77@gmail.com)

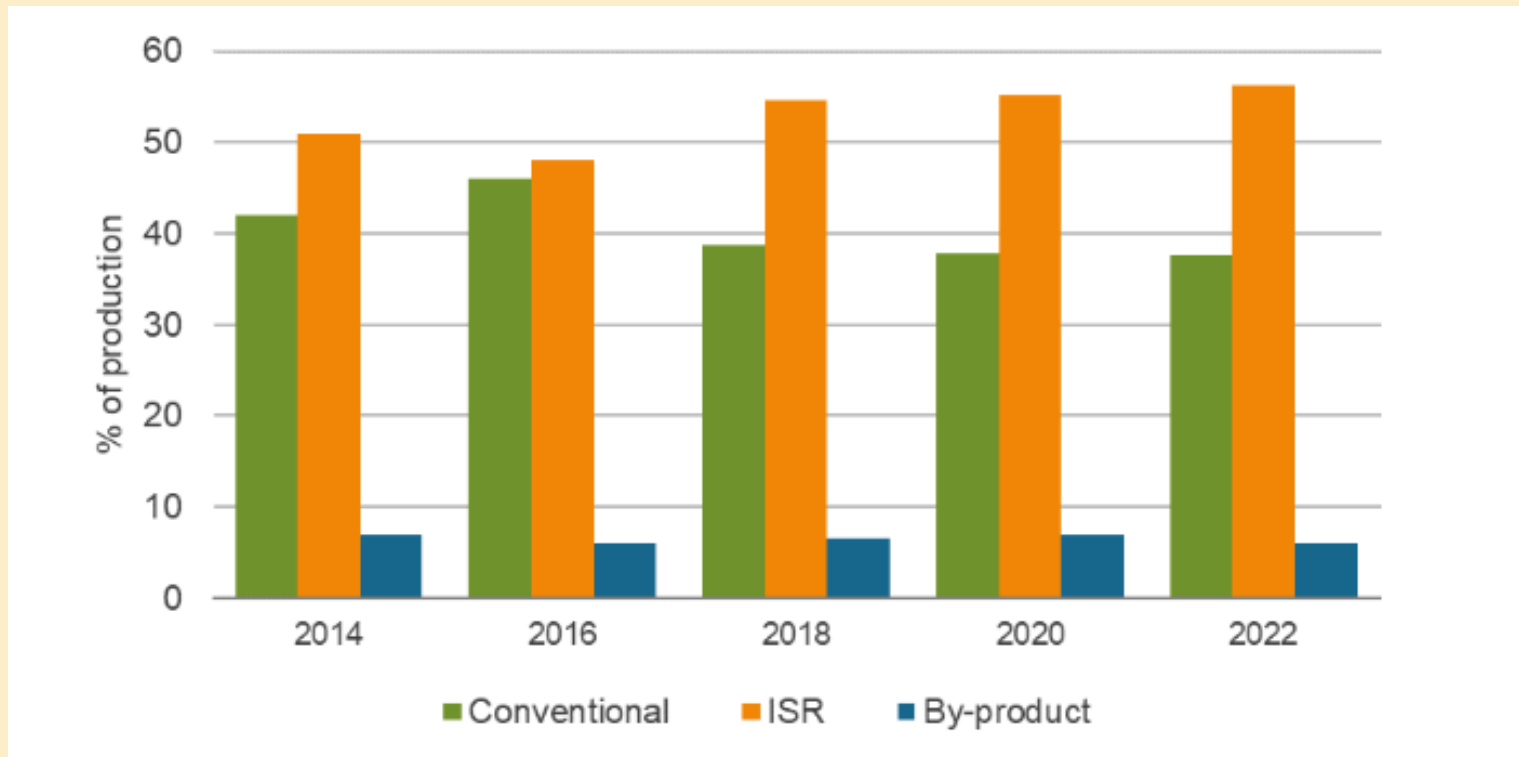
Tel. 61-98182-1919



# Produção mundial de urânio, capacidade instalada e % de utilização

	Production							Nameplate capacity							Capacity utilization						
	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Kazakhstan	24,689	23,321	21,705	22,808	19,477	21,819	21,227	25,714	29,764	29,764	29,764	29,063	29,063	29,063	96%	78%	73%	77%	67%	75%	73%
Canada*	14,039	13,116	7,001	6,938	3,885	4,693	7,351	16,282	16,538	6,922	6,924	6,924	6,924	16,540	86%	79%	100%	100%	56%	68%	44%
Namibia	3,654	4,224	5,524	5,476	5,413	5,753	5,613	5,654	11,232	9,232	9,328	9,328	8,904	8,904	65%	38%	60%	59%	58%	65%	63%
Australia	6,315	5,882	6,517	6,613	6,203	4,192	4,553	7,497	10,655	10,655	6,807	6,807	6,807	6,807	84%	55%	61%	97%	91%	62%	67%
Uzbekistan**	3,325	3,400	3,450	3,500	3,500	3,520	3,300	3,500	3,500	3,500	3,500	3,500	3,500	3,500	95%	97%	99%	100%	100%	101%	94%
Russia	3,005	2,917	2,904	2,911	2,846	2,635	2,508	4,885	4,600	4,600	4,900	4,900	3,100	3,100	62%	63%	63%	59%	58%	85%	81%
Niger	3,479	3,448	2,911	2,983	2,991	2,248	2,020	3,600	3,600	3,600	3,400	3,400	3,400	2,000	97%	96%	81%	88%	88%	66%	101%
China**	1,616	1,692	1,885	1,885	1,885	1,600	1,700	1,808	1,808	1,923	1,923	1,923	1,923	1,923	89%	94%	98%	98%	98%	83%	88%
India**	385	423	423	308	400	600	600	610	610	610	610	610	610	610	63%	69%	69%	50%	66%	98%	98%
South Africa**	490	308	346	346	250	192	200	1,269	769	769	769	769	769	769	39%	40%	45%	45%	32%	25%	26%
Ukraine **	808	707	790	800	744	455	100	1,650	1,650	1,650	1,650	1,650	1,650	1,650	49%	43%	48%	48%	45%	28%	6%
USA	1,125	960	582	58	6	8	75	2,780	3,596	1,673	1,404	N/A	N/A	N/A	40%	27%	35%	4%	N/A	N/A	N/A
Others	277	116	116	116	131	95	108	812	116	116	116	336	336	336	34%	100%	100%	100%	39%	28%	32%
<b>Total</b>	<b>63,207</b>	<b>60,514</b>	<b>54,154</b>	<b>54,742</b>	<b>47,731</b>	<b>47,808</b>	<b>49,355</b>	<b>76,061</b>	<b>88,438</b>	<b>75,014</b>	<b>71,094</b>	<b>69,209</b>	<b>66,986</b>	<b>75,202</b>	<b>83%</b>	<b>68%</b>	<b>72%</b>	<b>77%</b>	<b>69%</b>	<b>71%</b>	<b>66%</b>

# Métodos de extração de urânio





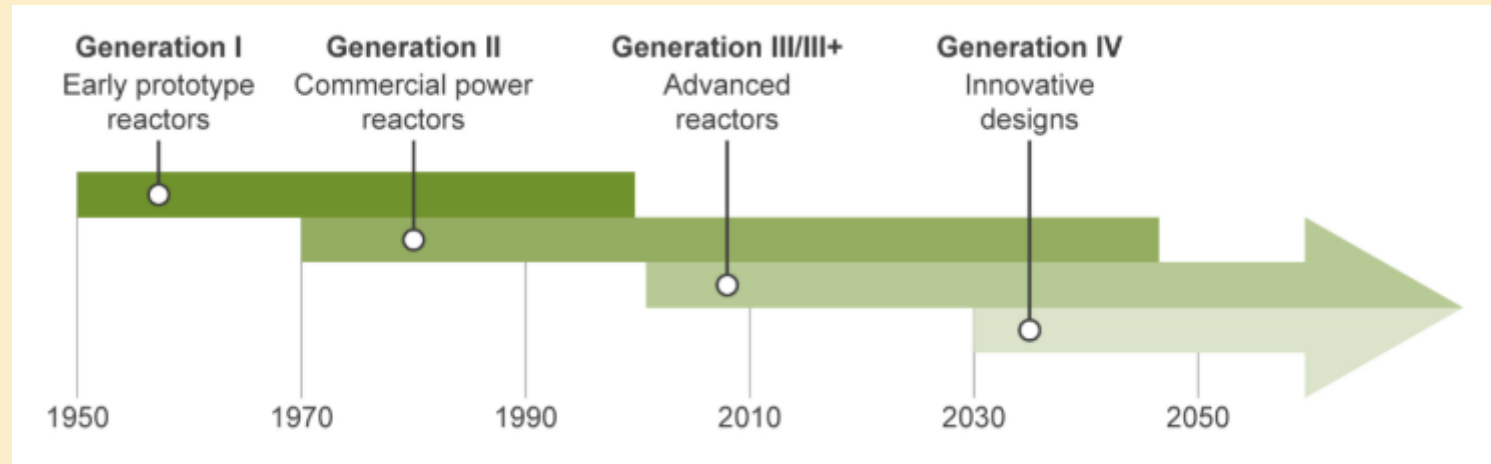
# Tipos de Small Nuclear Reactors em Desenvolvimento

Light Water Reactors				
Country	Reactor name	Vendor/Developer	Capacity (MWe)	Status
Argentina	CAREM	CNEA	30	Under construction
China	ACP100	CNNC/NPIC	125	Under construction
France	NUWARD	EDF	2x170	Pre-licensing
Korea	i-SMR	KAERI	100	Licensing *
Russia	KLT-40S	OKBM	2x35	Operational
Russia	RITM-200S	OKBM	105	Under construction
UK	Rolls-Royce SMR	Rolls-Royce SMR	470	Pre-licensing
USA	NuScale Power Module	NuScale	77	Licensing **
USA	BWRX-300	GE Hitachi	300	Pre-licensing
USA	SMR-160	Holtec	160	Pre-licensing
Non-Light Water Reactors				
Country	Reactor name	Vendor	Capacity (MWe)	Status
Canada	IMSR400	Terrestrial Energy	2x195	Pre-licensing
Canada	SSR-W	Moltex Energy	300	Pre-licensing
China	HTR-PM	INET	210	Operational
Russia	Brest-OD-300	NIKIET	300	Under construction
USA	Xe-100	X-energy	80	Pre-licensing
USA	ARC-100	ARC	100	Pre-licensing
USA	Sodium	TerraPower	345	Pre-licensing

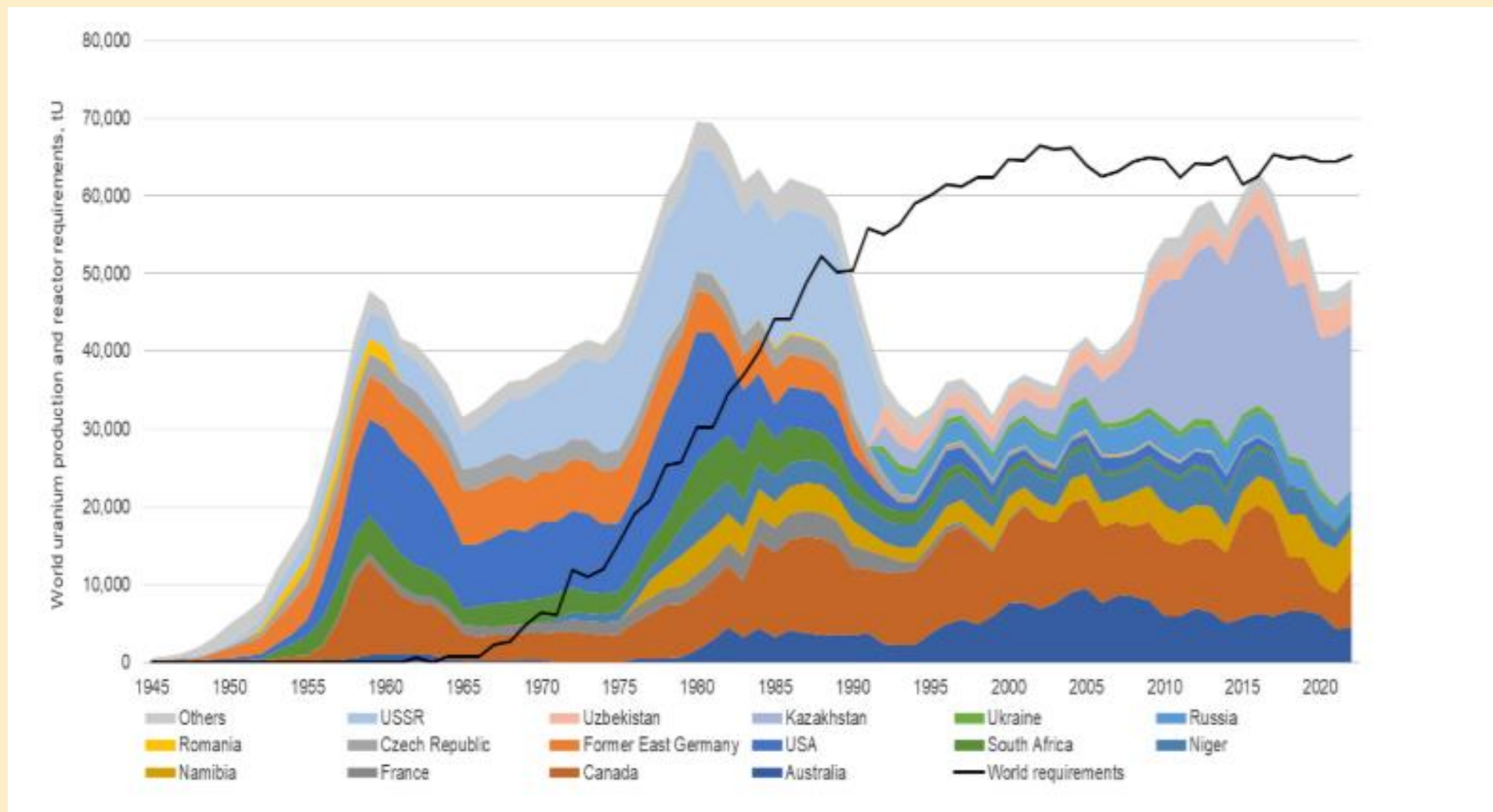
\* The original design, known as SMART, received standard design approval (SDA) certification from the South Korean regulatory authorities in 2012. The design was subsequently modified and so KAERI is updating the SDA application, aiming for certification of the new design in 2028.

\*\* An earlier 50 MWe NuScale design was approved by the US Nuclear Regulatory Commission in 2020.

# Tecnologias dos reatores ao longo do tempo



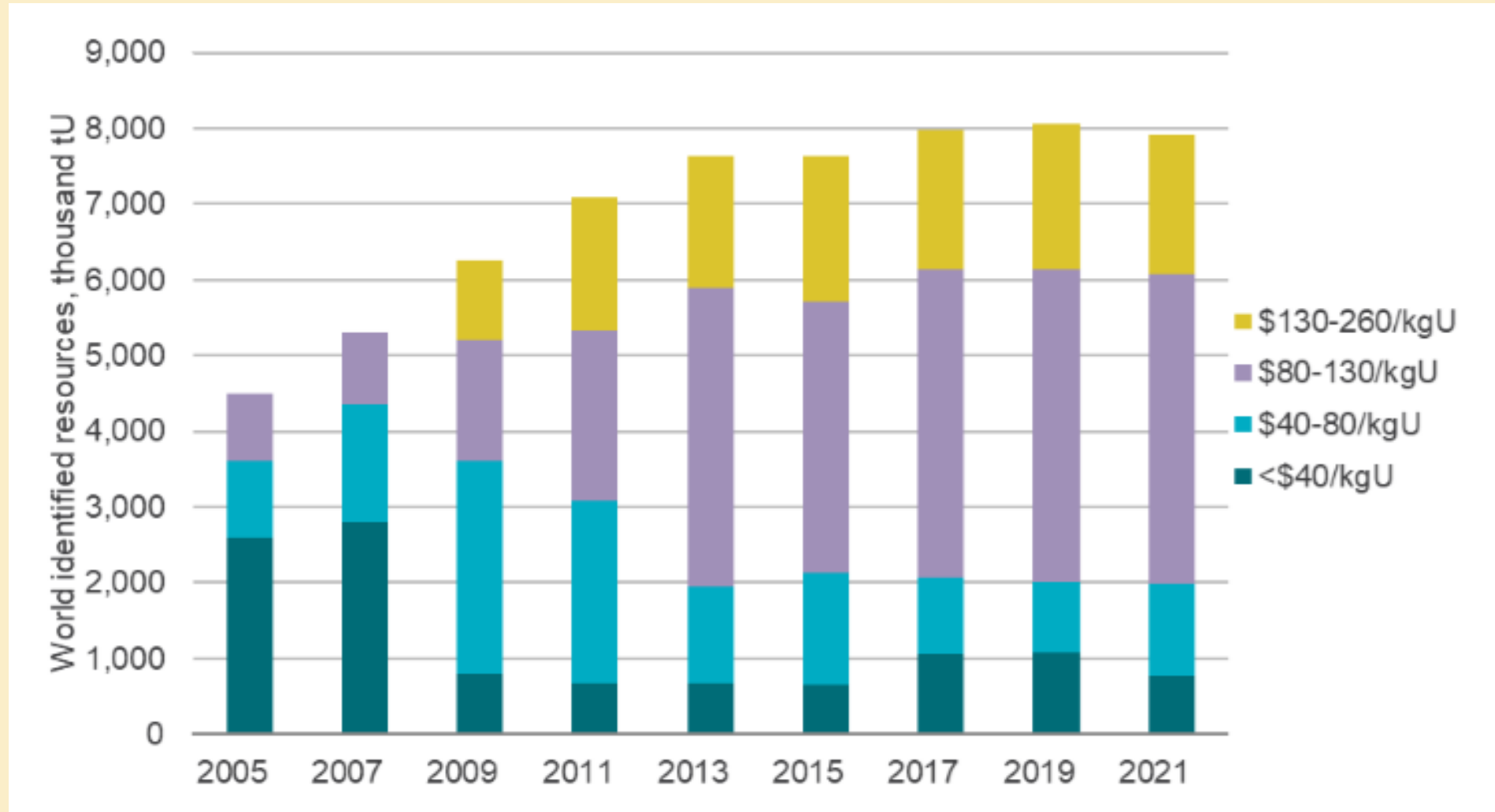
# Produção e necessidades de urânio



# As maiores minas de urânio do mundo

Mine	Country	Main owner	Type	2022	
				tU	% of world
Cigar Lake	Canada	Cameco	Underground	6,928	14.0
Husab	Namibia	Swakop Uranium (CGN)	Open-pit	3,358	6.8
Inkai	Kazakhstan	Inkai JV	ISR	3,201	6.5
Olympic Dam	Australia	BHP	By-product	2,813	5.7
Karatau (Budenovskoye 2)	Kazakhstan	Karatau JV	ISR	2,560	5.2
Rossing	Namibia	CNNC	Open-pit	2,255	4.6
Arlit (Somair)	Niger	Orano	Open-pit	2,020	4.1
Four Mile	Australia	Quasar	ISR	1,740	3.5
Central Mynkuduk	Kazakhstan	Ortalyk JV	ISR	1,650	3.3
South Inkai 4	Kazakhstan	SMCC JV	ISR	1,600	3.2
Others				21,230	43.0
<b>Total</b>				<b>49,355</b>	<b>100</b>

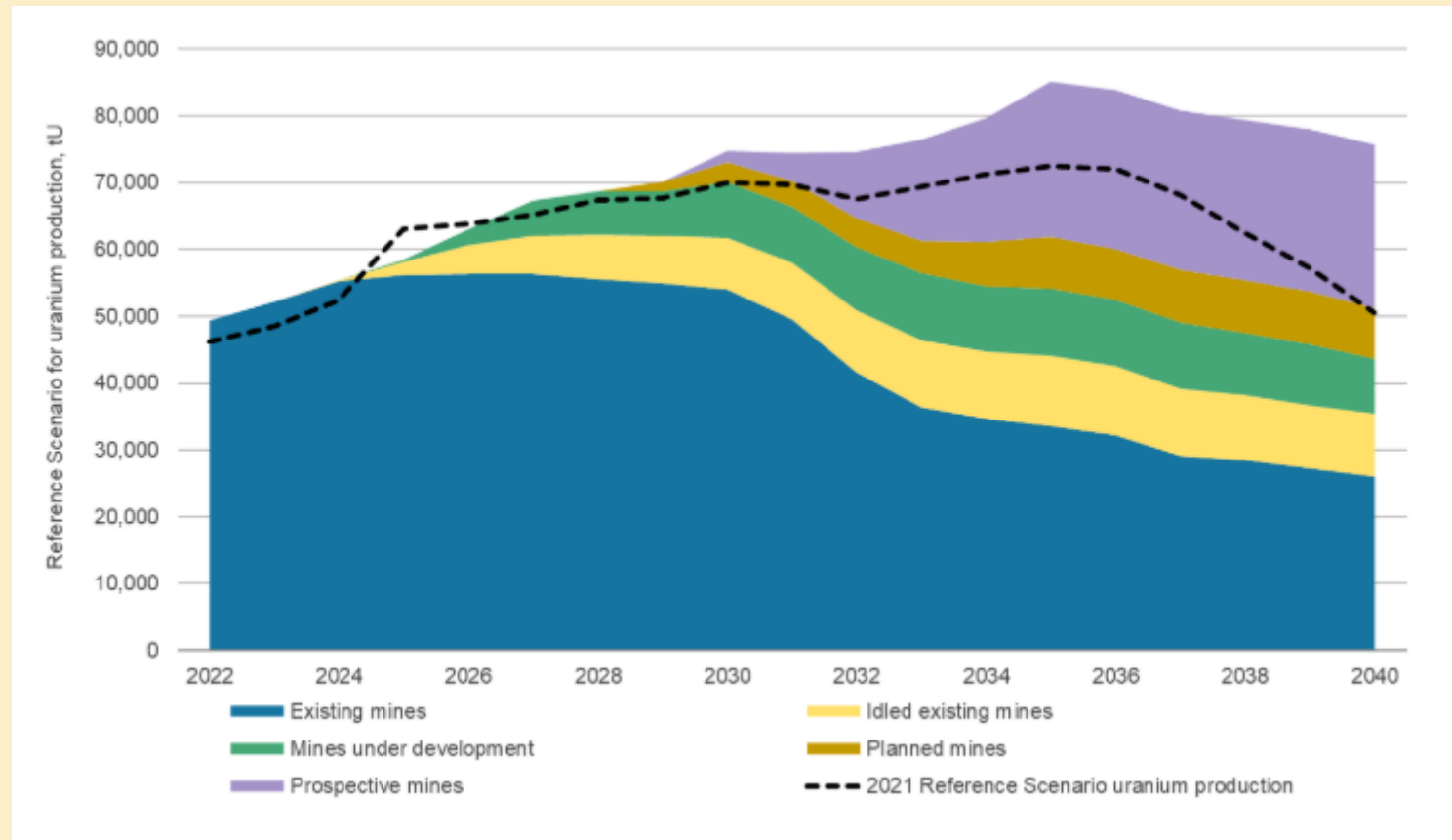
# Recursos mundiais de urânio por categoria de valor



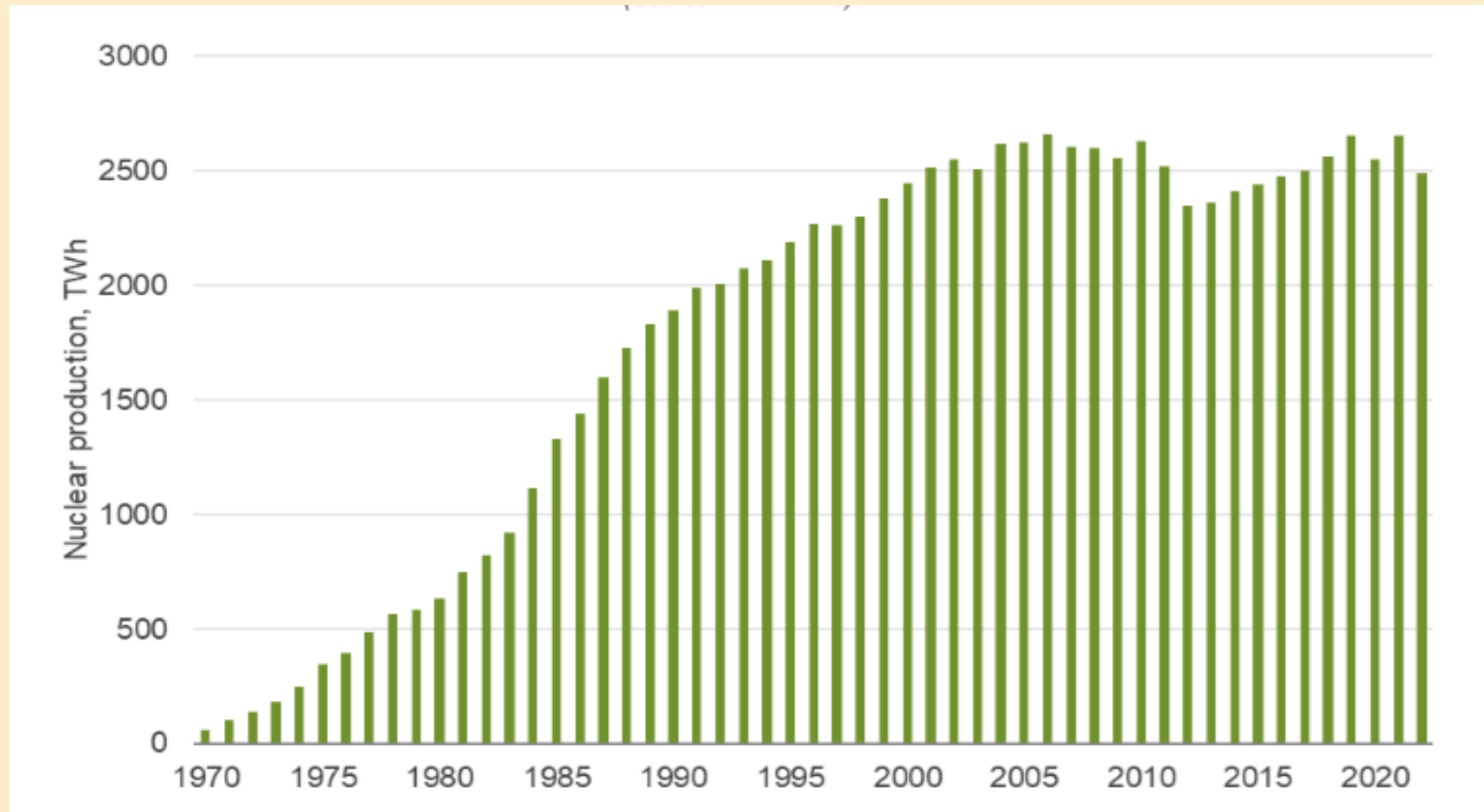
# Produção de urânio por empresa - 2022

Company	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2022 % of World
Kazatomprom	13,187	12,093	11,476	13,291	10,736	11,858	11,373	23.0
Cameco	10,385	9155	4600	4754	3546	4397	5675	11.5
Orano (formerly Areva)	8431	8031	5748	5809	4453	4541	5519	11.2
CGN	801	1693	3487	3871	3671	4112	4627	9.4
Uranium One	4885	5116	4385	4616	4276	4514	4454	9.0
Navoi MCC**	3325	3400	3450	3500	3500	3520	3300	6.7
CNNC***	2673	2568	1983	3310	3333	3277	3247	6.6
BHP	3233	2381	3159	3364	3062	1922	2813	5.7
ARMZ	3005	2917	2904	2911	2846	2635	2508	5.1
General Atomics/Quasar	1173	1573	1663	1764	1806	2241	1740	3.5
Energy Asia****	2308	2218	2204	2122	852	900	941	1.9
Sopamin	1200	1187	1002	1031	1032	809	739	1.5
VostGok	808	707	790	800	744	455	100	0.2
Rio Tinto	2423	2558	2602	1015	1104	25	0	0.0
Paladin Energy	1420	970	296	0	0	0	0	0.0
Others	3950	3947	4405	2584	2770	2604	2318	4.7
<b>Total</b>	<b>63,207</b>	<b>60,514</b>	<b>54,154</b>	<b>54,742</b>	<b>47,731</b>	<b>47,808</b>	<b>49,355</b>	<b>100</b>

# Cenário de referência para produção de urânio



# Produção de eletricidade de origem nuclear no mundo



Fonte: