REATORES ADS: CONCEITO BÁSICOS, PROJETOS E RELEVÂNCIA GLOBAL

Gustavo Henrique Nazareno Fernandes [(1)] (ghnfernandes@gmail.com), Lucas Melo Queiroz Barbosa [(1)] (lmqbarbosa@gmail.com), Felipe Chagas Rodrigues Silva [(1)] (felipechagas@ufu.br), Marcus Vinicius Galdino da Silva [(1)] (marcus-galdino@hotmail.com)

[(1)] Universidade Federal de Uberlândia; Faculdade de Engenharia Mecânica - FEMEC

RESUMO: *Este trabalho é uma visão geral dos reatores híbridos (do inglês, Accelerator Driven System - ADS) considerando seus conceitos básicos, projetos e relevância global. O ADS é um reator subcrítico acoplado a um acelerador de partículas utilizado para gerar uma fonte externa de nêutrons. O objetivo principal é transmutar combustível queimado de usinas nucleares, cujo destino seriam os repositórios finais. Este trabalho contempla o contexto da energia nuclear, introdução do ADS; reação de spallation e material-alvo; espectro de nêutrons; combustíveis para ADS. A principal conclusão é de que o ADS desempenha um papel essencial dentro do cenário de energia nuclear, sendo uma importante aposta, em tempo médio, em relação às novas tecnologias de reatores.*

PALAVRAS-CHAVE: *Accelerator Driven Systems – ADS, energia nuclear, reatores subcríticos, novos reatores, revisão*

ACCELERATOR DRIVEN SYSTEMS: BASIC CONCEPTS, PROJECTS, AND GLOBAL ROLE

ABSTRACT: *This work is an overview of Accelerator Driven Systems – ADSs, considering its basic concepts, projects, and global role. ADS is a subcritical reactor coupled to a particle accelerator to give an external source of neutrons. The main goal is to transmute burned fuel from nuclear plants, whose destination would be final repositories. This work contemplates nuclear power context, ADS introduction; spallation reaction and target material; neutron spectrum; ADS' fuels. The main conclusion is that ADS plays an essential role inside the nuclear energy scenario, being an important bet, in medium time, concerning new reactors technologies*

KEYWORDS: *Accelerator Driven Systems – ADS, nuclear energy, subcritical reactor, new reactors, overview*

DECLARAÇÃO DE RESPONSABILIDADE

Os autores são os únicos responsáveis por este trabalho.

LISTA DE ACRÔNIMOS E ABREVIATURAS

ADNA - Accelerator Driven Neutron Applications	*GUINEVERE - Generator of Uninterrupted Intense NEutrons at the lead VEnus REactor*	*MOX - Mixed Oxide Fuel*
ADONIS - Accelerator Driven Optimized Nuclear Irradiation System	*HML - Heavy Metal Liquid*	*MTA – Materials Testing Accelerator*
ADS - Accelerator Driven System	*HYPER - HYbrid Power Extraction Reactor*	*MYRRHA - Multi-purpose hYbrid Research Reactor for Hightech Applications*
AFTRA – Advanced Fuels for Transmutation	*HZDR - Helmholtz*	*PACE - Physique pour l'Aval du Cycle*
AHWR - Advanced Heavy Water Reactor	*IAEA - International Atomic Energy Agency*	*PACEN - Physique pour l'Aval du Cycle et production d'Energie Nucleaire*
ATW - Accelerator Transmutation of Waste	*INC - Intra-Nuclear Cascade*	*PMA - Plutonium and Minor Actinides*
CAS - China Academy of Science	*INFN - National Institute for Nuclear Physics*	*RWTH Aachen - Technical University of Aachen*
CERN - Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire	*ING - Intense Neutron Generator*	*SC-ADSP - Steering Committee on ADS*
CNRS - Centre for Scientific research	*IPLA - Intensity Proton Linear Accelerator*	*SCC - Separated Sector Cyclotron*
EFIT – European Facility for Industrial Transmutation	*ITEP - Institute of Theoretical and Experimental Physics Moscow*	*SR - Spallation Reactions*
ELSY - European Lead-cooled System	*IVFHM - In-Vessel Fuel Handling Machine*	*TEF - Target Test Facility*
ENEA - Ente per le Nuove Tecnologie, l'Energia e l'Ambiente	*JAEA - Japan Atomic Energy Agency (JAEA)*	*TM - Target Material*
ENEA - National Agency for New Technology, Energy and the	*KAERI - Korea Atomic Energy Research Institute*	*TRASCO - TRAsmutazione SCOrie*
Environment	*KIT - Karlsruhe Institute of Technology*	*TWG – Technical Working Group*
EURATOM - European Atomic Energy Community	*LBE - Lead-Bismuth Eutectic*	*Uninterrupted Intense NEutron at the lead VEnus REactor*
FEAT - First Energy Amplifier Test	*LEHIPA - Low Energy High*	*UNO - United Nations Organization*
FERFICON - Fertile-to-Fissile Conversion	*LWR - Ligh Water Reactor*	*XADS eXperimental Accelerator Driven System*
FZJ - Forschungszentrum Julich	*MEGAPIE - MEGAwatt PIlot Experiment*	*Zentrum Dresden Rossendorf*

I. ENERGIA NUCLEAR – CONTEXTO GLOBAL

Um termo recorrente nas principais conferências internacionais convocadas pela Organização das Nações Unidas - ONU, como o Rio + 20, é "Desenvolvimento Sustentável". Foi definido como: *"Desenvolvimento sustentável é o desenvolvimento que atende às necessidades do presente sem comprometer a capacidade das gerações futuras de atender às suas próprias necessidades"* (Brundtland, 1987). Considerando o fator ambiental e os recursos limitados, a pesquisa sobre métodos e tecnologias mais eficazes para gerar energia tem sido impulsionados significativamente nas últimas décadas a nível mundial (Gillingham et al., 2009).

No cenário energético global, a maior parte da energia vem de fontes não renováveis, como carvão, petróleo e gás, grandes emissores de CO_2, gases de efeito estufa e, consequentemente, causando o aquecimento do planeta. Apesar disso, mesmo com um esforço mundial para reduzir o CO_2, ainda há uma demanda crescente de energia, sustentada principalmente por combustíveis

fósseis, impossível ser atendida a médio prazo apenas por fontes renováveis. Isso significa que, para reduzir as emissões de CO_2, fontes menos poluentes devem ser exploradas nas próximas décadas, como a energia nuclear (Apergis et al., 2010).

Dados da Eletronuclear, uma empresa brasileira de eletricidade nuclear, indicam que uma usina nuclear de 1.000 MWth, em apenas um ano, em comparação com uma usina moderna termelétrica, evitaria a emissão à atmosfera de cerca de 2,3 mil toneladas de material particulado, 14 mil toneladas de dióxido de enxofre, 7 mil toneladas de óxidos de nitrogênio e 10 milhões de toneladas de dióxido de carbono. Outro fator favorável é em relação à área total utilizada. Enquanto uma hidrelétrica ocupa um campo inundado de ~ 25.000 ha, a outra com a mesma capacidade ocupa aproximadamente 50 ha, 500 vezes menos (ELETRONUCLEAR, 2006).

Um problema relevante em relação ao uso de energia nuclear em reatores convencionais (a maioria deles) é que eles são projetados para queimar apenas 1% do ^{238}U (Barros, 2009). Uma porção considerável de combustível composta principalmente do Urânio 238, entre outros actinídeos, ainda tem grande potencial para gerar mais energia se passar por um processo de transmutação ou se tivessem sido usados em dispositivos mais eficientes. Assim, antecipando um crescimento considerável da energia nuclear e, sem mudanças na cadeia de urânio, ou seja, se não houver tecnologia diferente no uso desse combustível, espera-se que até o final deste século, as reservas mundiais estejam esgotadas (Abderrahim et al., 2012).

Atualmente, grupos internacionais de pesquisa e programas governamentais têm investido muitos recursos no desenvolvimento de novas e mais eficientes tecnologias de reatores cujos objetivos são desenvolver dispositivos: *"econômico, sustentável, seguro e confiável, com boa proteção da estrutura física, além de evitar a possível proliferação nuclear"* (GIF, 2015). Um exemplo são os chamados reatores regeneradores, que trabalham com o conceito de reutilizar combustível queimado induzindo reações em radioisótopos como o ^{238}U, por exemplo, transmutando-os em isótopos físseis, como ^{239} Pu (Goldberg & Rosner, 2011).

Um conceito no desenvolvimento de reatores regeneradores de alta eficiência são os reatores híbridos (ADS), que utilizam aceleradores de partículas acoplados a um núcleo subcrítico. Os dispositivos ADS tiveram um ressurgimento nas últimas três décadas, como é possível verificar na literatura (Bowman et al., 1992; Furukawa et al., 1983; Nifenecker et al., 2001; Rubbia et al., 1993). O ADS está atualmente em desenvolvimento, direta ou indiretamente, por vários países, como Bélgica, Itália, Estados Unidos da América, Rússia, Japão, França, Suécia e China, entre outros (GIF, 2015).

II. REATORES HÍBRIDOS (ADS) – INTRODUÇÃO

Fissão é uma reação exotérmica que gera uma liberação maciça de energia e outras emissões, incluindo nêutrons. Apenas 1 mol de ^{235}U é capaz de liberar $2x10^{10}$ kJ , correspondendo a 5.555 kWh. O consumo médio de uma residência brasileira é de aproximadamente 150 kWh/mês (Fedrigo et al., 2009).

A ideia básica da operação de um ADS é ter um reator operando no modo subcrítico. Significa que a reação naturalmente seria extinta ao longo do tempo, logo, uma fonte adicional de nêutrons deve ser usada para manter a cadeia de reação de fissão.

Os ADSs têm a proposta de usar um acelerador de partículas acoplado ao núcleo de um reator para transmutar resíduos nucleares, ou os combustíveis queimados previamente, cujo destino seriam repositórios finais (Revol & Kadi, 2001). Podem ser considerados um dispositivo integrado de três partes: um acelerador de partículas de alta energia, um material-alvo (do inglês, *Target Material – TM)* capaz de produzir nêutrons através de reações de *Spallation* – (do inglês, *Spallation Reactions* – SR), além de um núcleo de um reator.

A Figura 1 mostra um desenho esquemático de um ADS. Um feixe de partículas é acelerado (1) e direcionado para um material-alvo para gerar uma alta densidade de prótons (2), acima de $10^{23}\ W/cm^2$ (3). Os prótons são produzidos com alta energia, da ordem de GeV (4), e focados em um material-alvo de Pb-Bi. Então, através de reações de *spallation* (5), nêutrons rápidos são produzidos e utilizados para a transmutação de combustível (6). A janela de entrada (7) precisa ser cuidadosamente monitorada para a segurança (Mourou et al., 2013a).

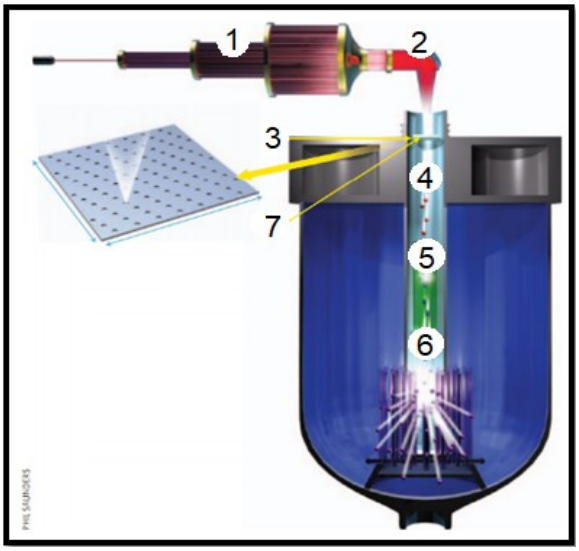


Figura 1. Esquema teórico de operação de um ADS (Mourou et al., 2013b)

III. REAÇÃO DE *SPALLATION - RS & MATERIAL-ALVO*

Em um ADS, nêutrons adicionais são derivados de reações nucleares. Um feixe de prótons, deutério ou partículas leves, porém de alta energia que atingem o material-alvo de elevado número atômico, que eventualmente gera novos nêutrons através de *Spallation*.

Rez (2010), no trabalho *"Spallation Reaction Physics,"* apresenta os conceitos e o desenvolvimento da *Spallation*. Estes fenômenos foram inicialmente observados usando aceleradores de partículas pelo físico B.B. Cunningham em Berkeley em 1947. No mesmo ano, um estudo teórico foi conduzido por Serber (1947), e o nome spallation foi dado pelos físicos W. H. Sullivan e G. T. Seaborg. Embora essa reação tenha sido descoberta há mais de meio século, os fenômenos físicos deste processo ainda não são totalmente conhecidos. Muitas observações foram e ainda são obtidas experimentalmente.

No RS, um feixe de partículas leves como prótons ou deutério é acelerado para alcançar energia acima dos 100 MeV, podendo chegar à casa dos GeV. Este feixe de partículas altamente energético se concentra em um material-alvo causando uma liberação significativa de partículas, especialmente nêutrons, podendo conter também fragmentos de núcleo. O processo resultante dessa interação pode ser dividido em duas etapas: Cascata Intranuclear (CI) e desexcitação do núcleo residual.

No primeiro passo, conhecido como CI, há um processo desordenado e imprevisível onde muitos fenômenos físicos ocorrem em pouco intervalo de tempo $10^{-22}s$. Prótons ou nêutrons são acelerados com a energia variando entre 200 MeV e 2 GeV e têm um comprimento de onda De Broglie de aproximadamente 0,1 fm (Cugnon, 1993). Esse valor mínimo de comprimento de onda permite que os prótons interajam direta e individualmente com o núcleo alvo (prótons e nêutrons). Isso resulta em uma colisão elástica direta de energia tão alta e leva tão pouco tempo que não há possibilidade de formar um núcleo composto. Começa, então, uma dispersão *nucleon-nucleon*, fazendo com que alguns deles sejam ejetados do núcleo. Depois, então, este passará por uma segunda etapa (Mongelli et al., 2005).

Outro estágio crítico em uma reação de spallation é o que ocorre após CI. Nesta segunda etapa, que acontece em $\sim 10^{-16}s$, e é chamada de desexcitação. Aqui, dois fenômenos físicos concorrentes podem ocorrer: um deles é a evaporação. O núcleo excitado emitirá várias partículas leves: alfa, nêutrons, deutério, He, Li e Be. A desexcitação ocorre como um processo natural de equilíbrio energético no núcleo residual que busca estabilidade. Ainda assim, no processo de evaporação, ocorre um estágio em que o núcleo, já parcialmente estável, emite radiação γ até o último decaimento por emissão β até atingir a estabilidade nuclear (Rez, 2010).

O outro fenômeno físico que compete com a evaporação é a fissão nuclear. Existe a possibilidade de que o núcleo altamente energizado e excitado se divida em dois fragmentos, gerando os chamados produtos de fissão. Esta reação libera muitas partículas de núcleo residual e radiação, que podem ocorrer após fissão e evaporação. Mongelli et al. (2005) esclarece que o núcleo ainda tem 8 MeV de energia e decai por emissão γ. A Figura 2 ilustra a incidência de um próton de 1 GeV em um núcleo denso e as ramificações desta colisão, demonstrando uma reação de spallation e seus estágios sucessivos.

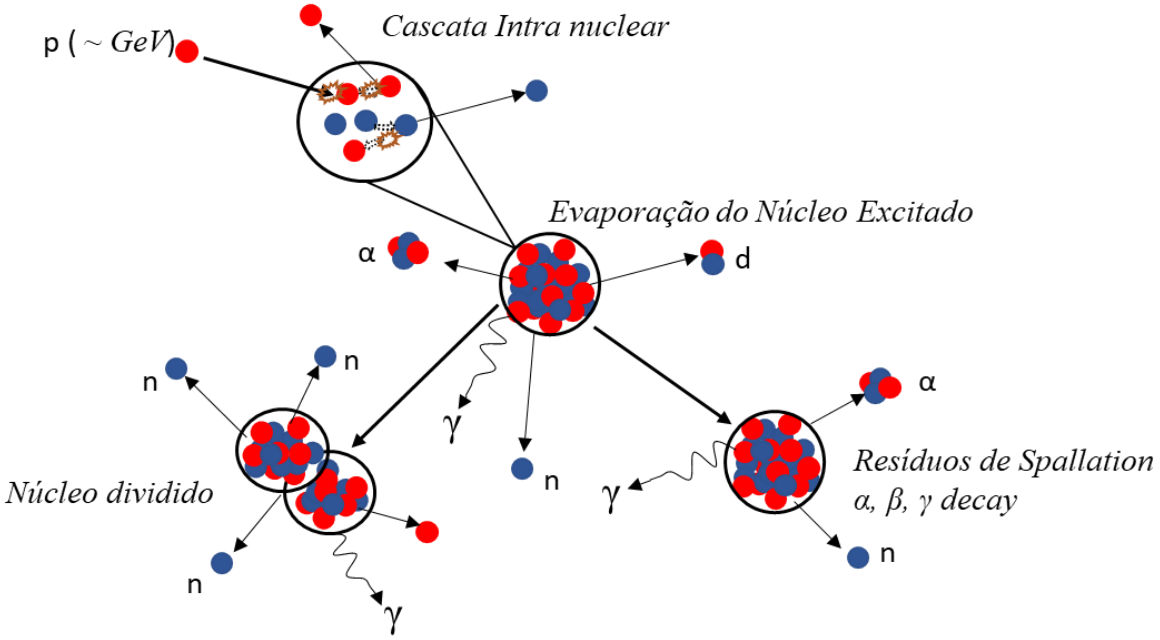


Figura 2. Exemplo ilustrado de uma reação de spallation e suas duas etapas: cascata intranuclear e desexcitação

O estado natural, seja sólido ou líquido, é um critério na escolha do material-alvo. Quando líquido, o feixe de partículas se concentra diretamente dentro do reator, sendo o alvo o refrigerante líquido, geralmente um Metal Líquido Pesado (do inglês *Heavy Metal Liquid – HML)*. Este tipo de técnica é chamada de sistema de alvo sem janelas. A vantagem é que não causa deterioração do material-alvo e impede a manutenção periódica.

Outra possibilidade é o uso de um material-alvo em estado sólido no qual o feixe de partículas é focado. Este tipo de sistema é chamado de alvo de janela. A principal vantagem é diminuir o nível de rádio toxicidade do refrigerante que poderia contaminar o sistema secundário de troca de calor. A Figura 3 mostra duas configurações possíveis (Mongelli et al., 2005).

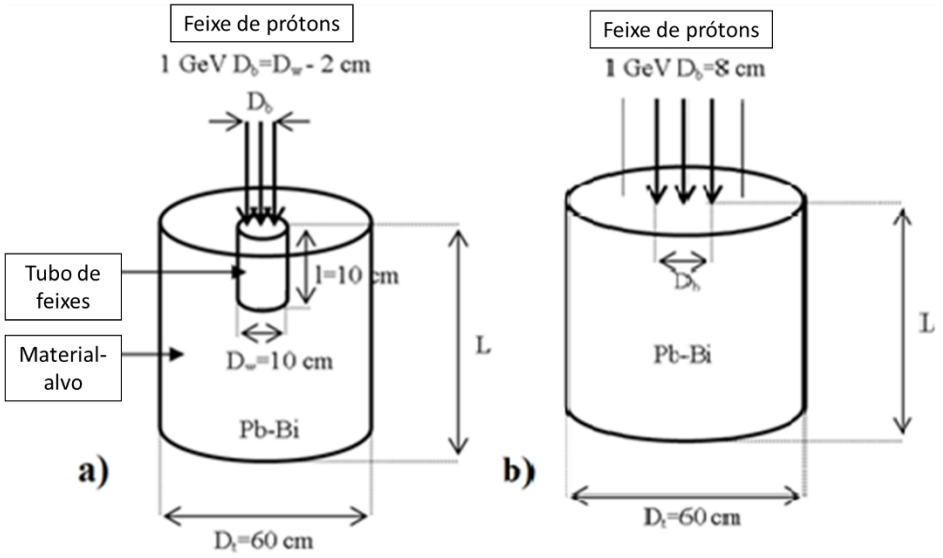


Figura 3. a) Sistema sem janela b) Sistema com janela

IV. ESPECTRO NEUTRÔNICO

Nêutrons podem ser classificados de acordo com sua energia cinética, E_k, como segue (Aramburu & Bisbal, 1996):

Nêutrons térmicos: $E_k < 1eV$
Nêutrons intermediários: $1eV < E_k < 0{,}5\ MeV$
Nêutrons rápidos: $0{,}5\ MeV < E_k$

A faixa de energia de nêutrons (espectro) influenciará significativamente como irão interagir com o núcleo de outros elementos. O principal objetivo do ADS é promover um fluxo de nêutrons suficiente que permita a transmutação/regeneração de elementos de combustível físsil diretamente associados à energia de nêutrons e sua probabilidade de interação com outro núcleo.

Embora a seção transversal de absorção seja mais extensa para nêutrons térmicos os ADSs em desenvolvimento trabalham com projetos rápidos. Vários fatores motivam essa escolha. Rubbia et al. (1993) fez um estudo de fluxo de nêutrons que demonstrou um grande benefício de usar ADSs de espectro rápido. Para um sistema térmico operando em uma densidade de energia $\mathrm{p} = 15\ W/g$, o fluxo máximo de nêutrons é $\theta = 2.7x10^{13} ncm^{-2}s^{-1}$; esse valor poderia ser 20 vezes maior para espectro rápido (Rubbia et al., 1993). O fluxo é muito maior para nêutrons de alta energia nos vários componentes, como mostrado na Figura 4 (Herrera-Martínez et al., 2007).

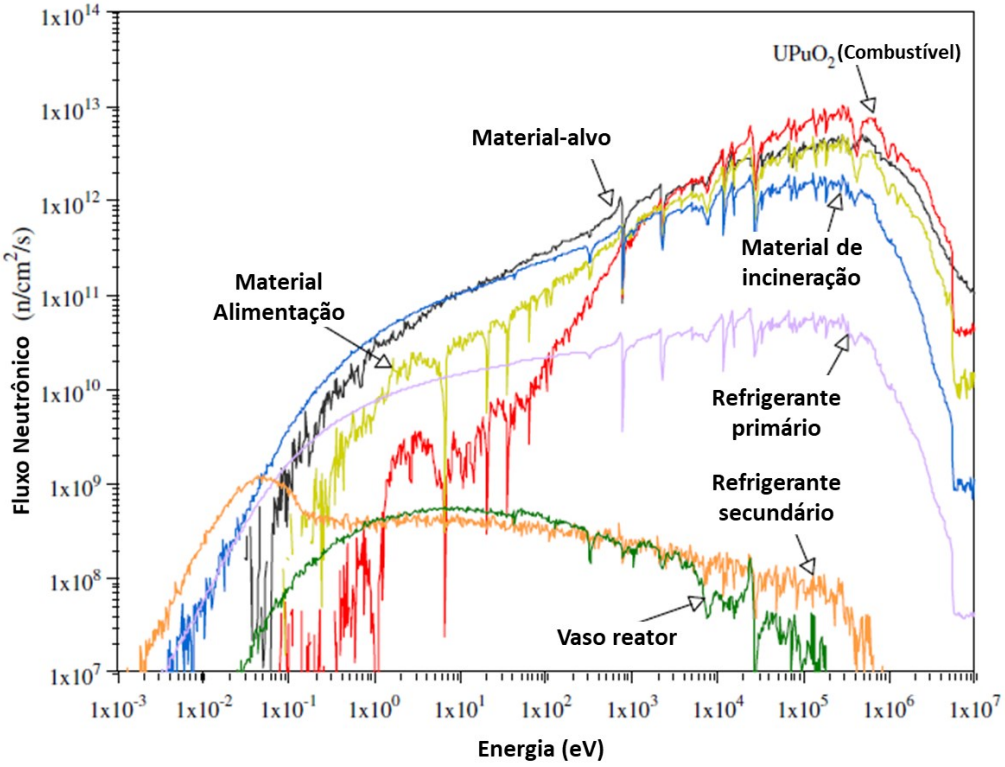


Figura 4. Espectro de nêutrons nos diferentes componentes de um ADS (Herrera-Martínez et al., 2007)

A principal vantagem do ADS rápido é sua capacidade de induzir reações de fissão em praticamente todos os elementos de combustível e na ampla economia e geração de nêutrons que podem fornecer positivamente a reação em cadeia, mesmo com capturas parasitárias. Apesar dessas vantagens, os ADSs rápidos apresentam alguns pontos negativos. Um deles é o tempo que leva para alcançar o equilíbrio e a necessidade significativa de que os rejeitos funcionem corretamente.

A Figura 5 demonstra o tempo necessário para queimar o combustível de 100 reatores de água leve – (do inglês, *Ligth Water Reactors*) utilizando sistemas rápidos (ADS) e térmicos (ADNA). A curva do combustível não transmutado refere-se a rejeitos acumulados por 100 LWRs ao longo de uma vida útil de 40 anos. Bowman (1998) demonstra que o ADNA precisa de menos plutônio e actinídeos menores do que o ADS e requer tório e ^{233}Urânio para manter a reatividade. Ainda assim, em relação ao ADS, Bowman afirma que: "*Se o objetivo é reduzir 1.200 tons por um fator de 100, o ADS requer quatro vezes mais e o dobro de reatores em comparação com um sistema ADNA*" (Charles D. Bowman, 1998).

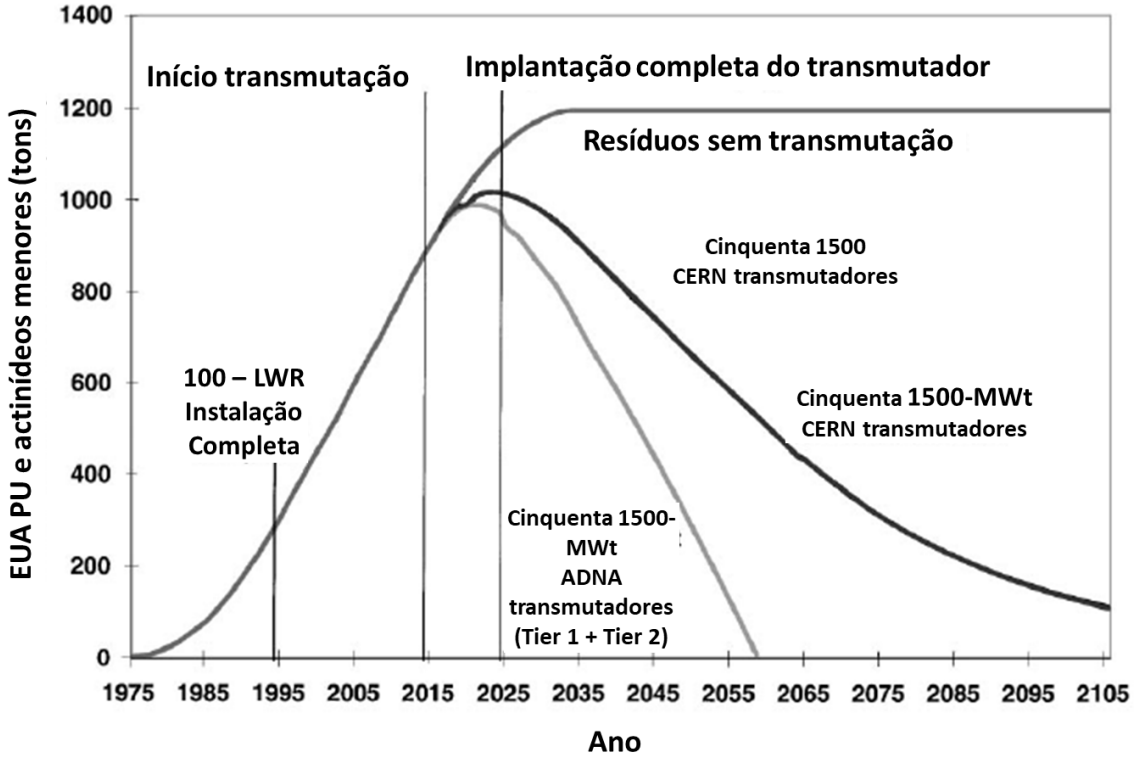


Figura 5. Comparação entre dois sistemas de transmutação, ADS e ADNA, e 100 Reatores de Água Leve -LWRs (Charles D. Bowman, 1998).

Em resumo, em relação ao espectro de nêutrons utilizado para transmutação de combustível, as características de cada sistema são apresentadas na Tabela 1.

TABELA 1. Comparação entre ADS (nêutrons rápidos) e ADNA (nêutrons térmicos)

Fenômenos	ADS (nêutrons rápidos)	ADNA (nêutrons térmicos)
Fator de reprodução (n) (^{233}U)	n ≈ 2,1	n ≈ 2,5
Fluxo de nêutrons	Alta economia de nêutrons	Baixa economia de nêutrons
Efeito xenônio	Insignificante	Considerável
Efeito protactínio	Insignificante	Considerável
Tempo efetivo para queimar combustível (considerando 50 ADSs e 50 1500 MWth ADNAs)	~ 90 anos	~ 40 anos
Fator de quantidade PMA necessário	10 x	1 x

Fonte: autor próprio

V. COMBUSTÍVEIS PARA OS ADS

Uma vantagem do ADS é que ele pode trabalhar com muitas combinações e concentrações de combustíveis. Atualmente, existem duas propostas mais relevantes: ciclo tório/urânio (Th/U) e outras com plutônio/urânio (Pu/U). A geometria do núcleo e a composição do combustível são essenciais para garantir a operação, especialmente em relação à segurança. Como esses sistemas funcionam com uma fonte de nêutrons "externa", fornecida pela reação de *spallation* previamente discutida, o desligamento do acelerador de partículas é suficiente para desligar o reator, garantindo altos padrões de segurança (Barros, 2009).

Uma das aplicações do Tório seria utilizar este elemento com nêutrons para produzir ^{233}U, um isótopo fissionável. A Figura 6 (esquerda) demonstra um exemplo dos ciclos ^{232}Th/^{233}U. Nele, o isótopo de ^{232}Th absorve um nêutron e passa a decair por emissão β^- e transforma-se em protactínio dentro de um intervalo de tempo de aproximadamente 23 min, e o protactínio decai novamente com outra emissão β^- dentro de ~ 27 dias até que ele gera o isótopo físsil de ^{233}U.

Outro ciclo implementado em um ADS é o Pu/U, cujos princípios físicos são como o Th/U. A ideia básica deste combustível é aproveitar o ^{238}U, um isótopo fértil capaz de se transformar em um isótopo físsil, como o ^{239}Pu. A Figura 6 (à direita) mostra o ciclo Pu/U.

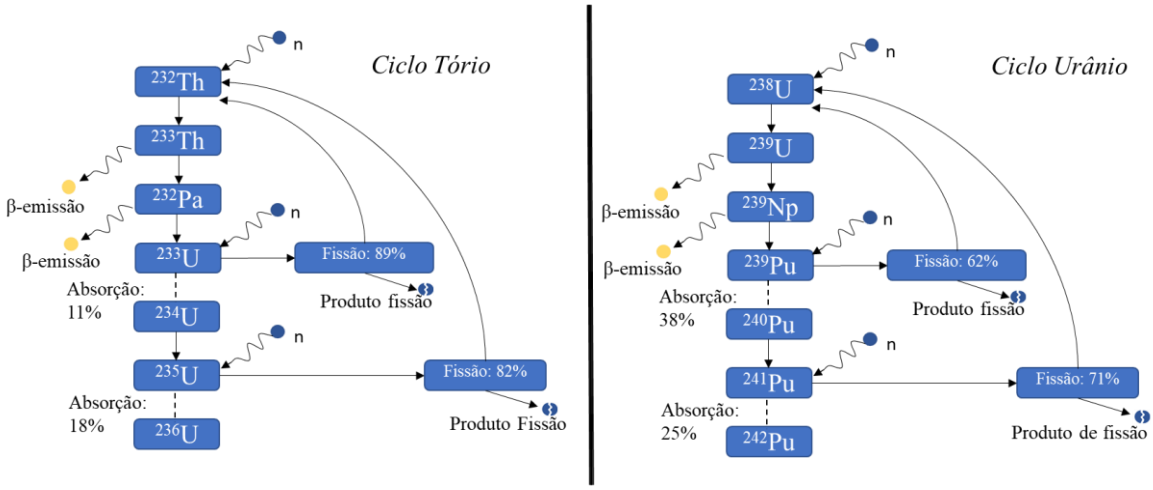


Figura 6. ^{232}Th/^{233}U ciclo (esquerda); ^{238}U/^{239}Pu ciclo (direita)

VI. ADS – DOS ANOS 40' ATÉ O FINAL DO SÉCULO XX

O ADS teve um ressurgimento no início da década de 1990, principalmente devido a estudos como as de Furukawa et al. (1983), Bowman et al. (1992), e Rubbia et al. (1993), tomados como referência (Nifenecker et al., 2001). No entanto, a ideia de usar o bombardeio de partículas para a transmutação de outros elementos havia sido implementada muito antes, na década de 1940. Naquela época, o cientista Glenn Seaborg e sua equipe de pesquisa usaram um acelerador de partículas cíclotron de 150 cm da Universidade de Berkeley (Califórnia) para produção de plutônio, com foco no deutério ^{238}U. Foi a primeira vez que o urânio foi induzido pela transmutação. Outros experimentos com aceleradores de partículas para produção de nêutrons também foram realizados na extinta União Soviética Desde então. A Figura 7 expressa a linha do tempo com o principal avançado neste campo (Kadi & Revol, 2003).

VII. HISTÓRIA RECENTE

A IAEA fornece um relatório chamado "*Status of Accelerated Driven Systems Research and Technology Development*", que contém vários aspectos, conceitos, programas etc., sobre o que está sendo desenvolvido em todo o mundo. Este relatório apresenta os principais objetivos a serem alcançados com ADS, da seguinte forma (IAEA, 2015):

• Transmutação de resíduos radioativos; isso inclui actinídeos menores, actinídeos de longa duração, produtos de fissão. A ideia principal da ADS é reduzir a vida útil dos resíduos nucleares de centenas de milhares de anos para centenas de anos.

• Produção de eletricidade; a incineração de rejeitos de alta atividade através de bombardeios de nêutrons gera várias reações nucleares capazes de gerar calor. Uma das ideias do ADS é usar esse calor produzido para gerar eletricidade ou até mesmo produção de hidrogênio.

• Produção de radioisótopos e materiais físsil; o ADS também tem um viés de pesquisa fortemente associado. Reatores experimentais, como MYRRHA, servirão de base para testes materiais, irradiação de isótopos para uso médico etc.

Baseado principalmente em ações governamentais, o ADS tem sido de grande importância em todo o mundo como uma aposta significativa para o tratamento de resíduos nucleares. As principais entidades com projetos na área estão na Europa, Ásia e EUA. A Tabela 2 é resumida a partir do relatório da IAEA sobre alguns programas nacionais de ADS que estão sendo desenvolvidos em todo o mundo. Enquanto isso, a Figura 8 ilustra países com projetos ADS (ADS, 2001; IAEA, 2015; *Systems Research and Technology Development*, 2015).

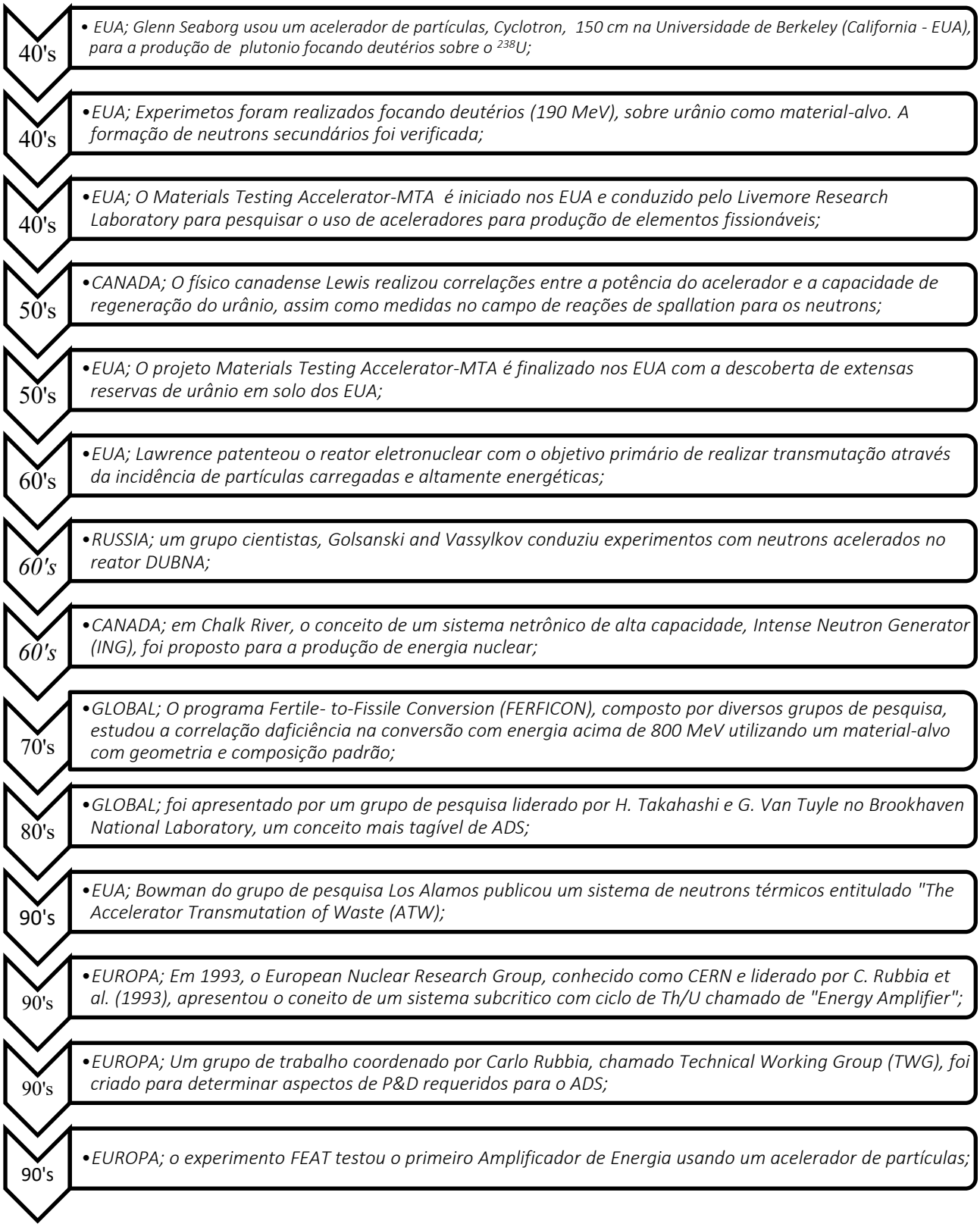


Figura 7. Linha do tempo representando eventos relevantes na história da ADS de acordo com Kadi & Revol (2003)

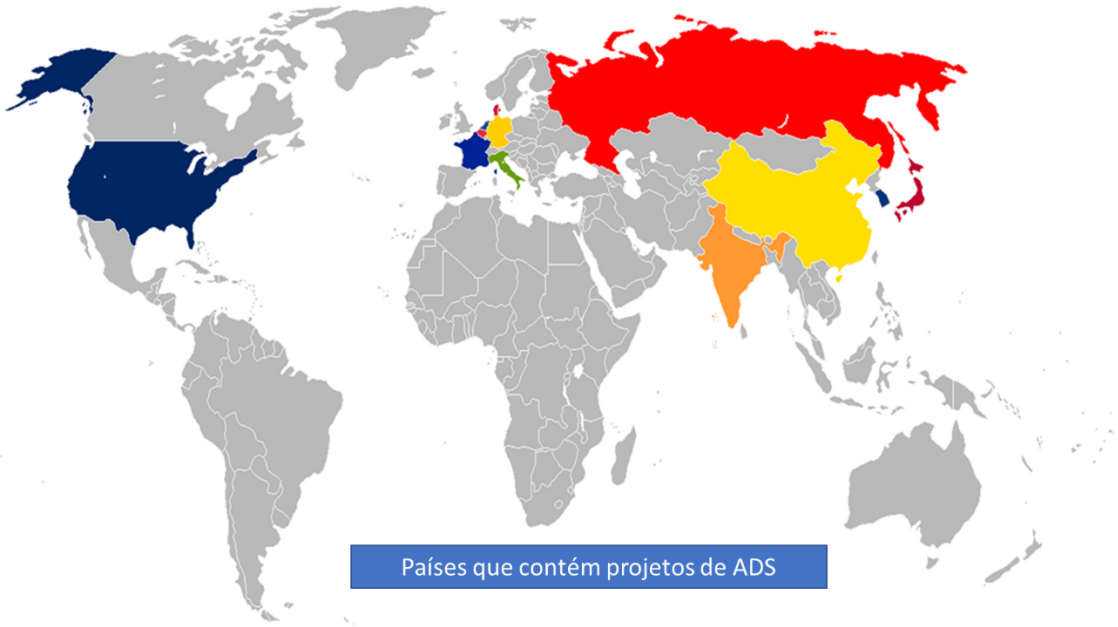


Figura 8. Países que contém projeto de ADS

TABELA 2. Institutos e programas com ADS relevantes por país em todo o mundo

País	Instituto	Programa de ADS
Belarus		YALINA; YALINA – T
Bélgica	CERN	ADONIS; MYRRHA;
China	CAS	VENUS I; Program 973
França	CNRS;	PACE; PACEN; EURATOM; MYRRHA (collaboration); GENEPI; GENEPI Mark 3C; GUINEVERE; MEGAPIE; SPIRE; DESIGN; DEMETRIA; CEA's R&D; ETD; EUROTRANS; EFIT; AFTRA
Alemanha	KIT; FZJ; RWTH; HZDR	PUREX; MEGAPIE;
Holanda	NGR;	MYRRHA (collaboration); EUROTRANS; ASCHLIM; ELSY; LEADER
Índia	DAE	AHWR; SC-ADSP; LEHIPA;
Itália	ENEA; INFN	TRASCO; LBE-XADS;
Japão	JAEA	OMEGA; J-PARC Phase II; TEF-P
Coréia do Sul	KAERI	HYPER; MEGAPIE
Rússia	ITEP; SSC RF; IPPE; VNIIEF; JINR; RSC KI; IYaI RAN; OKB'GIDROPRESS ', VNIITF	CDMSR; DUBNA ADS; SVBR-75;

Fonte: adaptado de (ADS, 2001; IAEA, 2015; *Systems Research and Technology Development*, 2015)

VIII. CONCLUSÕES

A partir desta revisão, é possível concluir as seguintes suposições:

- *A energia nuclear é essencial para suprir a constante demanda de energia em todo o mundo, evitando grandes emissores de CO_2, comuns em fontes elétricas convencionais, como hidrelétricas e térmicas. No médio prazo, energia renovável, solar ou eólica, não serão sozinhas capazes de suprir a demanda mundial.*

- *Considerando o crescimento da energia nuclear e, sem mudanças na cadeia de urânio, ou seja, se não houver tecnologia diferente usando este combustível, espera-se que as reservas mundiais estejam esgotadas até o final deste século. Com base nisso, grupos internacionais de pesquisa e programas governamentais têm investido muitos recursos no desenvolvimento de novas e mais eficientes tecnologias de reatores, sendo os ADSs uma aposta neste cenário.*

- *Os dispositivos ADS tiveram um ressurgimento nas últimas décadas e estão atualmente em desenvolvimento, direta ou indiretamente, por muitos países ao redor do mundo, como Bélgica, Itália, Estados Unidos da América, Rússia, Japão, França, Suécia, China, Coreia, Índia, Alemanha, entre outros.*

- *O ADS é um sistema integrado de três dispositivos: um acelerador de partículas de alta energia, um material alvo e um núcleo de reator. Estes dispositivos funcionam sub criticamente ($k < 1$), onde os nêutrons extras são fornecidos ao núcleo através de reações de spallation.*

- *Os ADSs podem trabalhar com espectro de energia térmica e rápida para os nêutrons. O ADS rápido são os dispositivos de P&D mais comuns devido ao seu fluxo de nêutrons que pode ser até 20 vezes maior. No entanto, os sistemas térmicos requerem menos plutônio e actinídeos menores e muito menos tempo para queimá-los.*

- *O ADS pode trabalhar com muitas combinações de combustíveis e concentrações relativas ao combustível, como o MOX (do inglês Mixed Oxide Fuel). Atualmente, existem duas propostas mais relevantes: Tório/Urânio (Th/U) e outros ciclos de plutônio/urânio (Pu/U).*

Assim, a partir da revisão dos projetos que estão sendo desenvolvidos em todo o mundo, é possível medir a importância dos ADSs. Em termos de transmutação de resíduos radioativos, incluindo actinídeos menores e de longa duração, esses sistemas são uma grande aposta para um futuro próximo.

IX. CONCLUSÕES

Os autores gostariam de agradecer: ao *Grupo de Manufatura Sustentável* – GMS (*Groupf of Manufature Sustaianble – GMS*), Nipo-Tec – Ferramentas Especiais, Petronas, o Laboratório de Ensino e Pesquisa em *Usinagem – LEPU* da Universidade Federal de Uberlândia – Brasil, , e as agências brasileiras de pesquisa CNPq, FAPEMIG e Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) - Código financeiro 001 pelo apoio financeiro.

X. REFERÊNCIAS

Abderrahim, A. H., Baeten, P., De Bruyn, D., & Fernandez, R. (2012). MYRRHA - A multi-purpose fast spectrum research reactor. *Energy Conversion and Management*, *63*, 4–10. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2012.02.025

ADS, T. E. T. W. G. on. (2001). A European Roadmap for Developing Accelerator Driven Systems (ADS) for Nuclear Waste Incineration April 2001 The European Technical Working Group on ADS. *Cycle*, *April*. https://doi.org/88-8286

Apergis, N., Payne, J. E., Menyah, K., & Wolde-Rufael, Y. (2010). On the causal dynamics between emissions, nuclear energy, renewable energy, and economic growth. *Ecological Economics*, *69*(11), 2255–2260.

Aramburu, X. O., & Bisbal, J. J. (1996). *Radiaciones ionizantes: Utilizacíon y riesgos*.

Barros, G. D. P. (2009). *Estudo inicial de um ADS para a produção de U utilizando o código MCNPX Estudo inicial de um ADS para a produção de U utilizando o código MCNPX*.

Bowman, C. D., Arthur, E. D., Lisowski, P. W., Lawrence, G. P., Jensen, R. J., Anderson, J. L., Blind, B., Cappiello, M., Davidson, J. W., England, T. R., Engel, L. N., Haight, R. C., Hughes, H. G., Ireland, J. R., Krakowski, R. A., LaBauve, R. J., Letellier, B. C., Perry, R. T., Russell, G. J., … Wilson, W. B. (1992). Nuclear energy generation and waste transmutation using an accelerator-driven intense thermal neutron source. *Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A*, *320*(1–2), 336–367. https://doi.org/10.1016/0168-9002(92)90795-6

Bowman, C D, Arthur, E. D., Lisowski, P. W., Lawrence, G. P., Jensen, R. J., Anderson, J. L., Blind, B., Cappiello, M., Davidson, J. W., & England, T. R. (1992). Nuclear energy generation and waste transmutation using an accelerator-driven intense thermal neutron source. *Nuclear Instruments*

and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, *320*(1–2), 336–367.

Bowman, Charles D. (1998). Accelerator-Driven Systems for Nuclear Waste Transmutation. *Annual Review of Nuclear and Particle Science*, *48*(1), 505–556. https://doi.org/10.1146/annurev.nucl.48.1.505

Brundtland, G. H. (1987). *Report of the World Commission on environment and development:" our common future."*. United Nations.

Cugnon, J. (1993). *Nucleon Cascade*. *1*, 271–272.

ELETRONUCLEAR. (2006). *Relatório de Impacto Ambiental – RIMA da Unidade 3 da Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto*.

Fedrigo, N. S., Gonçalves, G., & Lucas, P. F. (2009). *Universidade federal de santa catarina departamento de engenharia civil laboratório de eficiência energética em edificações*.

Furukawa, K., Kato, Y., Ohmichi, T., & Ohno, H. (1983). Combined system of accelerator molten-salt breeder (AMSB) apd molten-salt converter reactor (MSCR). *Atomnaya Tekhnika Za Rubezhom*, 23–29.

GIF, G. I. I. F. (2015). *Annual Report 2015*.

Gillingham, K., Newell, R. G., & Palmer, K. (2009). Energy Efficiency Economics and Policy. *Annual Review of Resource Economics*, *1*, 597–619. https://doi.org/10.1146/annurev.resource.102308.124234

Goldberg, S. M., & Rosner, R. (2011). Nuclear reactors: Generation to generation. *American Academy of Arts and Sciences, Cambridge, USA*.

Herrera-Martínez, A., Kadi, Y., Parks, G., & Dahlfors, M. (2007). Transmutation of nuclear waste in accelerator-driven systems: Fast spectrum. *Annals of Nuclear Energy*, *34*(7), 564–578. https://doi.org/10.1016/j.anucene.2007.02.008

IAEA. (2015). *Status of Accelerator Driven Systems Research and Technology Development* (Issue 1766). INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. https://www.iaea.org/publications/10870/status-of-accelerator-driven-systems-research-and-technology-development

IAEA. (2020). *IAEA Benchmark of Spallation Models*. https://www-nds.iaea.org/spallations/

International Atomic Energy Agency (IAEA). (2015). IAEA Annual Report 2015. *Iaea*, 159. http://www.iaea.org/Publications/Reports/Anrep2012/anrep2012_full.pdf

Kadi, Y., & Revol, J. P. (2003). *Design of an accelerator-driven system for the destruction of nuclear waste*.

Mongelli, S. T., Maiorino, J. R., Anefalos, S., Deppman, A., & Carluccio, T. (2005). Spallation Physics and the ADS Target Design. *Brazilian Journal of Physics*, *35*(3B), 894–897. https://doi.org/10.1590/S0103-97332005000500048

Mourou, G., Brocklesby, B., Tajima, T., & Limpert, J. (2013). The future is fibre accelerators. *Nature Photonics*, *7*(4), 258–261. https://doi.org/10.1038/nphoton.2013.75

Nifenecker, H., David, S., Loiseaux, J. M., & Meplan, O. (2001). Basics of accelerator driven subcritical reactors. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, *463*(3), 428–467. https://doi.org/10.1016/S0168-9002(01)00160-7

Revol, J. P., & Kadi, Y. (2001). An accelerator-Driven system for the destruction of nuclear waste. *Progress in Nuclear Energy*, *38*(1–2), 153–166. https://doi.org/10.1016/S0149-1970(00)00100-1

Rez, A. K. (2010). Spallation Reaction Physics. *Faculty of Nuclear Sciences and Physical Engineering at Czech Technical University, Prague*. http://ojs.ujf.cas.cz/~krasa/ZNTT/SpallationReactions-text.pdf

Rubbia, C., Carminiati, F., Klapisch, R., Revol, J. P., Roche, C., & Rubio, J. A. (1993). An energy amplifier for cleaner and inexhautable nuclear energy production driven by a particle beam accelerator. *European Organisation for Nuclear Research*, *47*(November), 1–72.

Serber, R. (1947). Nuclear reactions at high energies. *Physical Review*, *72*(11), 1114.