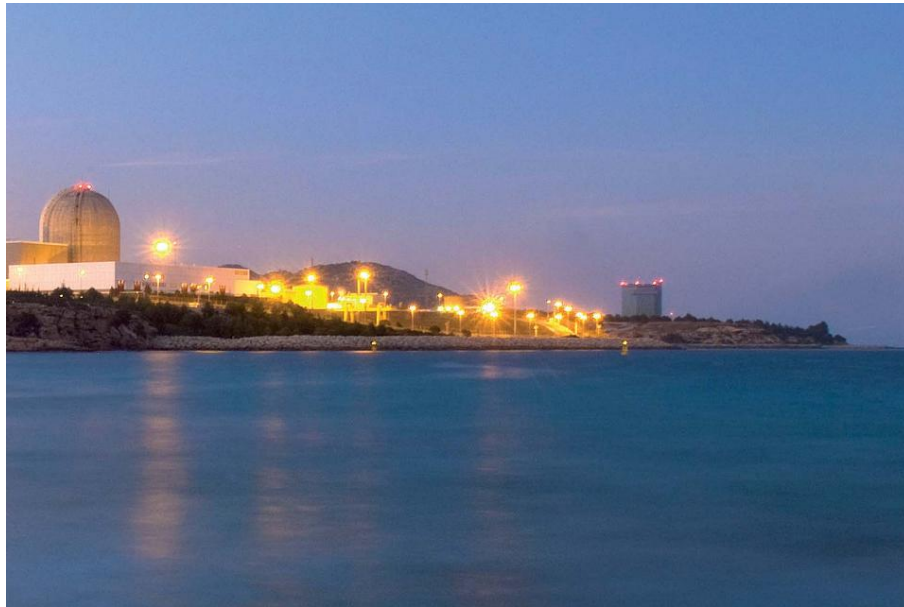




INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA
Área Departamental de Engenharia de Sistemas de Potência e Automação



Viabilidade económica da implementação de um reactor nuclear para a produção de energia eléctrica em Portugal

MIGUEL ANTÓNIO DE MORAIS PEDRO
Licenciado em Engenharia Electrotécnica

Dissertação para a obtenção do grau de Mestre em
Engenharia Electrotécnica – ramo de Energia

Orientadores:

Prof. Pedro Miguel Martins Ferreira
Prof. Jorge Alberto Mendes de Sousa

Júri:

Presidente: Professor Constantino Vital Sopa Soares
Vogais:

Professor Pedro Miguel Martins Ferreira
Professor Jorge Alberto Mendes de Sousa
Professor João José Esteves Santana

Dezembro de 2012



INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA
Área Departamental de Engenharia de Sistemas de Potência e Automação



Viabilidade económica da implementação de um reactor nuclear para a produção de energia eléctrica em Portugal

MIGUEL ANTÓNIO DE MORAIS PEDRO
Licenciado em Engenharia Electrotécnica

Dissertação para a obtenção do grau de Mestre em
Engenharia Electrotécnica – ramo de Energia

Orientadores:

Prof. Pedro Miguel Martins Ferreira
Prof. Jorge Alberto Mendes de Sousa

Júri:

Presidente: Professor Constantino Vital Sopa Soares
Vogais:

Professor Pedro Miguel Martins Ferreira
Professor Jorge Alberto Mendes de Sousa
Professor João José Esteves Santana

Desembro de 2012

Resumo

O presente trabalho tem como objectivo avaliar economicamente e determinar a viabilidade da implementação de um reactor nuclear para produção de energia eléctrica. Faz-se uma abordagem a aspectos da energia nuclear no mundo e em particular a energia nuclear na união europeia, faz-se uma análise sobre a estrutura do sector nuclear em Espanha e o futuro da energia no mundo. É realizada uma análise sobre a energia nuclear em Portugal, são abordados aspectos como o planeamento energético, a localização da central nuclear, os recursos nacionais e internacionais, a inspecção e regulação nuclear e o impacto industrial. Por fim, faz-se uma análise sobre o *mix* energético Português.

Faz-se uma descrição do ciclo de combustível, isto é, um estudo a todas as fases pela qual o combustível nuclear passa desde a sua extracção, passando pela produção de energia e processamento dos resíduos.

São descritos os principais componentes de uma central nuclear e o seu princípio de funcionamento. São analisados em detalhe os principais componentes de um reactor PWR (objecto de estudo deste trabalho) e faz-se uma breve descrição de alguns modelos de reactores nucleares.

É feita uma breve abordagem aos principais acidentes nucleares que ocorreram, e descrita a escala de ocorrências nucleares e as várias fases de desmantelamento de uma central.

São apresentados os principais custos da central nuclear. Também é apresentado um estudo de viabilidade económica analisando três cenários diferentes e é apresentada uma análise de sensibilidade do VAL em função de algumas variáveis que têm grande influência na avaliação económica. São apresentadas as principais conclusões.

Palavras-chave: Avaliação económica, Energia Nuclear, Reactor PWR

Abstract

This study aims to evaluate and determine the economic feasibility of implementing a nuclear reactor to produce electricity. Makes an approach to aspects of nuclear energy in the world and in particular nuclear energy in the European Union, it is makes an analysis on the structure of the nuclear sector in Spain and the future of energy in the world. It is performed an analysis on nuclear power in Portugal, are covered aspects such as energy planning, the location of the nuclear plant, the national and international resources, inspecting and regulating nuclear and industrial impact. Finally, it is makes an analysis of the Portuguese energy mix.

It is makes a description of the fuel cycle, i.e., a study is performed to all phases for which the nuclear fuel passes from its extraction through energy production and processing of waste.

It is described the main components of a nuclear power plant and its operating principle. A detailed analysis is made of the major components of a PWR reactor (the subject of this paper) with a brief description of some models of nuclear reactors.

It is made a brief approach to major nuclear accidents that have occurred, and described the scale of nuclear events and the various stages of decommissioning of nuclear power plants.

This paper presents the main costs of nuclear power. It is also presents an economic feasibility study analyzing three different scenarios and it presents a sensitivity analysis of the NPV as a function of a few variables that have a major influence on economic evaluation. Finally it presents the main conclusions.

Keywords: Economic evaluation, Nuclear Energy, PWR Reactor

Agradecimentos

Em primeiro lugar gostaria de agradecer a Deus por estar sempre presente na minha vida, por me amparar nos momentos difíceis, por me dar força interior para superar as dificuldades, mostrar os caminhos nas horas incertas e me suprir em todas as minhas necessidades.

Aos meus pais e irmãos por todo o amor, apoio, carinho e confiança em mim depositada, o que tornou possível a realização desde projecto.

Aos meus orientadores Professor Pedro Ferreira e Professor Jorge de Sousa, pela competência científica e acompanhamento no trabalho, pela disponibilidade e generosidade reveladas ao longo destes anos de trabalho, assim como pelas críticas, correcções e sugestões relevantes feitas durante a orientação.

Ao Professor Constantino Soares, pela vontade de nos tornar pessoas melhores, pela persistência, pela transmissão do conhecimento, pela dedicação, pelo desempenho e pelo profissionalismo.

Ao meu colega e grande amigo Ruben Nunes, pela sua incansável colaboração, pelo seu apoio, amizade, pelo seu contributo criativo e por me ajudar nos momentos mais difíceis.

A minha grande colega Cripá, por fazer parte deste momento sempre me ajudando e incentivando.

Aos meus primos Riquinho de Sousa, Eva Domingos, por acreditarem em mim, me mostrarem o caminho certo, por fazerem parte da minha vida nos momentos bons e me apoiarem nos momentos maus.

Aos meus primos Fialho Pedro e Esmeralda, por me receberem tão bem em vossa casa em Espanha e me apoiarem em todos os momentos.

Aos técnicos superiores do laboratório de instalações eléctricas, pelo apoio e colaboração na utilização das instalações.

A todos os meus amigos e cologas que contribuíram directa ou indirectamente para a realização desta dissertação, estimulando-me intelectual e emocionalmente.

Índice

Capítulo 1	1
1.1 Enquadramento	3
1.2 Motivação e Objectivos	5
1.3 Estado da Arte	7
1.3.1 Fundamentos de física nuclear	7
1.3.2 História da energia nuclear	8
1.3.3 Propriedades da Radioactividade	9
1.3.4 Descoberta da fissão nuclear	10
1.4 Estrutura do Documento	12
1.5 Notação	13
Capítulo 2	15
2.1 A energia nuclear no mundo	17
2.1.1 Situação da energia nuclear na União Europeia	20
2.2 Análise da estrutura do sector nuclear em Espanha	22
2.3 O futuro da energia no mundo. Perspectiva Europeia	24
2.4 Energia nuclear em Portugal	28
2.4.1 Prós e Contras da energia nuclear	29
2.4.2 Planeamento energético	30
2.4.3 Localização da central nuclear	31
2.4.4 Recursos nacionais e internacionais de urânio	32
2.4.5 Inspeção e regulação nuclear	34
2.4.6 Impacto industrial	35
2.4.7 Produção e transporte de electricidade em Portugal	35

Capítulo 3	37
3.1 Enriquecimento de urânio	41
3.1.1 Difusão gasosa.....	41
3.1.2 Centrifugação gasosa.....	42
3.1.3 Separação a laser	42
3.2 Fabricação do combustível	43
3.3 Armazenamento temporário do combustível nuclear.....	44
3.4 Gestão de resíduos radioactivos	46
3.5 Classificação de resíduos nucleares	47
3.6 Composição dos resíduos nucleares	48
3.7 Transporte de resíduos radioactivos	49
Capítulo 4	51
4.1 Reactores nucleares	54
4.2 Classificação de reactores de acordo com algumas características ...	55
4.2.1 Reactor PWR.....	55
4.2.2 Componentes de um reactor PWR	58
4.3 Outros modelos de reactores nucleares.....	61
4.3.1 Reactor BWR.....	61
4.3.2 Reactor PHWR.....	62
4.3.3 Reactor AGR	62
4.3.4 RBMK - Light Water Graphite Reactor	63
4.3.5 Reactor FBR.....	63
4.4 Acidentes nucleares.....	64
4.4.1 Acidente nuclear de Chernobil.....	65
4.4.2 Acidente nuclear de Three Mile Island.....	67
4.4.3 Acidente nuclear de Fukushima, Japão	68
4.5 Níveis de alerta nuclear.....	70

4.6	Desmantelamento de centrais nucleares	74
4.6.1	Necessidade de se proceder ao desmantelamento	74
4.6.2	Fases do processo de desmantelamento	75
4.6.3	DECON (descontaminação)	75
4.6.4	SAFSTOR (Armazenamento seguro)	75
4.6.5	Enterramento.....	76
4.6.6	Custos e disponibilidade de fundos	76
Capítulo 5	79
5.1	Principais indicadores	81
5.1.1	Custo de licenciamento	81
5.1.2	Custo de construção.....	82
5.1.3	Estimativas recentes de custos de construção	83
5.1.4	Custo de operação e manutenção	84
5.1.5	Custo de combustível	85
5.1.6	Custo de tratamento de resíduos.....	87
5.1.7	Custo de desmantelamento.....	87
5.2	Viabilidade económica	90
5.2.1	Indicadores económicos	91
5.2.2	Cálculo de viabilidade económica.....	94
Capítulo 6	105
Bibliografia	109
Anexos	119

Índice de Figuras

Figura 1.1 – Energia necessária para remoção de um nucleão em função do número de massa	7
Figura 1.2 - Fissão nuclear.....	11
Figura 1.3 - Secção eficaz de fissão do ^{235}U e ^{238}U em função da energia do neutrão.....	11
Figura 2.1 - Número de reactores em construção no mundo.....	18
Figura 2.2 - Produção primária de energia: por tipo de produto energético (%) Ano 2009.....	20
Figura 2.3 - Mix de geração eléctrica. União Europeia	21
Figura 2.4 - Percentagem de energia nuclear na geração de electricidade pelos Estados-Membros no ano 2010.....	22
Figura 2.5 - Oferta total de energia primária no mundo. Ano 2005 (11435 Mtep).....	25
Figura 2.6 - Oferta total de energia primária no mundo. Ano 2030 (17100 Mtep).....	25
Figura 2.7 - Variação da estrutura de geração de energia eléctrica no mundo segundo as fontes	26
Figura 2.8 - Estrutura da procura de energia primária na União Europeia (EU-25)	26
Figura 2.9 - Estrutura da procura de energia eléctrica na UE-25. 2030.....	27
Figura 2.10 - Minérios de urânio.....	32
Figura 2.11 - Principais países fornecedores de urânio.....	34
Figura 2.12 - Repartição da Produção	36
Figura 3.1 - Ciclo de combustível nuclear	39
Figura 3.2 - Minério de urânio	40
Figura 3.3 - Bolo amarelo.....	40
Figura 3.4 - Processo de difusão gasosa	42
Figura 3.5 - Piscina de armazenamento de combustível nuclear	44
Figura 3.6 - Capacidade das piscinas de combustível nuclear	45
Figura 3.7 - Barril de armazenamento de combustível radioactivo	45
Figura 3.8 - Esquema de ciclo de combustível aberto e fechado	47

Figura 3.9 - Transporte de material radioactivo	49
Figura 4.1 - Representação esquemática de uma central nuclear.....	53
Figura 4.2 - Esquema de funcionamento de um reactor PWR.....	56
Figura 4.3 - Composição de um elemento combustível.....	60
Figura 4.4 - Central nuclear de Chernobil após o acidente.....	65
Figura 4.5 - Central nuclear de Three Mile Island em funcionamento.....	67
Figura 4.6 - Central nuclear de Fukushima durante o acidente	68
Figura 4.7 - Escala Internacional de Eventos Nucleares	71
Figura 4.8 - Acidentes Nucleares Classificados com a INES.....	73
Figura 5.1 - Equivalência de abastecimento de combustível para uma central eléctrica de 1000 MWe.....	87
Figura 5.2 - Preços médios aritméticos de electricidade em Portugal e Espanha e energia total anual.....	93
Figura 5.3 - Sensibilidade do VAL em função do incremento de diversas variáveis em percentagem em torno do cenário base	100
Figura 5.4 - Sensibilidade do VAL em função do incremento de diversas variáveis temporais em torno do cenário base	101
Figura 5.5 - Sensibilidade do VAL em função do incremento de diversas variáveis em percentagem em torno do cenário base	102
Figura 5.6 - Sensibilidade do VAL em função do incremento de diversas variáveis temporais em torno do cenário base	102
Figura 5.7 - Sensibilidade do VAL em função do incremento de diversas variáveis em percentagem em torno do cenário base	103
Figura 5.8 - Sensibilidade do VAL em função do incremento de diversas variáveis temporais em torno do cenário base	103

Índice de Tabelas

Tabela 2.1 - Reactores nucleares em operação e em construção e peso da electricidade de origem nuclear na produção nacional	17
Tabela 2.2 - Reactores em operação e em construção na União Europeia e peso da electricidade de origem nuclear na produção nacional	21
Tabela 2.3 - Centrais nucleares em Espanha. Situação em 2010	22
Tabela 2.4 - Funcionamento das centrais nucleares em Espanha no ano 2006.....	23
Tabela 3.1 - Composição do combustível nuclear após 3 anos.....	48
Tabela 4.1 - Centrais nucleares em operação comercial.....	55
Tabela 4.2 – Valores e gamas actuais típicos de reactores nucleares	64
Tabela 4.3 – Custo de desmantelamento nuclear na Europa Ocidental	77
Tabela 4.4 – Custo de desmantelamento nuclear na América do Norte.....	78
Tabela 4.5 – Custo de desmantelamento nuclear na Ásia	78
Tabela 5.1 - Hipótese de licenciamento e construção de 11 centrais nucleares de 1000 MW em Espanha, distribuição temporal do licenciamento (vermelho) e construção (negro).....	82
Tabela 5.2 - Estimativas de custos de construção em vários países.....	82
Tabela 5.3 - Distribuição do investimento para construção de uma central de 1000 MW.....	83
Tabela 5.4 - Estimativa de custo de combustível e O&M de uma central nuclear de 1000 MW (€/MWh) a desenvolver no projecto (preços de 2007)	84
Tabela 5.5 - Custo de O&M anuais em diversos países.....	85
Tabela 5.6 - Custos, em Euros, de 1 kg de urânio enriquecido a 3,6% na forma de UO ₂	86
Tabela 5.7 - Custos de desmantelamento em países da OCDE, Janeiro de 1988.....	88
Tabela 5.8 - Comparação de suposições em previsões recentes dos custos de geração das centrais de energia nuclear	89
Tabela 5.9 - Dados de entrada.....	94
Tabela 5.10 - Mapa de investimento (M€).....	96
Tabela 5.11 - Mapa de financiamento (M€).....	97

Tabela 5.12 - Mapa de exploração (M€).....	97
Tabela 5.13 - Mapa de cash-flow (M€).....	98
Tabela 5.14 – Resultado do investimento	99
Tabela A.1 - Cenário Base (M€).....	1
Tabela A.2 - Cenário pessimista (M€)	2
Tabela A.3 – Cenário optimista (M€) (1/2).....	3

Lista de Acrónimos

AGR	Advanced Gas Cooled Reactor (Reactor Refrigerado a Gás)
AIEA	Agencia Internacional de Energia Atómica
AIP	Associação Industrial Portuguesa
ATC	Cemitério nuclear (centralizado para armazenamento temporário)
BWR	Boiling Water Reactor (Reactor de Água em Ebulição)
CIP	Confederação Empresarial de Portugal
CSN	Consejo de Seguridad Nuclear (Conselho de Segurança Nuclear)
ENEA	Italian National agency for new technologies, Energy and sustainable economic development (Agência Nacional Italiana para novas tecnologias, energia e desenvolvimento económico sustentável)
EPR	European Pressurized Reactor (Reactor Pressurizado Europeu)
EUA	Estados Unidos da América
FBR	Liquid Metal Faster Breeder Reactor (Reactor de Neutrões rápidos)
GEE	Gases de Efeito de Estufa
IEA	International Energy Agency - Agência Internacional de Energia
MIBEL	Mercado Ibérico de Electricidade
O&M	Operação e Manutenção
OCDE	Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Económico
PHWR	Pressurised Heavy Water Reactor (Reactor de Água pesada Pressurizada)
PWR	Pressurized Water Reactor (Reactor de Água Pressurizada)
RNT	Rede Nacional de Transporte
RU	Reino Unido
SMR	Small Modular Reactor (Pequeno Reactor Modular)
UNGG	Urânio Natural Grafite Gaz
VVER	Vodo-Vodyanoi Energetichesky Reactor

Símbolo	Nome	Grandeza
€	euro	Unidade monetária
atm	atmosfera	Pressão
eV	electrão-volt	Energia
g	grama	Massa
h	hora	Tempo
m	metro	Comprimento
m ²	metro quadrado	Área
°C	grau Celsius	Temperatura
Pa	Pascal	Pressão
s	segundo	Tempo
tep	tonelada equivalente de petróleo	Energia
US\$	Dólar Americano	Unidade monetária
W	Watt	Potência
Wh	Watt-hora	Energia
n	nano	10 ⁻⁹
k	quilo	1000
M	mega	1 000 000
G	giga	1 000 000 000
T	tera	10 ¹²

Lista de Símbolos

Símbolo	Unidade	Definição
CF^a	M€	Cash-Flow do ano a
C_T^a	€	Custos totais do ano a
C_n	€/MWh	Custo nivelado
E_p^a	MWh	Energia produzida no ano a
F_c		Factor de carga
N_h	h	Número de horas do ano
P_i	kW	Potência instalada
R_b	M€	Receita bruta
T_{vu}	a	Tempo de vida útil
TIR		Taxa Interna de Rentabilidade
VAL	M€	Valor Actual Líquido
a		Ano do investimento
i		taxa de actualização

Capítulo 1

Introdução

- 1.1 Enquadramento
- 1.2 Motivação e Objectivos
- 1.3 Estado da Arte
- 1.4 Estrutura do Documento
- 1.5 Notação

1 Introdução

1.1 Enquadramento

A energia eléctrica é uma das formas de energia secundária que o homem mais utiliza na actualidade graças à sua facilidade de transporte e elevado rendimento durante conversões. A descoberta e a exploração de novas fontes de energia têm sido fundamentais para o progresso humano desde o início da luta pela sobrevivência biológica até ao mundo tecnológico de hoje. O primeiro passo foi aprender a controlar o fogo com madeira ou outra biomassa como combustível. Este foi seguido pelo aproveitamento do vento para mover os navios e moinhos de vento, a utilização da energia da água dos rios e mais tarde a exploração da energia química contida no carvão, petróleo e gás natural, através da sua combustão [1]. O desenvolvimento industrial, a expansão dos transportes e o crescimento de vários países causaram o aumento do consumo energético mundial. O aumento do preço do petróleo e as emissões de gases de efeito de estufa para a atmosfera têm contribuído fortemente para uso de fontes renováveis para produção de energia eléctrica, como sejam a energia eólica, solar térmica, fotovoltaica, ondas, marés, geotérmica, entre outras. Uma das fontes de energia não renovável em grande expansão que surgiu em meados do século 20 foi a energia nuclear [1]. A sua utilização contém riscos com grande impacto na opinião pública, apesar do número muito restrito de incidentes relevantes ocorridos em centrais nucleares. Por outro lado a energia nuclear possui diversos benefícios, como sejam a operação de baixo custo e zero emissões de gases de efeitos de estufa e o forte contributo para segurança de abastecimento energético, sendo vista como uma possível solução para os desafios energéticos e ambientais da actualidade. Apesar destas vantagens, a utilização deste tipo de tecnologia para produção de energia eléctrica com uma forte presença nos países pertencentes à OCDE, tem desencadeado por parte de alguns organismos inúmeras objecções em diversos países, tanto utilizadores como não utilizadores do nuclear, nomeadamente em Portugal. No presente momento Portugal não utiliza e nem tem projecto futuro para a sua introdução no mix energético nacional. A energia

nuclear marcou a actualidade no País, numa altura em que vários países se viram obrigados a procurar fontes de energia alternativas ao petróleo. Agora, com o renascer da discussão, surgem opiniões favoráveis chamando atenção para a necessidade de Portugal acompanhar a revolução industrial que está a acontecer no mundo.

O especialista em questões energéticas, Pedro Sampaio Nunes, ressaltou a enorme competitividade da Europa central que é feita essencialmente à base da energia nuclear, ao afirmar que a Espanha, ao abandonar esta forma de energia e investir apenas nas energias renováveis, originou um défice tarifário de 14 000 milhões de euros para poder manter as suas tarifas mais ou menos equivalentes às da França, que tem 80% de produção de electricidade de origem nuclear [2]. Apesar do custo de construção de uma central nuclear ser bastante elevado, este factor não impediu que um consórcio liderado por Patrick Monteiro de Barros decidisse apresentar um projecto ao ministro da economia para a construção de um reactor nuclear em Portugal avaliado em cerca 6000 milhões de euros [3]. Apesar de haver optimismo por parte de algumas entidades, vozes dissonantes alertam para um custo que o país pode não suportar. Segundo Nuno Ribeiro da Silva (especialista em questões energéticas), a recusa de construção de uma central nuclear em Portugal não tem a ver com problemas de segurança, mas com questões económicas e técnicas, salientando que não tem o mínimo sentido nos dias de hoje um país arrancar com a construção de uma única central nuclear e ninguém o fará sem subsídio, implicando a constituição de uma complexa e cara estrutura de higiene e segurança nuclear. [2]

Além dos custos financeiros e das questões técnicas também o ambiente marca uma posição. De acordo com Francisco Ferreira da Quercus, é necessário aprofundar uma discussão sobre política energética portuguesa que já tem alguns rumos traçados e que precisa é ser executada, nomeadamente nas áreas de eficiência energética e energias renováveis. [2]

Com ou sem energia nuclear, o desafio de Portugal passa por baixar a factura energética com o exterior e ultrapassar a escalada do preço do petróleo.

1.2 Motivação e Objectivos

Tendo em consideração os elevados custos da electricidade em Portugal e as diversas pressões a que o país está sujeito, como sejam: a perda de competitividade da economia, a redução de emissões de gases de efeito de estufa, o aumento dos preços dos combustíveis fósseis, a segurança de abastecimento e o elevado défice tarifário, que tem afectado negativamente os consumidores tanto privados como empresariais, há necessidade de se encontrar alternativas por forma a corrigir esta situação. A energia nuclear parece ser uma alternativa a estudar, apesar do seu reduzido contributo no que diz respeito à sustentabilidade e à segurança de abastecimento. No caso da sustentabilidade, existem factores que contribuem negativamente para resolução deste problema como é o caso do tratamento e armazenamento dos resíduos radioactivos para os quais ainda não existe solução definitiva, o risco e as consequências de um acidente nuclear e o fraco contributo que a central nuclear daria para a redução das emissões de gases de efeito de estufa, visto que o sector eléctrico em Portugal consome apenas 6% do total de combustíveis fósseis e consequentemente só é responsável por uma pequena parte das emissões poluentes [4].

Relativamente à segurança de abastecimento, o contributo da central nuclear não seria muito significativo, por um lado, a contribuição para a redução do consumo de combustíveis fósseis seria reduzida, sendo também assim reduzido o contribuindo para a redução da dependência desta forma de energia, por outro, esse contributo para a redução da dependência de combustíveis fósseis seria compensado por uma nova dependência, o combustível nuclear, embora o seu fornecimento seja mais seguro pois provém de países geopoliticamente mais estáveis.

A construção de uma central nuclear em Portugal poderá ser benéfica em termos de competitividade se o seu custo de geração for substancialmente mais baixo em relação as outras tecnologias de produção de energia eléctrica. Partindo deste ponto, este trabalho tem como objectivo analisar a viabilidade económica da construção de uma central nuclear em Portugal, de modo a verificar a sua contribuição em termos de competitividade. Para tal serão

considerados fundamentalmente quatro factores que influenciam o custo da energia nuclear, como sejam, o custo de licenciamento, custo de construção, custo de tratamento dos resíduos nucleares e custo de desmantelamento, analisando o comportamento dos principais indicadores económicos (VAL, TIR, PRI e custo nivelado).

Neste trabalho salienta-se a escolha do modelo de reactor e sua constituição, visto ser um elemento importante para a avaliação económica. A escolha do mesmo reactor que é usado por grande parte dos países utilizadores da energia nuclear é vantajosa, pois é possível trocar alguma experiência em termos técnicos que possam contribuir para o sucesso da produção de electricidade através da energia nuclear em Portugal.

É importante também referir que existem outras alternativas para a resolução do problema. As energias renováveis e a eficiência energética aparecem como fortes candidatos à resolução dos problemas que foram aqui apresentados.

1.3 Estado da Arte

1.3.1 Fundamentos de física nuclear

A energia de qualquer sistema quer este seja de natureza química, física ou nuclear, manifesta-se pela capacidade de realizar trabalho, libertação de calor ou radiação. A definição de energia nuclear reporta-se à energia libertada pela fissão ou fusão de núcleos atómicos. Alguns isótopos de certos elementos apresentam a capacidade de, através de reacções nucleares, emitirem energia. Esse processo ocorre espontaneamente em alguns elementos, noutros deve-se provocar a reacção mediante técnicas de bombardeamento de neutrões ou outras. A energia de ligação do núcleo atómico é uma medida de quão compactos os neutrões e protões estão. Uma medida desta compactidade é a energia de ligação por nucleão, esta mede-se através da energia necessária para remover um protão ou neutrão do núcleo e é função do número de massa do núcleo, como se pode observar na Figura 1.1. Assim, quando dois núcleos leves se fundem para formar um núcleo mais pesado, existe libertação de energia, e se um núcleo “pesado” instável sofre fissão originando elementos mais leves existe também uma libertação de energia, pois os núcleos atómicos resultantes possuem um estado fundamental de menor energia. Os elementos atómicos de maior estabilidade nuclear situam-se no denominado “patamar do ferro” composto pelo ^{62}Ni , ^{58}Fe e o ^{56}Fe . Estes elementos, se sofrerem reacções de fissão, “absorvem” energia. A energia nuclear é medida em unidades de electrão-volt ($1\text{eV} = 1.6 \times 10^{-19}\text{J}$) [4].

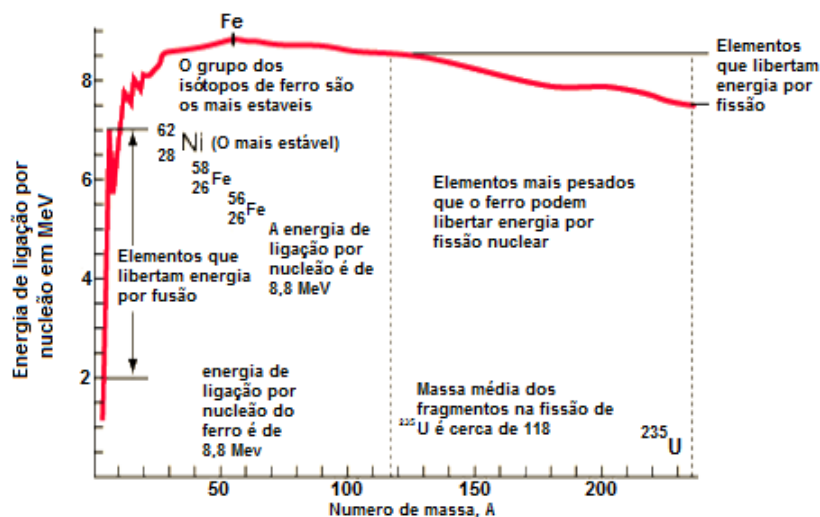


Figura 1.1 – Energia necessária para remoção de um nucleão em função do número de massa [4]

1.3.2 História da energia nuclear

O filósofo grego Demócrito de Abdera foi o primeiro a dar uma definição de átomo: a parte mais pequena constituinte da matéria. Isto foi no século V a.C.. Átomo (“a”-“tomo”, a – não, tomo - parte) é uma palavra de origem grega que significa "não divisível".

Em 1897, J.J. Thompson anunciou a descoberta de uma partícula carregada negativamente que ele chamou de electrão.

A descoberta do neutrão foi feita por James Chadwick em 1932. Chadwick "mediu" a massa da nova partícula, deduzindo que era semelhante à do próton (descoberto por Ernest Rutherford em 1919) mas com carga eléctrica neutra.

Em 1896, o físico francês Antoine Henri Becquerel comprovou que determinadas substâncias, como os sais de urânio, produzem radiações penetrantes de origem desconhecida. Este fenómeno foi baptizado de radioactividade.

Esta descoberta deu lugar a um grande número de investigações sobre o tema. Talvez as mais importantes, no que diz respeito à caracterização de outras substâncias radioactivas, tenham sido as realizadas por Pierre e Marie Curie. O casal Curie deduziu a existência de outro elemento de actividade mais elevada que o urânio, que em homenagem à terra natal de Marie Curie foi baptizado de polónio. Eles também foram os descobridores de um segundo elemento a que chamaram de rádio.

Estes três elementos, pelas suas características, assumiram um papel importante no desenvolvimento da energia nuclear. Actualmente, praticamente todas as centrais nucleares de produção de energia eléctrica utilizam o urânio como combustível.

Por outro lado o casal Frederic Joliot e Irène Curie (filha do casal Curie) foram os descobridores da radioactividade artificial. As conclusões obtidas pelo casal Joliot-Curie basearam-se na ideia de que a radioactividade, até então de carácter natural, podia ser produzida pelo homem, produzindo elementos radioactivos mediante ao bombardeamento com partículas alfa de alguns elementos químicos [5].

1.3.3 Propriedades da Radioactividade

A radioactividade é uma reacção nuclear de decomposição espontânea, ou seja, um núcleo instável decompõe-se noutro mais estável emitindo radiação. O núcleo “filha” (resultante da desintegração) pode não ser estável, e então desintegra-se num terceiro núcleo, o qual poderá continuar o processo, até que finalmente se chega a um núcleo estável. Diz-se que os sucessivos núcleos de um conjunto de desintegrações formam uma série radioactiva ou família radioactiva.

Pode-se dizer que são radioactivos todos os isótopos dos elementos com número atómico igual ou superior a 84, o polónio é o primeiro deles. Actualmente podem-se obter em laboratório isótopos radioactivos de substâncias cujos isótopos naturais são estáveis; é a chamada radioactividade artificial [6].

Os principais tipos de radiação são a radiação α (ou núcleos de hélio, He^{2+}), radiação β (electrões ou positrões), radiação γ (que são ondas electromagnéticas de comprimento de onda curto, 0,1 nm a 10^{-4} nm), emissão de positrões e captura electrónica [7].

Os diferentes tipos de radioactividade levam a diferentes caminhos para o decaimento que transmutam o núcleo numa outra espécie química. A radiação proveniente de fontes radioactivas distribui-se uniformemente em todas as direcções, obedecendo a sua intensidade à regra do inverso do quadrado.

As partículas alfa, devido à sua elevada massa, 7000 vezes superior à de uma partícula beta, e devido à sua carga, têm um alcance muito reduzido (menos de um décimo de milímetro dentro do corpo humano). O principal perigo radiológico das partículas alfa provém da sua ingestão, pois elas possuem um elevado poder destrutivo no seu pequeno alcance. Caso contactem com membranas de células em crescimento o seu estrago será máximo. A partícula alfa possui o núcleo atómico mais estável que se conhece pelo que a energia de ligação de uma partícula alfa é extremamente elevada (28,3 MeV). Trata-se de uma colecção excepcional de nucleões, e os núcleos mais pesados que podem ser decompostos em colecções de partículas alfa são também excepcionalmente estáveis (ex: carbono-12). Isto contrasta com a energia de ligação excepcionalmente baixa (8 MeV) para o hélio-3, que se forma num

passo intermédio da fusão protão-protão. Historicamente os produtos da desintegração radioactiva foram denominados de alfa, beta, gama quando se verificou que existiam 3 espécies diferentes de partículas ao passarem por um campo magnético ou eléctrico [4].

1.3.4 Descoberta da fissão nuclear

No final de 1938, pouco tempo antes da Segunda Guerra Mundial, uma equipa de investigadores alemães no Instituto Kaiser Wilhelm, em Berlim, integrado por Otto Hahn, Fritz Strassmann, Lisa Meitner e Otto Frisch, descobriu o fenómeno da fissão nuclear, através da identificação do elemento bário como consequência da divisão do núcleo de urânio.

Os primeiros estudos sobre a fissão nuclear foram realizados por Otto Hahn e Lise Meitner, com base nos resultados obtidos pelo casal Joliot-Curie que, através de análises cuidadosas, encontraram um elemento de número atómico intermédio numa amostra de Urânio bombardeado com neutrões.

Lise Meitner e Otto Frisch deduziram que ao bombardear o urânio com neutrões, ele capturava um neutrão e se dividia em dois fragmentos, emitindo uma grande quantidade de energia. Descobriu-se assim a fissão nuclear [5].

A fissão nuclear é uma das duas possíveis reacções que ocorrem quando se trabalha com a energia nuclear.

Em energia nuclear chama-se fissão nuclear à divisão do núcleo de um átomo. O núcleo parte-se em vários fragmentos com cerca de metade da massa original mais dois ou três neutrões.

Nas reacções de fissão, o neutrão, que não possui carga eléctrica, pode facilmente aproximar-se e reagir com um núcleo fissionável, por exemplo o urânio-235 (Figura 1.2) [4].

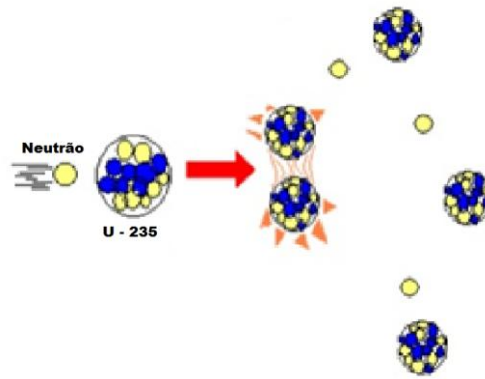


Figura 1.2 - Fissão nuclear [8]

Numa reacção nuclear de fissão a energia libertada é da ordem de 10 milhões de vezes superior ao de uma típica reacção química, 1kg de urânio 235 liberta 67,32 GJ de energia tornando-o a forma de energia mais concentrada que se conhece. O processo de fissão nuclear do urânio-235 é iniciado por um neutrão que provoca a fissão do átomo e a libertação de 2 a 3 neutrões rápidos (2,4 em média). Como se pode observar na Figura 1.3, a secção eficaz de fissão do urânio-235 é elevada para neutrões de baixa velocidade, mas reduz-se bastante para neutrões rápidos. Para neutrões com energias elevadas a probabilidade de ocorrer fissão diminui, logo estes neutrões provocam muito menos reacções de fissão do que os neutrões com energias baixas. Assim, necessitam primeiro de passar por um processo de termalização ou abrandamento da sua velocidade, para que a reacção possa ser auto-suficiente, gerando o que se chama uma reacção em cadeia.

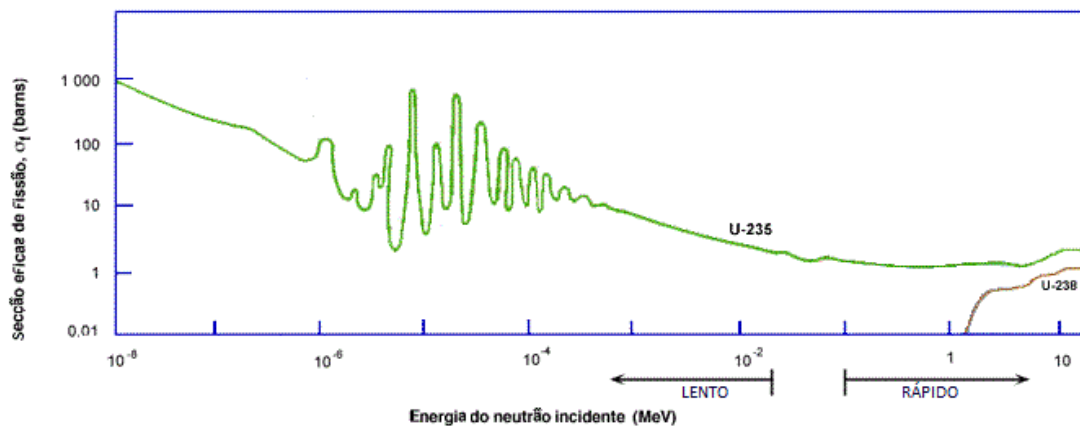


Figura 1.3 - Secção eficaz de fissão do ^{235}U e ^{238}U em função da energia do neutrão [9]

O urânio natural contém apenas 0,72% de urânio-235 sendo o restante composto pelo isótopo não-fissionável urânio-238, desta forma uma massa de urânio natural só por si, por maior que seja, não consegue gerar uma reacção em cadeia, pois somente o urânio-235 é fissionável. A probabilidade de um neutrão de 1MeV fissionar um núcleo de urânio-235 é bastante baixa, mas esta pode ser aumentada por um factor de centenas quando o neutrão é abrandado através de uma série de colisões inelásticas com núcleos mais leves como hidrogénio, deutério ou carbono. Este facto é a base para a possibilidade de produzir reactores de fissão práticos.

1.4 Estrutura do Documento

Esta Dissertação é composta por seis capítulos incluindo este primeiro referente à introdução.

No capítulo 2 são abordados aspectos como a energia nuclear no mundo e em particular a energia nuclear na união europeia, faz-se uma análise sobre a estrutura do sector nuclear em Espanha e o futuro da energia no mundo.

Neste capítulo também é feita uma análise sobre a energia nuclear em Portugal, são abordados aspectos como o planeamento energético, a localização da central nuclear, os recursos nacionais e internacionais, a inspecção e regulação nuclear e o impacto industrial. Por fim, faz-se uma análise sobre o *mix* energético Português.

O capítulo 3 introduz uma análise ao ciclo de combustível, isto é, um estudo a todas as fases pela qual o combustível nuclear passa desde a sua extracção, passando pela produção de energia e processamento dos resíduos.

No capítulo 4 descrevem-se os principais componentes de uma central nuclear e o seu princípio de funcionamento. Analiza-se com detalhe os principais componentes de um reactor PWR (objecto de estudo deste trabalho) e faz-se uma breve descrição de alguns modelos de reactores nucleares.

Este capítulo também faz referência aos principais acidentes nucleares que ocorreram, analisa a escala de ocorrências nucleares e mostra como se processam as várias fases de desmantelamento de uma central.

No capítulo 5 são apresentados os principais custos da central como sejam o de licenciamento, o de construção, o de operação e manutenção, o de tratamento dos resíduos e o de desmantelamento. Também é apresentado neste capítulo, um estudo de viabilidade económica analisando três diferentes cenários e é apresentada uma análise de sensibilidade do VAL em função de algumas variáveis que têm grande influência na avaliação económica.

No capítulo 6 são apresentadas as principais conclusões.

1.5 Notação

As figuras, tabelas e equações são apresentadas com referência ao capítulo em que são apresentadas e são numeradas sequencialmente no respectivo capítulo. A numeração é reiniciada em cada capítulo. As referências bibliográficas são numeradas de forma sequencial. A identificação de equações é apresentada entre parêntesis curvos (), e a identificação de referências bibliográficas é apresentada entre parêntesis rectos [], elaborada segundo a norma IEEE 2006. Expressões em língua estrangeira são apresentadas em itálico. O conjunto de simbologia utilizada no decorrer do texto segue o apresentado previamente na lista de acrónimos e símbolos.

Capítulo 2

Produção de energia eléctrica a partir de energia nuclear e suas condicionantes no mercado mundial

2.1 A energia nuclear no mundo

2.2 Análise da estrutura do sector nuclear em Espanha

2.3 O futuro da energia no mundo. Perspectiva Europeia

2.4 Energia nuclear em Portugal

2 Produção de energia eléctrica a partir de energia nuclear e suas condicionantes no mercado mundial

2.1 A energia nuclear no mundo

Existem no Mundo um total de 430 centrais nucleares, que produzem 13,4% da electricidade consumida. No total contabilizam uma capacidade líquida instalada de 370,499 GWe que subirá para 431,936 GW(e) com a conclusão de 62 (Figura 2.1) reactores que se encontram actualmente em construção em 13 países [10, 11].

Tabela 2.1 - Reactores nucleares em operação e em construção e peso da electricidade de origem nuclear na produção nacional [10]

País	Reactores em operação (2012)		Reactores em construção (2012)		% Electricidade de origem Nuclear (2011)
	Nº	% sobre o total	Nº	% sobre o total	
Argentina	2	0,45	1	3,4	4,97
Arménia	1	0,23	—	—	33,17
África do Sul	2	0,45	—	—	5,19
Brasil	2	0,45	1	3,4	3,17
Canadá	18	4,07	—	—	15,33
China	16	2,26	26	18,5	1,85
Estados Unidos	104	23,3	1	1165	19,25
Índia	20	3,62	7	25,9	3,68
Irão	1	—	—	—	0,04
Japão	50	12,44	2	3,7	18,14
México	2	0,45	—	—	3,55
Paquistão	3	0,45	2	3,7	3,77
República da Coreia	23	4,52	3	3,7	34,64
Rússia	33	7,01	11	18,5	17,59
Suíça	5	1,13	—	—	40,85
União Europeia-27	133	34,39	4	11,1	30,69 ¹
Ucrânia	15	3,39	2	7,4	47,20
TOTAL	430	100	60	100	

Conforme indicado na Tabela 2.1, os Estados Unidos são o país com mais centrais nucleares em funcionamento, dispendo de 104 reactores representando cerca de 24,19% do total de reactores em operação no mundo. Seguidamente surgem a França (Tabela 2.2) e o Japão que são países que

¹ O valor representa a média da electricidade de origem nuclear nos países da união europeia produtores de energia nuclear.

também produzem muita energia eléctrica de origem nuclear, em França existem 58 reactores e no Japão 50 reactores, representando respectivamente 13,49% e 11,63% do total de reactores em operação no mundo.

Os 27 estados membros da União Europeia possuem um total de 133 reactores, o que representa 30,93% do total de centrais nucleares em funcionamento no mundo. No caso de Espanha, os 8 reactores em funcionamento representam cerca de 6,02% do total de reactores europeus em funcionamento [12].

Os 8 países com maior produção de energia eléctrica de origem nuclear (EUA, França, Japão, Rússia, República da Coreia, Canadá, Reino Unido e Suécia) possuem 313 reactores, ou seja, 72% das instalações nucleares de produção de electricidade.

Como já foi referido anteriormente, existem no mundo cerca de 62 reactores em construção que estão repartidos em 13 países.

A China encabeça a lista de países que estão a construir centrais nucleares, com cerca de 26 reactores (Figura 2.1), quase 43% dos reactores em construção no mundo estão localizados neste país. Rússia e Índia encontram-se em segundo e terceiro lugar na lista dos países que estão a construir centrais nucleares com 11 e 7 reactores respectivamente.

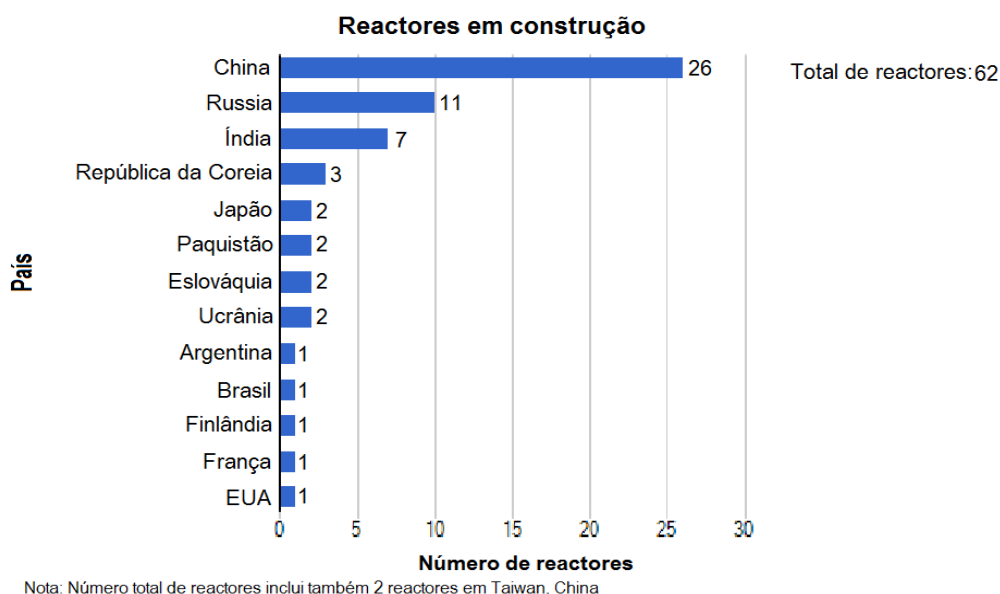


Figura 2.1 - Número de reactores em construção no mundo [10]

Atendendo à importância de geração eléctrica de origem nuclear em 2011, a França destaca-se, em termos relativos, de forma considerável sobre os outros

países. De facto 77,71% da energia eléctrica neste país é de origem nuclear. Pode-se mencionar o caso da Bélgica onde 53,96% da produção de electricidade deriva das centrais nucleares. Além desses países, podem ser mencionados alguns países dentro da esfera de influência russa, tais como Eslováquia, Arménia e Ucrânia, onde a electricidade de origem nuclear ronda os 45%.

A Comissão Europeia contabilizou, em agosto de 2006, cerca de 204 instalações nucleares planeadas ou propostas em todo mundo, das quais 63 na China, 24 na Índia, 23 nos Estados Unidos e 12 na União Europeia. Em conjunto, se levarem a cabo tais planos, a capacidade instalada de geração de energia em instalações nucleares seria incrementada em mais de 125 000 MW [12].

Estes números sugerem duas características da situação da energia nuclear no mundo. Primeiro, a produção de electricidade através da energia nuclear concentra-se apenas em alguns países e segundo, os países que têm maior número de reactores nucleares são países desenvolvidos. No entanto, em relação a esta segunda avaliação, é importante salientar que os países em desenvolvimento, como é o caso da Índia e China, já têm bastantes reactores em funcionamento, 20 e 16, respectivamente, e 33, entre ambos, em construção.

Nesta breve revisão do estado da produção de electricidade nuclear no mundo poderão surgir algumas considerações em relação ao estado da produção de electricidade de origem nuclear. Em primeiro lugar destaca-se a importância que este tipo de energia tem a nível mundial na produção de electricidade, situando-se em torno dos 13,4% [11]. Em segundo lugar, destaca-se uma concentração significativa deste tipo de instalação de geração eléctrica nos países desenvolvidos, que pode ser relacionada com o avanço tecnológico destes sistemas de produção de energia. Em terceiro lugar, e como consequência do anterior, os actuais desenvolvimentos nesta forma de produzir energia eléctrica estão a ser realizados em alguns países menos desenvolvidos, os chamados países emergentes. Nota-se um crescimento económico destes países, como é o caso da Índia, China e Rússia. Parece que a resposta ao enorme crescimento e à demanda de energia eléctrica que se está a produzir nestes países, é resultado de um espectacular dinamismo económico, que a

médio prazo serão canalizados principalmente para a tecnologia nuclear, hoje muito mais difundida [10].

2.1.1 Situação da energia nuclear na União Europeia

Considerando a oferta total de energia primária em toda a União Europeia, em 2009 a energia nuclear representou 29% do total, como se observa na Figura 2.2. Neste momento, o petróleo já não representa a fonte de energia primária mais importante, com cerca 13% do total. O gás natural tem vindo a ganhar peso nos últimos anos e responde por 19% da oferta de energia primária, enquanto os combustíveis sólidos fósseis (carvão) atingiram os 21%. Em suma, as fontes de energia primária a partir de combustíveis fósseis representam 80% do total da energia na União Europeia, cerca de 50% destes são importados, indicando a alta dependência dessas fontes de energia. Por outro lado, o peso das energias renováveis é de apenas 18% em relação à energia primária total consumida em toda a Comunidade Europeia [13].

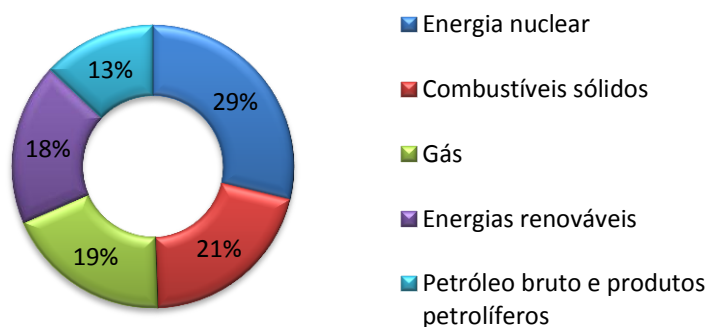


Figura 2.2 - Produção primária de energia: por tipo de produto energético (%) Ano 2009 [13]

Analisando o mix de geração eléctrica no conjunto dos países da união europeia (Figura 2.3), a energia eléctrica de origem nuclear ronda os 31%, sendo a maior produtora de todas as tecnologias de geração. Próximo desta percentagem encontra-se o carvão, uma vez que as centrais térmicas a carvão geram 30% da electricidade produzida na União Europeia. O gás natural é terceira fonte de energia mais utilizada, cerca de 20% da electricidade provém deste tipo de centrais, enquanto as centrais que consomem petróleo produzem

apenas 4% da electricidade. Mais uma vez salienta-se a dependência dos combustíveis fósseis situando-se nos 54% da electricidade produzida pelas centrais utilizando essas fontes de energia (carvão, gás e combustível). A produção de electricidade a partir de fontes renováveis (solar, eólica, hídrica, biomassa e outros) atingiu, no ano indicado em 2004, 9% em toda a União Europeia [12].

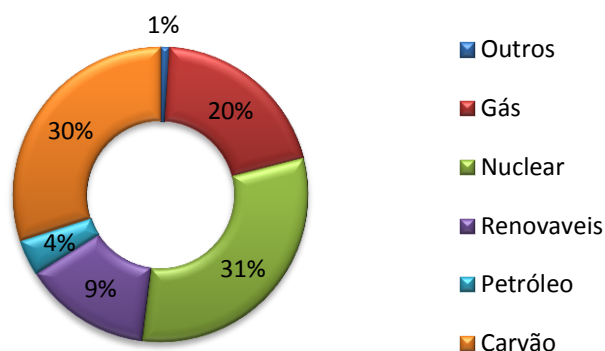


Figura 2.3 - Mix de geração eléctrica. União Europeia [12]

Tabela 2.2 - Reactores em operação e em construção na União Europeia e peso da electricidade de origem nuclear na produção nacional [12]

País	Nº Reactores em operação (2012)	Nº Reactores em construção (2012)	% Electricidade de origem nuclear (2011)
Alemanha	9	—	17,79
Bélgica	7	—	53,96
Bulgária	2	—	32,58
Eslováquia	4	2	54,02
Eslovénia	1	—	41,73
Espanha	8	—	19,48
Finlândia	4	1	31,58
França	58	1	77,71
Holanda	1	—	3,60
Hungria	4	—	43,25
Reino Unido	17	—	17,82
República Checa	6	—	32,96
Roménia	2	—	18,98
Suécia	10	—	39,62
TOTAL UE-27	133	4	

Dentro da UE a importância da energia nuclear no mix de geração varia de forma considerável entre os diferentes Estados-Membros. De entre os países onde a electricidade de origem nuclear tem maior peso destaca-se, como já foi

referido anteriormente, a França. Distinguem-se também neste terreno, a Bélgica, Eslováquia e Hungria, onde a percentagem de electricidade de origem nuclear é superior a 40%. Em Espanha, a electricidade de origem nuclear representa cerca de 20% da produção total de electricidade.

Apenas três países com importância económica e territorial estão ausentes do clube nuclear europeu, como é o caso da Itália, Áustria e Polónia.

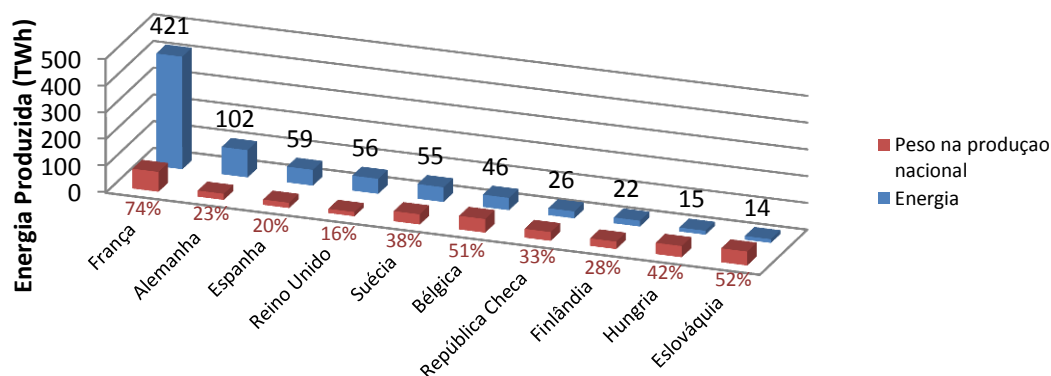


Figura 2.4 - Percentagem de energia nuclear na geração de electricidade pelos Estados-Membros no ano 2010 [10]

2.2 Análise da estrutura do sector nuclear em Espanha

A Espanha tem actualmente instalado um total de oito reactores nucleares, totalizando 59 256 GWhe de produção anual [10]. A primeira central nuclear que entrou em operação foi baptizada José Cabrera em 1968, esta central cessou o funcionamento em Abril de 2006. Grande parte das centrais nucleares espanholas foi instalada na década de 80, sendo Vandellós 2 e Trillo as últimas centrais que foram inauguradas em 1987 e 1988 respectivamente [12].

Tabela 2.3 - Centrais nucleares em Espanha. Situação em 2010 [10]

Central	Tipo de reactor	Estado	Localização	Capacidade (MWe) Bruto	Capacidade (MWe) Líquida	Data de entrada
Almaraz - 1	PWR	Operacional	Cáceres	1045	1011	01/05/1981
Almaraz - 2	PWR	Operacional	Cáceres	1044	1006	08/10/1983
Asco - 1	PWR	Operacional	Tarragona	1033	995	01/05/1981
Asco - 2	PWR	Operacional	Tarragona	1027	997	23/10/1985
Cofrentes	BWR	Operacional	Valência	1092	1064	14/10/1984
Santa Maria de Garona	BWR	Operacional	Burgos	466	446	02/03/1971
Trillo - 1	PWR	Operacional	Guadalajara	1066	1003	23/05/1988
Vandellos - 2	PWR	Operacional	Tarragona	1087	1045	12/12/1987
Jose Cabrera - 2	PWR	Encerrada	Guadalajara	150	141	14/07/1968
Vandellos - 1	GCR	Encerrada	Tarragona	500	480	06/05/1972

A primeira central a ser encerrada foi a central de Vandellós 1, devido a um acidente que ocorreu em 1989, após 17 anos em funcionamento². A central de Santa María de Garoña que foi construída antes da Vandellós 1 e ainda se encontra em funcionamento ao fim de mais de 40 anos.

Em 2006 estas centrais nucleares geraram mais de 60 000 GWh de electricidade, o que mostra uma das características destacadas de funcionamento deste modo de produção de energia eléctrica, que são os elevados factores de carga e operação. O facto de serem centrais de base³ faz com que estejam ligadas a quase totalidade das 8760 horas do ano próximo do limite da potência [12].

Tabela 2.4 - Funcionamento das centrais nucleares em Espanha no ano 2006 [12]

	Potência (MW) (a 31/12/06)	Produção (GWh)	Factor de carga	Factor de operação
José Cabrera	150,1	416,82	96,49	99,98
Sta. María de Garoña	466,0	3842,33	94,12	96,88
Almaraz I	977,0	7438,1	86,92	89,38
Almaraz II	980,0	7501,08	87,38	88,43
Ascó I	1032,5	7769,83	85,90	91,00
Ascó II	1927,2	8335,92	92,64	95,14
Cofrentes	1092,0	9218,72	96,37	96,94
Vandellós II	1087,1	7317,70	76,84	80,08
Trillo	1066,0	8230,53	88,14	88,90
Total	7727,8	60071,84	88,18	90,46

Esta característica das centrais nucleares significa que o rendimento por unidade de energia estabelecida seja mais elevado que qualquer outra forma de produção de electricidade, daí a importância relativa da geração de energia nuclear sobre o total da produção nacional. Com 9,4% da capacidade instalada em 31 de Dezembro de 2006, as centrais nucleares geraram ao longo deste ano quase 22% da electricidade, com níveis de rendimento elevado por unidade de potência estabelecida. Compare-se com as centrais a carvão (15,5% de potência e 25,1% da geração de energia) ou centrais de ciclo combinado (19,9% e 24,2% respectivamente). Esses dados demonstram o bom desempenho das centrais nucleares em Espanha [12].

² A central de Vandellós I encerrou a sua actividade por causa das sequelas de um incêndio que afectou de maneira trágica as instalações, embora sem causar consequências em termos de emissões radioactivas para o meio ambiente; o proprietário decidiu proceder ao encerramento da central e posterior desmantelamento devido ao elevado custo que acarretaria continuar a actividade após o incêndio.

³ Isto é, funcionam a plena carga, aproximadamente 100% das horas do ano, sempre e quando não estão paradas por causa de alguma revisão ou incidente. Por outras palavras, produzem electricidade de forma contínua e ininterrupta.

2.3 O futuro da energia no mundo. Perspectiva Europeia

As condicionantes do horizonte global de energia podem ser analisadas numa dupla perspectiva: por um lado, os países que influenciarão a demanda futura, e por outro lado, aqueles países que definem o nível e a estrutura da oferta. Do ponto de vista da demanda de energia global, é necessário considerar o impacto que já está a ter na forte tendência de crescimento económico dos países emergentes, com um grande volume populacional, como é o caso da China, Índia, Rússia, entre outros. O crescimento económico desses países é caracterizado por uma alta elasticidade (bastante superior à unidade) de consumo de energia, dada a natureza dos modelos de desenvolvimento que estão a ser utilizados com características semelhantes à dos países desenvolvidos (uso intensivo de recursos energéticos). Isto está resultar num contexto de forte concorrência pela obtenção de fontes de energia (petróleo e gás natural em particular), afectando os preços.

Do lado da oferta, no que se refere à sua estrutura, encontram-se várias restrições no seu desenvolvimento. Por um lado, a disponibilidade de recursos, que irá determinar os modos de produção a utilizar, em particular no caso da geração de electricidade. Por outro, a dinâmica da inovação tecnológica e as suas aplicações comerciais, que vai definir o progresso na utilização, especialmente de sistemas produtivos economizadores de recursos fósseis, os mais ameaçados pela escassez e pelos seus efeitos poluidores, na medida em que a tecnologia contribui para a melhoria da eficiência energética e expansão da disponibilidade comercial dos mesmos.

Com base nas previsões publicadas pela Agência Internacional de Energia (IEA), em 2030 (Figura 2.5) a oferta de energia primária no mundo será de 17 100 Mtep, para um cenário de referência com as actuais políticas energéticas. Isto representa um aumento de 50% na oferta de energia em comparação com os dados registrados em 2005 (Figura 2.6), que era de 11 435 Mtep.

Quanto à distribuição por fontes de energia, segundo dados do IEA, no cenário de referência, o petróleo continua a ser a energia mais importante, na verdade será responsável por 32,6% da oferta de energia primária. O gás natural será

responsável por 22,6%, aumentando ligeiramente o seu peso no balanço energético (em 2005 representava 20,7%) [12].

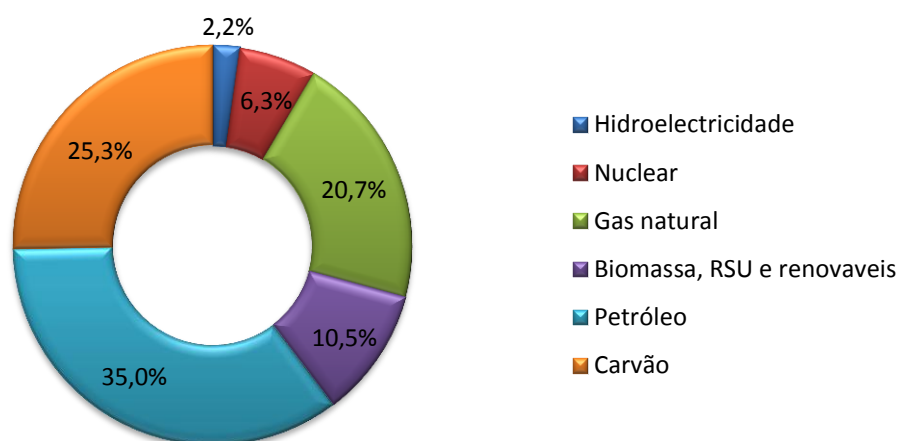


Figura 2.5 - Oferta total de energia primária no mundo. Ano 2005 (11435 Mtep) [12]

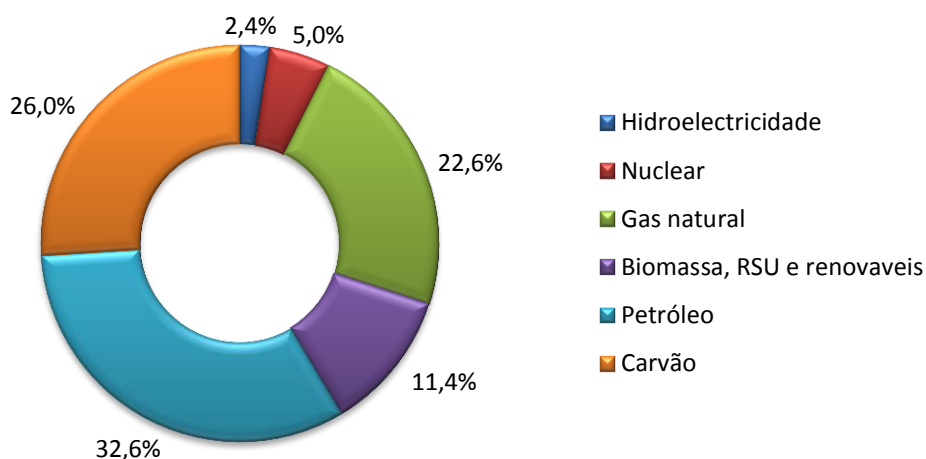


Figura 2.6 - Oferta total de energia primária no mundo. Ano 2030 (17100 Mtep) [12]

Quanto à produção de energia eléctrica no mundo (Figura 2.7), as estimativas da IEA prevêm que esta duplique em 2030, no cenário de referência. O que quer dizer que a geração de energia eléctrica aumentará de 17 408 TWh em 2004 para 33 750 TWh em 2030. Na composição do balanço eléctrico, a geração de carvão aumentará o seu peso, passando dos 40% actuais para 44% em 2030, e a produção em centrais de gás natural aumentará a participação no balanço, passando de 20% para 23% [12].

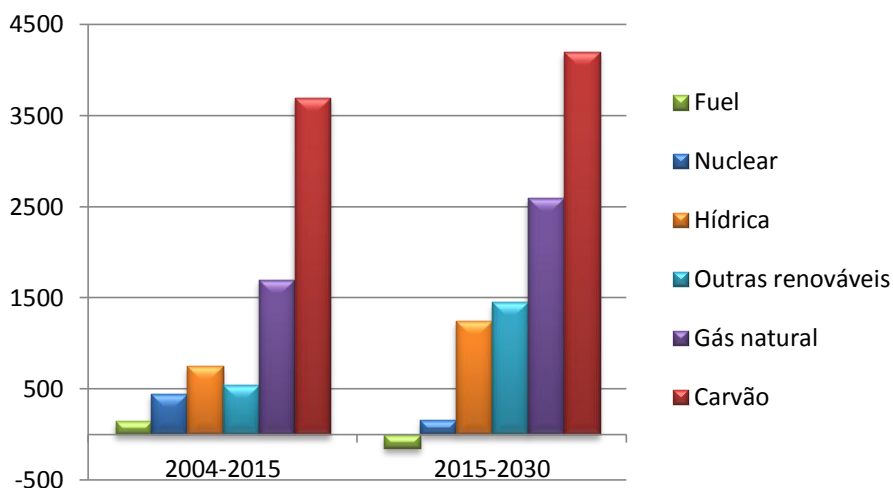


Figura 2.7 - Variação da estrutura de geração de energia eléctrica no mundo segundo as fontes [12]

Na União Europeia, as previsões que o documento *European Energy and Transport. Trends to 2030 update 2005*, indica que em 2030 a procura de energia primária para a UE-25 alcançará 1895,2 Mtep, o que representa um aumento de 14,6% em comparação com a procura em 2000 (1653,8 Mtep), bem abaixo da evolução que a procura global apresentará. Isto significa que o dinamismo energético a que a evolução da procura se refere, não se colocará no âmbito europeu. Com base na estrutura de energia primária para o conjunto da UE-25 (Figura 2.8), o mais significativo é a importância recente das energias renováveis, que passará de 5,8 em 2000 para 12,2% em 2030. O gás natural também ganhará peso no balanço energético e, de acordo com essas estimativas, passará de 22,8 para 27,3% no mesmo período [12].

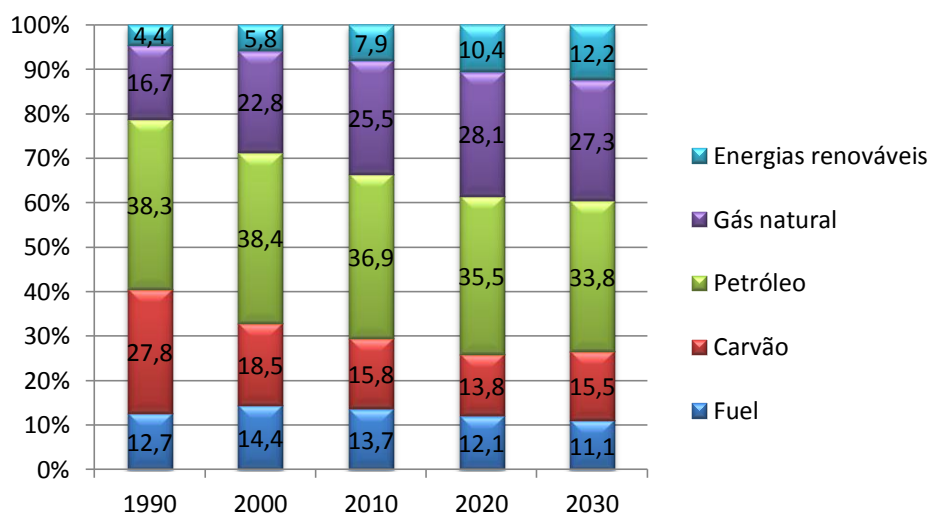


Figura 2.8 - Estrutura da procura de energia primária na União Europeia (UE-25) [12]

Quanto à previsão do consumo de energia eléctrica, a Comissão Europeia estima em 4366,6 TWh a procura de energia eléctrica na UE-25 para o ano de 2030, um aumento de 50,5% em comparação com a procura registrada em 2000 (2900,8 TWh), indicando uma mudança na procura global de energia na Europa para este tipo de energia.

Com base na estrutura de geração de energia eléctrica (Figura 2.9), destaca-se a participação das energias renováveis, incluindo a biomassa, que em 2005 correspondeu a cerca de 15,5% e em 2030 representará cerca de 27,6%. O gás natural também ganhará peso no equilíbrio energético passando de 20,3 para 24% no mesmo período.

Em resumo, no âmbito específico da UE, as previsões da Comissão Europeia aqui abordadas atribuem uma preferência pelo uso de gás natural como combustível (e tecnologia) de geração eléctrica. Nas próximas duas décadas a produção de electricidade a partir de gás natural crescerá substancialmente, até aos últimos cinco anos previstos, reduzindo a sua participação em favor do carvão (emissões reduzidas) que tenderia a expandir a sua participação na geração de electricidade. De igual modo, a Comissão Europeia prevê que as energias renováveis, em particular a eólica e a proveniente da queima de biomassa, terão um papel único de modo crescente no mix eléctrico europeu [12].

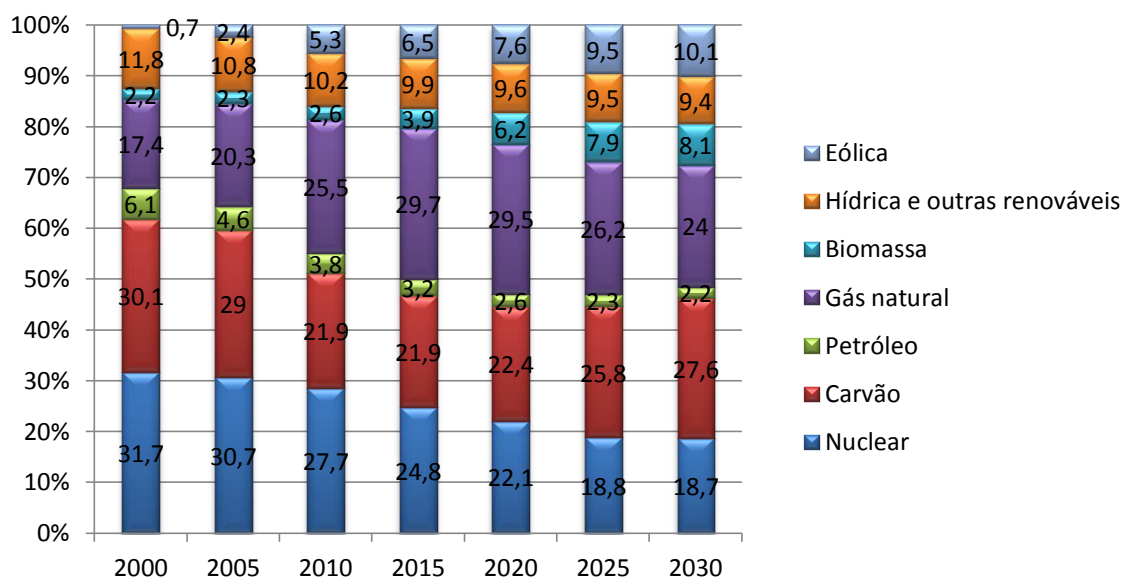


Figura 2.9 - Estrutura da procura de energia eléctrica na UE-25. 2030 [12]

2.4 Energia nuclear em Portugal

Em Portugal não existe, nem se prevê para breve a construção de nenhuma central nuclear para produção de energia eléctrica. Entre muitas razões, aquela que tem gerado grandes debates por parte de alguns organismos é o seu custo de construção bastante elevado que representará um encargo incomportável para a situação económica portuguesa [2].

O projecto de construção de uma central nuclear perto de Peniche foi suspenso a partir do momento em que o estudo económico realizado concluiu que esta não seria a opção mais barata, em confronto com as do carvão ou do *fuel*. Para além das questões económicas, o meio ambiente também marca uma forte presença na decisão sobre a energia nuclear, nomeadamente a questão sobre o tratamento dos resíduos radioactivos, o destino final do combustível usado e o seu isolamento, representando um forte emissor de radioactividade prejudicial à saúde das populações e meio ambiente. Mas relativamente ao perigo de um acidente nuclear, Portugal não está completamente livre deste factor negativo da energia nuclear de fissão, se se observar que Espanha com cerca de 8 reactores em funcionamento, 1 dos quais junto ao rio Tejo que, vindo do país vizinho, atravessa Portugal para desaguar no oceano Atlântico (Central nuclear de Almaraz). Este facto tem provocado grandes controvérsias junto da opinião pública portuguesa e tem sido objecto de encontros entre representantes dos dois países. Foi até decidida, com vista ao estudo e proposta de soluções, a criação de uma Comissão Luso-Espanhola de Ordenamento do Território e do Ambiente [14]. Independentemente da posição sobre a introdução da central nuclear no “mix” energético português, há questões que necessitam de esclarecimento e ponderação e cujo debate público deverá abordar, com o objectivo de formular de forma precisa as opções a considerar. De seguida procura-se identificar algumas destas questões e também distinguir três grandes correntes de opinião sobre a opção nuclear em Portugal.

2.4.1 Prós e Contras da energia nuclear

Os defensores da introdução da energia nuclear em Portugal apoiam esta opção com base nas vantagens relativas ao ambiente, reduzidas emissões de GEE), baixo custo de operação (particularmente se os combustíveis fósseis forem onerados com taxas de carbono) e segurança geopolítica (devido à repartição mundial dos recursos).

Relativamente às críticas sobre gestão de resíduos radioactivos de alto nível de actividade, começam por chamar a atenção para o seu baixo volume, o que facilita a sua concentração e vigilância em locais apropriados e alguns defendem mesmo que existe já uma solução tecnologicamente comprovada (o repositório geológico profundo em formações geologicamente estáveis).

Sobre segurança nuclear argumentam a melhoria crescente do desempenho da indústria, que apresenta o mais baixo índice de sinistralidade do sector energético, e a prevista melhoria das novas gerações de reactores (quer dos acidentes de criticalidade quer na produção de resíduos radioactivos) [15].

Relativamente aos custos de produção, o preço do kWh produzido, argumentam que é um dos mais baixos comparativamente com outras tecnologias de produção de energia eléctrica [16]. Sobre o desmantelamento sublinham a sua baixa incidência (quase desprezável) no preço da energia. As principais associações empresariais (CIP e AIP) tomaram posição favorável à introdução da energia nuclear, embora não tivessem revelado os estudos que fundamentam a adequação dessa solução ao caso português, pelo que ficou uma impressão de seguidismo e louvor acrítico da iniciativa privada. Este grupo não exclui as soluções renováveis e de eficiência energética, mas coloca sérias reservas sobre a sua capacidade de constituir uma solução durável para o problema da energia [17].

Pode-se ainda identificar um terceiro grupo (prudentes), que admitem o contributo do nuclear no sistema energético, mas que sublinham a circunstância de o País não reunir as condições de informação e preparação para uma tomada de posição, seja ela de opção ou rejeição da alternativa nuclear, pelo que é necessário realizar os estudos adequados e reunir as capacidades para uma decisão esclarecida. Neste grupo será, talvez, possível distinguir 2 subgrupos: os que admitem que os trabalhos e estudos irão,

possivelmente, concluir que uma nova geração de reactores de fissão nuclear pode integrar o “mix” da produção de energia primária em Portugal, muito particularmente uma nova geração que possibilitasse também, numa visão de longo prazo, atacar o problema dos transportes (produção de hidrogénio); um outro subgrupo que considera como mais provável que o resultado final seja o de concluir pela inadequação da opção nuclear aos problemas energéticos do País. Também para este grupo as renováveis e a eficiência energética são componentes importantes do “mix” energético [15].

Este grupo justifica a sua posição com base em questões ambientais ligadas à gestão dos resíduos ao desmantelamento das centrais em fim de vida útil, de segurança e de custos de construção elevados. Para este grupo as dificuldades energéticas devem ser atacadas pelo recurso intensivo às energias renováveis (principalmente a eólica em articulação com a hídrica e pela via da eficiência energética. Também se argumenta que com a opção nuclear somente se está a atacar uma parte (20 a 30%) do problema energético, nada se fazendo sobre os transportes, principal sector consumidor de combustíveis fósseis [18]. Alguns colocam em dúvida a existência de recursos que possam satisfazer as necessidades, pelo que se estaria, deste modo, a substituir uma dependência (combustíveis fósseis) por outra (urânio).

2.4.2 Planeamento energético

No presente momento está em curso, em diferentes fases de execução, um amplo conjunto de investimentos na produção de energia eléctrica como é o caso da eólica (com uma meta de 5100 MW), a cogeração (8 centrais de 400 MWe cada, duas das quais para Sines), as centrais de biomassa (250 MWe), mais uma reserva de 800 MW, com base na tecnologia de carvão limpo. De acordo com este cenário era importante saber como é que a energia nuclear se enquadraria neste programa, particularmente se se tiver presente que para rentabilizar infra-estruturas a central deverá ter mais do que um reactor (embora instalados com desfasamento de alguns anos). Neste mesmo quadro, há que ter presente que a rede eléctrica nacional não está preparada para encaixar 1000 MW, pelo que teria que ser reforçada num investimento que alguns estimam entre 50 e 100 M€ [19].

2.4.3 Localização da central nuclear

A disponibilidade de água para o arrefecimento da central é um dos factores determinantes para a sua localização (uma central de 1000 MWe terá que dissipar aproximadamente o dobro da potência eléctrica em calor), a sismicidade do local (factor não impeditivo, mas que encarece a construção, se se construir num local de sismicidade elevada) e proximidade do mercado consumidor. Qualquer dos rios internacionais do país pode suportar a carga hídrica correspondente, embora os caudais disponíveis imponham a opção por circuito fechado de refrigeração assistido com torres de arrefecimento (ou evaporação). A outra alternativa de refrigeração (circuito aberto) poderia ser com água do mar, o que imporá uma localização junto ou muito próximo da costa, mas com a litoralização da população portuguesa, a costa alentejana seria uma possível opção (Sines?). Como a construção da central terá que ser encarada numa óptica de mercado ibérico de electricidade, por uma questão de gestão de rede e proximidade aos consumidores uma localização possível será no eixo Lisboa-Madrid, junto ao rio Tejo (duas centrais). Contudo, a aceitação pública será sempre muito lenta e demorada e teria que ser suportada por estudos muito detalhados e completos [15].

2.4.4 Recursos nacionais e internacionais de urânio

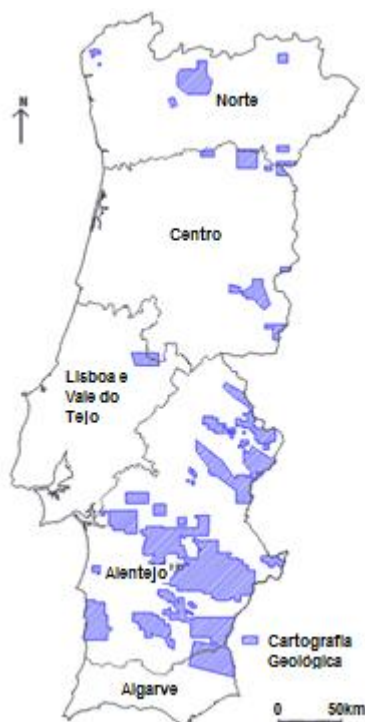


Figura 2.10 - Minérios de urânio [20]

Portugal é um país relativamente rico em recursos minerais metálicos e não metálicos, estes últimos assumem particular importância, como materiais de construção e de ornamentação, nomeadamente o xisto, o granito, o basalto, o mármore, o calcário, as areias e as argilas. No que diz respeito aos minérios metálicos, Portugal exporta enormes quantidades de cobre, zinco, chumbo e estanho (jazida de Neves Corvo que se encontra na conhecida faixa piritosa). Contudo, existem também outras reservas, que poderão ser exploradas caso o panorama internacional se modifique.

O país também possui regiões uraníferas (Figura 2.10) onde se podem encontrar quantidades significativas de urânio que, como já foi referido anteriormente, é utilizado como combustível nuclear para produção de energia eléctrica. Portugal adoptou, em meados dos anos 50, um programa de reconhecimento dos seus recursos uraníferos e de capacitação no domínio da utilização da energia nuclear para fins energéticos. A exploração uranífera durou 50 anos (1952-2002) e o actual volume de recursos, embora sensivelmente reduzidos a metade da dotação do território em resultado da exploração mineira, são ainda significativos, muito particularmente por terem

uma localização relativamente concentrada (concelho de Nisa e circundantes) e de fácil extracção.

O programa de capitação, que abrangia todas as fases do ciclo do combustível nuclear com o objectivo de adopção desta forma de produção de energia, viria a ser profundamente afectado pelas mudanças políticas resultantes da Revolução de 25 de Abril de 1974, sendo retomado somente nos anos oitenta. Contudo, o debate público que na altura se estabeleceu em torno da opção nuclear, em concorrência com outras alternativas de produção energética, teve como resultado o seu abandono [15].

Se a opção para Portugal for a construção de uma central nuclear para produção de energia eléctrica, e houver quantidades significativas de urânio para abastecer a central, o país ficará dependente deste combustível, porque o modelo de reactor que será implantado funcionará à base de urânio enriquecido que só alguns países no mundo têm as condições técnicas e capacidade para o fazer. Como exemplo, a Espanha optou por unicamente fabricar o combustível já enriquecido vindo nomeadamente de França e Rússia, evitando assim custos adicionais com a construção de instalações complexas para enriquecimento do urânio.

As necessidades anuais de combustível nuclear no mundo são cerca de 67 000 tU. As estimativas de todas as reservas esperadas, incluindo aquelas que não foram suficientemente quantificadas economicamente, correspondem a um total de cerca de 10 milhões de toneladas adicionais, representando mais de 200 anos a fornecer às taxas actuais de consumo. Estas reservas não incluem os 22 milhões de toneladas de urânio que poderiam ser obtidos como um subproduto da exploração de jazidas de fosfato, nem os 4000 milhões de toneladas de urânio contidos no mar [21].

No entanto, segundo dados da AIEA e da OCDE, as reservas de urânio existentes no planeta são suficientes para garantir o fornecimento de energia nuclear durante apenas 150 anos. Os autores do relatório calcularam que nos próximos 85 anos será possível extrair 4,7 milhões de toneladas de urânio a pouco mais que o seu preço actual de 130 US\$ por kg. Mas sugerem que no mundo há mais urânio cuja extracção será cara. Com base na evidência geológica e no conhecimento sobre urânio em fosfatos, mais de 35 milhões de toneladas estão disponíveis para a exploração [22].

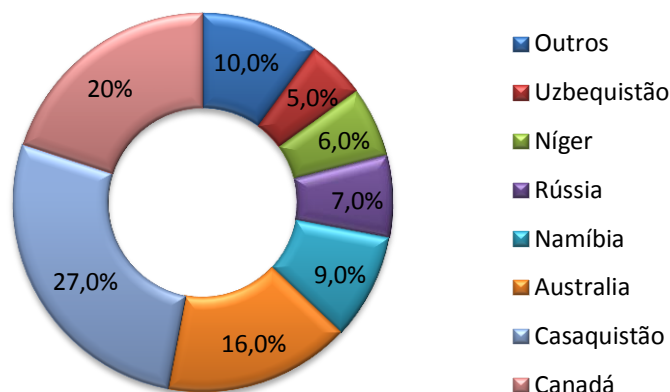


Figura 2.11 - Principais países fornecedores de urânio [21]

Por outro lado, as investigações e os novos desenvolvimentos da tecnologia nuclear permitirão um maior aproveitamento das reservas de urânio. Espera-se que os novos reactores terão a capacidade de extrair 50 vezes mais energia do urânio do que os actuais reactores. [21].

2.4.5 Inspeção e regulação nuclear

Os países que têm reactores nucleares em operação dispõem de agências nacionais destinadas à vigilância e inspeção de todas as fases do funcionamento de uma central (selecção do local, construção, operação, emergências radiológicas, desactivação e desmantelamento das instalações) de modo a que estas se processem com total segurança para as populações, para os trabalhadores e para o ambiente. Estas agências têm que ter quadros técnico-científicos altamente qualificados cuja preparação é longa e dispendiosa e somente algumas instituições mundiais estão em condições de a proporcionar. Este tipo de estrutura foi praticamente desmantelada em Portugal em resultado da falta de investimento em equipamentos e formação de pessoal, pelo que haveria que iniciar com consistência, permanência e determinação um programa de longo prazo cujos resultados demorariam anos a obter. No actual contexto de dificuldades financeiras do País e na ausência de uma decisão sobre a opção nuclear dificilmente se justificaria este investimento [15].

2.4.6 Impacto industrial

As competências do País no domínio da energia nuclear são muito reduzidas ou quase nulas em alguns dos múltiplos domínios do conhecimento convocados para um programa nuclear. Assim, uma opção por este tipo de energia implicaria, pelo menos numa fase inicial, uma total dependência tecnológica, num sector onde o País não possui quaisquer competências, ao contrário de outras tecnologias de produção primária de energia onde possui tecnologia que pode potenciar desenvolvimentos futuros internos e em outros países, para onde pode exportar estas tecnologias.

Este factor apresenta-se pois como uma séria barreira à opção nuclear se se pretender uma articulação das diferentes políticas públicas convocadas para esta questão [15].

2.4.7 Produção e transporte de electricidade em Portugal

Em 2011 o consumo de energia eléctrica situou-se em 50,5 TWh, registando a maior quebra anual até hoje verificada em Portugal, 3,2% ou 2,3% com correcção dos efeitos de temperatura e números de dias úteis.

A potência máxima ocorrida na rede atingiu 9192 MW, cerca de 200 MW abaixo do máximo histórico registado em 2010.

Como se pode observar na Figura 2.12, a produção de origem renovável abasteceu 46% do consumo (eólica 18%, hídrica 22% e outras renováveis 6%), inferior aos 52% do ano anterior, verificados com condições meteorológicas excepcionais. Os índices de hidraulicidade e eolicidade situaram-se respectivamente em 0,92 e 0,97. Pela primeira vez a produção eólica baixou face ao ano anterior apesar do aumento de 375 MW da potência ligada à rede. Nas grandes hídricas, entraram em serviço os reforços de potência de Picote e Bemposta com 431 MW.

A produção térmica em Regime Ordinário aumentou 12% e abasteceu 38% do consumo (20% a gás natural e 18% a carvão).

O saldo importador aumentou 7% e representou 6% do consumo.

No desenvolvimento da RNT destacam-se, para melhoria de alimentação aos consumos, no Porto a nova subestação de Prelada e a remodelação de Ermesinde para 220 kV, e em Lisboa a abertura da subestação do Zambujal e a conclusão de um circuito subterrâneo entre Sacavém e a zona do Alto de S. João (220 kV mas nesta fase a operar a 60 kV). Em Trás-os-Montes entrou em exploração a linha a 220 kV de Macedo de Cavaleiros-Valpaços, componente importante do futuro eixo transmontano a 220 kV entre Lagoaça e Valdigem. Na região centro, facilitando os trânsitos norte-sul e o escoamento da produção nesta zona, entrou em serviço a linha a 400 kV Lavos-Paraímo. Na Península de Setúbal, a linha a 400 kV Palmela-Ribatejo foi desviada para Fernão Ferro, no âmbito da introdução dos 400 kV nesta subestação. No Algarve, para reforço de abastecimento aos consumos, recepção de energia renovável e nova interligação com Espanha, entraram em exploração a subestação de Tavira, as linhas a 400 kV Portimão-Tavira e o troço nacional da futura interligação Tavira-Puebla de Guzman (Espanha) bem como a linha a 150 kV Portimão-Tunes 3.

Em termos de qualidade de serviço a Rede de Transporte apresentou o melhor desempenho de sempre com um Tempo de Interrupção Equivalente de 0,27 minutos [23].

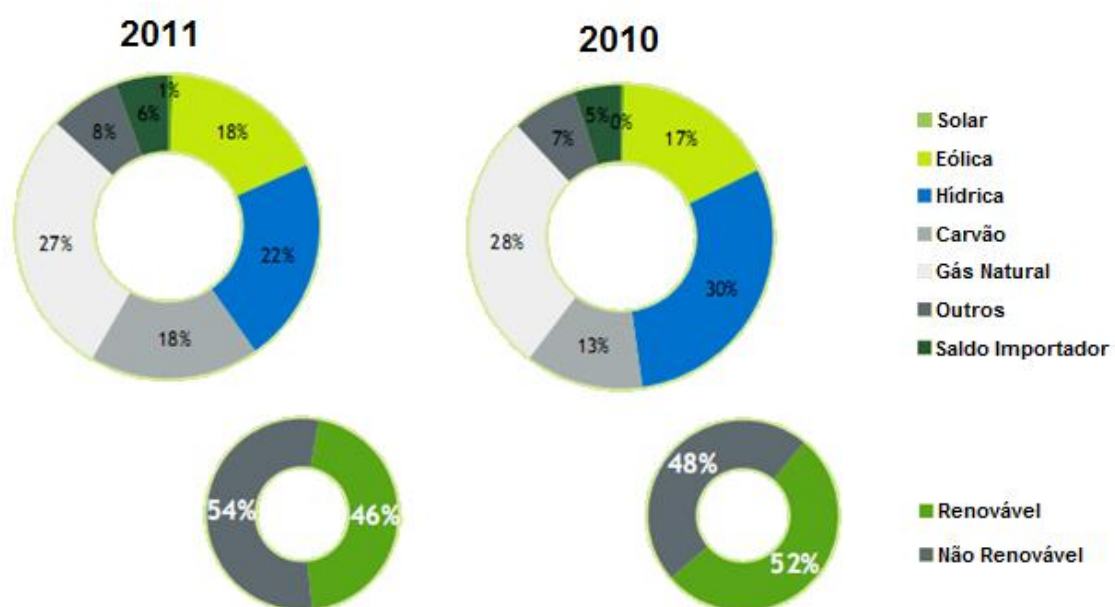


Figura 2.12 - Repartição da Produção [23]

Capítulo 3

Ciclo de vida do combustível nuclear

- 3.1 Enriquecimento de urânio
- 3.2 Fabricação do combustível
- 3.3 Armazenamento temporário do combustível nuclear
- 3.4 Gestão de resíduos radioactivos
- 3.5 Classificação de resíduos nucleares
- 3.6 Composição dos resíduos nucleares
- 3.7 Transporte de resíduos radioactivos

3 Ciclo de vida do combustível nuclear



Figura 3.1 - Ciclo de combustível nuclear [21]

Para se ter a noção de quais os riscos da produção de energia nuclear é necessário conhecer o ciclo de combustível, isto é, a sua obtenção e posterior tratamento dos resíduos que resultam do processo de fissão do combustível.

No seu estado natural o urânio é um metal duro, de cor prateada e extremamente denso; é 18,7 vezes mais denso que a água. Foi descoberto em 1789 pelo químico alemão Martin Klaproth, e o seu nome foi dado em homenagem ao planeta Úrano, que tinha sido descoberto recentemente no ano 1781 [24].

O urânio encontra-se na natureza como mineralização em arenitos (rocha sedimentar composta principalmente de areia, Figura 3.2), em conglomerados de cristal de quartzo, em filões, e em quantidades menores noutros tipos de depósitos. Em alguns países, nomeadamente Estados Unidos, Canadá, África do sul, Austrália, França e outros países, existem reservas significativas de urânio. Os minérios de urânio de alta qualidade contêm até 4% de urânio; mas as reservas conhecidas desta qualidade têm sido muito utilizadas, e estão agora a utilizar-se minérios com conteúdo dez vezes menor, 0,4%. E está em vista a utilização de minérios de urânio ainda mais pobres, com 0,01% e menos [14].



Figura 3.2 - Minério de urânio [24]

Os depósitos de minério de urânio são descobertos por meio de diversas técnicas exploratórias. O reconhecimento de urânio começa geralmente no ar, em busca de vestígios anormais de radioatividade em suspensão no ar, criada pelos produtos da decomposição denominados “filhas do urânio”. Diversos instrumentos são utilizados com objectivo de procurarem no ar raios gama reveladores e outros indícios de radioatividade. Reúnem-se mais indícios no solo, estudando formações geológicas com conteúdo provável de urânio, submetendo amostras a experiências químicas, e, finalmente, fazendo perfurações.

O minério de urânio é extraído por mineração a céu aberto ou subterrânea. O minério impuro é introduzido num conjunto de moinhos trituradores, que o moem até ficar na forma de uma areia fina. Utilizam-se a seguir solventes químicos para dissolver o urânio, que sai deste tratamento sob a forma de uma mistura de óxidos de urânio com uma fórmula química equivalente a U_3O_8 . Esta mistura de óxidos, geralmente denominada de “Bolo Amarelo” (Figura 3.3), constitui a matéria-prima para todos os processos posteriores que acabam por conduzir ao núcleo do reactor e à reacção em cadeia [14].



Figura 3.3 - Bolo amarelo [24]

3.1 Enriquecimento de urânio

O urânio tal como se encontra na natureza é formado por três tipos de isótopos: urânio-238 (^{238}U), urânio-235 (^{235}U) e urânio-234 (^{234}U). De cada grama de urânio natural, 99,28% da massa é de ^{238}U , 0,72% de ^{235}U e 0,005% de ^{234}U [21]. O enriquecimento de urânio é uma operação física através do qual a proporção de isótopos naturais do urânio é alterada. O objectivo desta operação é aumentar a proporção do urânio-235 na mistura, de modo a aumentar a capacidade de iniciar e manter a reacção de fissão em cadeia que se dá nos reactores nucleares. Na proporção isotópica natural (na qual ^{235}U representa 0,72%) só é possível obter a reacção em cadeia em determinadas condições. O enriquecimento de urânio até cerca de 3 a 4% de ^{235}U torna possível a reacção em cadeia usando água natural (elemento importante para o funcionamento do reactor) e menores massas de urânio, podendo-se produzir reactores mais compactos [4].

Existem diversas formas de enriquecimento de urânio, tais como a difusão gasosa, a centrifugação gasosa e a laser. De seguida são descritos alguns dos processos mais usados de enriquecimento do urânio [25].

3.1.1 Difusão gasosa

Depois de obtido o U_3O_8 este é convertido em hexafluoreto de urânio, UF_6 , através de uma série de transformações físicas e químicas. No processo de enriquecimento por difusão gasosa, o hexafluoreto de urânio é lentamente forçado a passar através de filtros especiais chamados barreiras ou membranas porosas (Figura 3.4). Os buracos nas barreiras são tão pequenos que mal há espaço suficiente para que as moléculas de UF_6 possam passar por estas membranas. O enriquecimento ocorre quando as moléculas do UF_6 mais leves (como os átomos ^{235}U e ^{234}U) tendem a passar mais rápido pela membrana que as moléculas de UF_6 mais pesadas (^{238}U). Uma membrana não é porem suficiente, são precisas várias centenas de membranas, umas a seguir às outras, até que UF_6 contenha percentagem suficiente de ^{235}U e depois convertido em combustível nuclear. No final do processo o UF_6 enriquecido é

retirado do recipiente, condensado para líquido e colocado em contentores. O UF_6 arrefece nesses contentores e solidifica antes de ser transportado para instalações de fabricação de combustível, onde é transformado em conjuntos de combustível para centrais de energia nuclear [26].

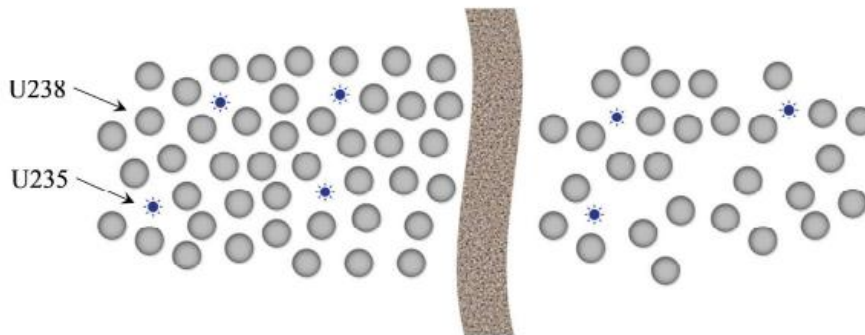


Figura 3.4 - Processo de difusão gasosa

3.1.2 Centrifugação gasosa

A centrifugação gasosa do urânio é um processo que usa um grande número de cilindros rotativos dispostos em série e paralelamente. O UF_6 gasoso é colocado num cilindro de uma de muitas máquinas centrifugadoras dispostas em cascatas, rodando a alta velocidade. Esta rotação cria uma grande força centrífuga e as moléculas mais pesadas, como é o caso das que contêm ^{238}U , orientam-se para o fundo do cilindro, enquanto as moléculas que contêm ^{235}U concentram-se no topo. O gás enriquecido em ^{235}U é então conduzido até à próxima centrifugadora, enquanto o gás empobrecido é reciclado para a centrifugadora anterior. A centrifugação gasosa é bem mais eficaz que a difusão gasosa pois com a mesma quantidade de UF_6 obtém-se muito mais urânio enriquecido [26].

3.1.3 Separação a laser

A separação de isótopos de urânio pode ser obtida com base no princípio da fotoexcitação (excitar as moléculas utilizando luz laser). Estas tecnologias incluem a separação isotópica por Laser de Vapor Atómico (AVLIS), a separação isotópica por Laser de gás Molecular (MLIS), e a separação

isotópica por Laser de Excitação (SILEX). Em geral, o processo de enriquecimento envolve o uso de três sistemas principais, que são os sistemas de laser, sistemas ópticos, e sistema de módulo de separação. Os lasers podem ser então ajustados por forma a fotoionizar um isótopo específico, não afectando os outros tipos de isótopos. Os isótopos afectados são alterados física ou quimicamente o que permite que se diferenciem dos isótopos restantes. Quando comparado com outros métodos de enriquecimento, este método tem a vantagem de ter um custo muito baixo e ser fácil de implementar. Contudo, a separação a laser tem a desvantagem de parte do processo ter de ser realizado em vácuo [26].

3.2 Fabricação do combustível

Depois de enriquecido, o hexafluoreto de urânio (UF_6) é transportado para instalações apropriadas com o objectivo de fabricar combustível de forma a ser utilizados em reactores nucleares. O UF_6 , no estado sólido contido em recipientes, é aquecido até ser convertido na sua forma gasosa, e o gás UF_6 é quimicamente processado para formar dióxido de urânio (UO_2) em pó. Este pó é então prensado em pastilhas cilíndricas, carregadas em tubos de zircónio, e empilhadas para formar conjuntos de combustível. As pastilhas de combustível têm propriedades mecânicas estáveis a elevadas temperaturas, como as que são verificadas no interior do núcleo do reactor. A sua função principal é fornecer uma fonte de energia térmica através de uma reacção de fissão nuclear controlada.

A barra de combustível forma a primeira barreira de segurança numa central nuclear. Dentro dela, serão armazenados produtos de fissão liberados durante a queima de combustível, portanto o principal requisito funcional da barra de combustível é garantir a sua estanquidade ao longo da sua vida. Dependendo do tipo de reactor, um elemento de combustível pode conter até 264 barras de combustível que têm dimensões entre 5 a 9 centímetros quadrados de secção e cerca de 12 metros de comprimento.

A principal função do elemento de combustível é gerar calor e transferi-lo para o refrigerador que passa em torno dele. Isto requer que as barras de

combustível estejam a uma distância adequada para que o elemento refrigerador do reactor possa passar entre as barras e receber o calor gerado [21, 26].

3.3 Armazenamento temporário do combustível nuclear

Os elementos de combustível, à medida que geram energia no reactor, perdem a eficácia, devido à redução de material fissionável e a acumulação de produtos de fissão. Por isto é necessário substituir parte destes elementos por combustível novo, operação chamada de recarga. Nos reactores nucleares usados em Espanha, por exemplo, realizam-se paragens de recarga a cada 12, 18 ou 24 meses, períodos que também são aproveitados para realizar trabalhos de melhoria e modificações [21].

Existem dois métodos de armazenamento aceitável para o combustível irradiado depois que é removido do núcleo do reactor:

Piscina de combustível usado (Figura 3.5) – quando o combustível nuclear usado é retirado do reactor, há necessidade de se proceder ao seu armazenamento temporário com segurança em piscinas especialmente concebidas em locais junto dos próprios reactores. Esta opção de armazenamento proporciona uma barreira contra a radiação. No entanto, para que a barreira seja eficaz, é necessário que os resíduos estejam a pelo menos 20 metros de profundidade nas piscinas.

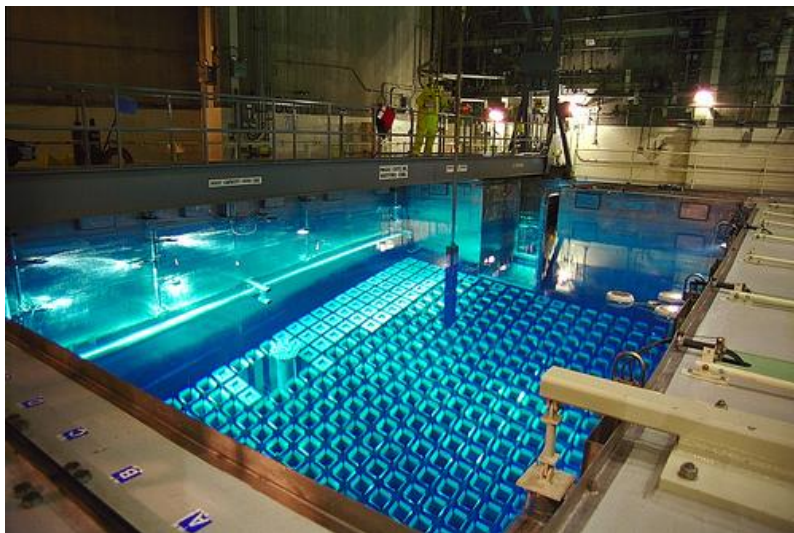


Figura 3.5 - Piscina de armazenamento de combustível nuclear [27]

No final dos anos de 1970 e início da década de 1980, a necessidade de armazenamento alternativo começou a crescer quando as piscinas em muitos reactores nucleares começaram a encher-se com combustível radioactivo armazenado. Muitos operadores de centrais nucleares começaram a olhar para opção de armazenamento de combustível usado em barris secos para aumentar a capacidade de armazenamento de combustível radioactivo.

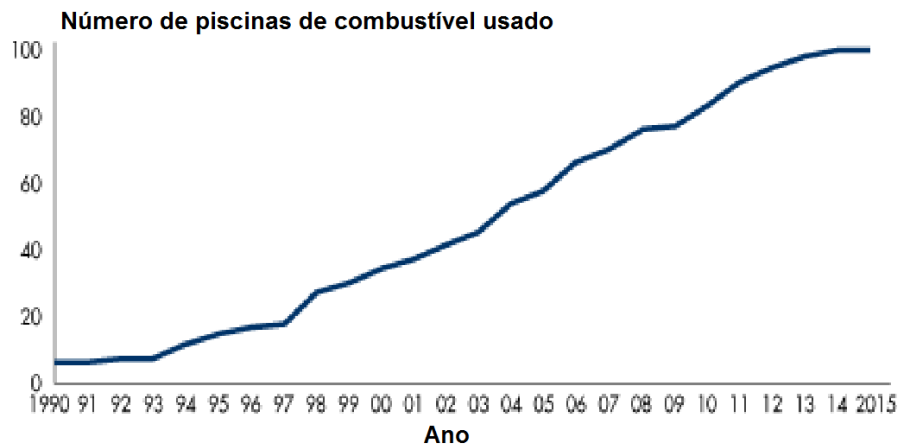


Figura 3.6 - Capacidade das piscinas de combustível nuclear [28]

Armazenamento em barril seco (Figura 3.7) – o armazenamento em barris secos permite que o combustível usado e que já foi arrefecido na piscina (permanecendo pelo menos durante um ano dentro da piscina) seja armazenado e rodeado com um gás inerte dentro do barril, garantindo assim todas as condições de segurança [29].

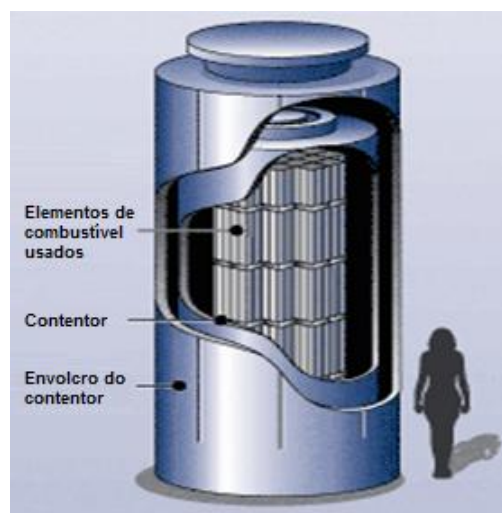


Figura 3.7 - Barril de armazenamento de combustível radioactivo [30]

3.4 Gestão de resíduos radioactivos

Um dos principais problemas do uso da energia nuclear é a gestão dos resíduos nucleares, a razão é porque esses resíduos são muito perigosos e difíceis de eliminar. Se esses resíduos não forem tratados correctamente, podem-se tornar altamente perigosos para a saúde das pessoas e o meio ambiente.

A gestão dos resíduos radioactivos inclui todas as tarefas técnicas e administrativas necessárias para a manipulação, processamento, embalagem, transporte e armazenamento, tendo em conta tanto os factores económicos, como os de segurança [14].

O combustível usado, portanto, ainda mantém uma capacidade de energia residual capaz de ser usado novamente em outros reactores. Este processo de reaproveitamento do combustível usado denomina-se ciclo de combustível fechado (Figura 3.8), em que o ^{235}U que não sofreu fissão nuclear e o ^{239}Pu gerado são aproveitados para o seu reprocessamento ou reciclagem. De facto, esses dois isótopos virão a ser reaproveitados como combustível noutra central nuclear. O combustível reprocessado é conhecido como MOX, abreviatura de misturas de óxidos, constituído por uma mistura de óxido de urânio natural, óxido de urânio reprocessado e óxido de plutónio. Este tipo de operação é realizado em instalações de reprocessamento localizadas em França, China, Japão, Índia, Rússia e Reino Unido. O combustível que é reprocessado é separado dos elementos que resultam da fissão, estes elementos constituem os resíduos de alta actividade. Se a opção for não reutilizar os recursos energéticos contidos no combustível usado, procede-se à gestão do mesmo como resíduos radioactivo de alta actividade, uma vez que os produtos de fissão ficam confinados no mesmo. O destino final desse combustível é o seu isolamento definitivo. Esta opção é conhecida como ciclo de combustível aberto [21].



Figura 3.8 - Esquema de ciclo de combustível aberto e fechado [21]

3.5 Classificação de resíduos nucleares

Resíduos radioactivos podem ser classificados de acordo com suas características físicas, químicas e sua actividade.

Quanto à sua actividade os resíduos nucleares podem ser classificados em: Resíduos de alta actividade – são resíduos produzidos no processo de fissão. Estes resíduos contêm grandes concentrações de radionuclídeos de meia-vida curta e média e concentrações consideráveis de radionuclídeos de meia-vida longa, geram grandes quantidades de calor, como consequência da desintegração radioactiva e, embora a actividade diminua com o tempo, levam milhares de anos até chegar a um nível que não seja prejudicial a saúde [31].

Resíduos de média actividade – são resíduos produzidos no processo de fissão nuclear. Estes resíduos contêm concentrações de radionuclídeos de meia-vida curta, geralmente inferior a 30 anos (emissores beta-gama) e um baixo conteúdo e limitado em radionuclídeos de meia-vida longa (emissores alfa). Estes resíduos deixam de constituir perigo para a saúde decorridas algumas centenas de anos, por esta razão podem ser armazenados permanentemente em instalações apropriadas na superfície ou em pouca profundidade, que garanta o seu isolamento até passar este período de tempo [31].

Resíduos de baixa actividade – tratam-se de roupas, ferramentas e outros materiais utilizados durante a manutenção de uma central nuclear [5].

3.6 Composição dos resíduos nucleares

A composição do combustível nuclear radioactivo depende de vários factores, nomeadamente o tipo de combustível que é colocado no reactor, do tempo em que este mesmo combustível permanece dentro do reactor em operação, e quanto tempo é que este combustível permanece armazenado temporariamente. Como exemplo pode-se observar na Tabela 3.1 o caso de um reactor típico nos Estados Unidos, com urânio enriquecido a 4,2% como combustível. Ao fim de três anos este combustível é retirado do núcleo do reactor a fim de ser armazenado.

Tabela 3.1 - Composição do combustível nuclear após 3 anos [32]

	Carga	Descarga
Urânio	100%	93,4%
Plutónio	0,00%	1,27%
Actínídeos menores	0,00%	0,14%
Produtos de fissão	0,00%	5,15%
Enriquecimento	4,20%	0,72%

Observa-se que a maior parte do urânio ainda se encontra presente no combustível no momento da sua retirada, embora a maior parte deste seja ^{238}U , que não sofre fissão (apenas uma pequena parte sofrerá fissão rápida, outra será convertida em plutónio) do restante ^{235}U , cerca de 84% foi consumido. Os actínídeos menores, como é o caso do Neptúnio, Amerício e Cúrio, são nuclídeos de muito longa duração que causam sérias preocupações porque estes resíduos precisam de ser armazenados por mais de 100000 anos, com o objectivo de baixar as elevadas radiações que eles emitem para níveis admissíveis de forma a não causar danos às populações e meio ambiente. Felizmente, estes resíduos são fissionáveis e podem ser usados em reactores rápidos como combustível. Mas em contrapartida continuam a produzir produtos de fissão.

Não existe nenhuma forma conhecida de eliminar esses resíduos, muitas vezes é utilizado o armazenamento geológico como forma de protecção contra a radiação e com o passar do tempo esta mesma radiação passará para níveis mais baixos. Alguns produtos de fissão, como o estrôncio-90, cézio-137 e Iodo-131, são facilmente absorvidos pelos sistemas biológicos e são capazes de causar sérios problemas a saúde.

Quando o desastre de Chernobyl ocorreu, estes três isótopos causaram grandes problemas [32].

3.7 Transporte de resíduos radioactivos

O transporte de materiais radioactivos é realizado de acordo com as recomendações estabelecidas pela Agência Internacional de Energia Atómica (AIEA), listadas na legislação vigente através do Acordo Europeu de Mercadorias Perigosas por Estrada.

Esse conjunto de medidas destina-se a minimizar a probabilidade de um acidente e se isto acontecer, atenuar os seus efeitos, evitando a disseminação de material radioactivo e possível assimilação por parte de pessoas que estão próximas.

Durante o transporte, deve-se garantir a contenção do material radioactivo para evitar a contaminação de pessoas e do ambiente, controlando assim os níveis de radiação externa e proporcionando sinais de alerta sobre o conteúdo do embalado. De acordo com a localização dos produtores de resíduos e as características dos resíduos a retirar, elabora-se um programa em que se estabelecem datas, horas e rotas de retirada. Estes dados são comunicados com antecedência ao Conselho de Segurança Nuclear e às Autoridades.

Para o transporte de resíduos cuja origem provem de instalações nucleares, são utilizados veículos articulados de 40 toneladas de peso máximo autorizado (Figura 3.9). No caso de resíduos proveniente de hospitais, laboratórios e centros de pesquisa são usados veículos menores [5].



Figura 3.9 - Transporte de material radioactivo [5]

Capítulo 4

Centrais nucleares

- 4.1 Reactores nucleares
- 4.2 Classificação de reactores de acordo com algumas características
 - 4.3 Outros modelos de reactores nucleares
 - 4.4 Acidentes nucleares
 - 4.5 Níveis de alerta nuclear
- 4.6 Desmantelamento de centrais nucleares

4 Centrais nucleares

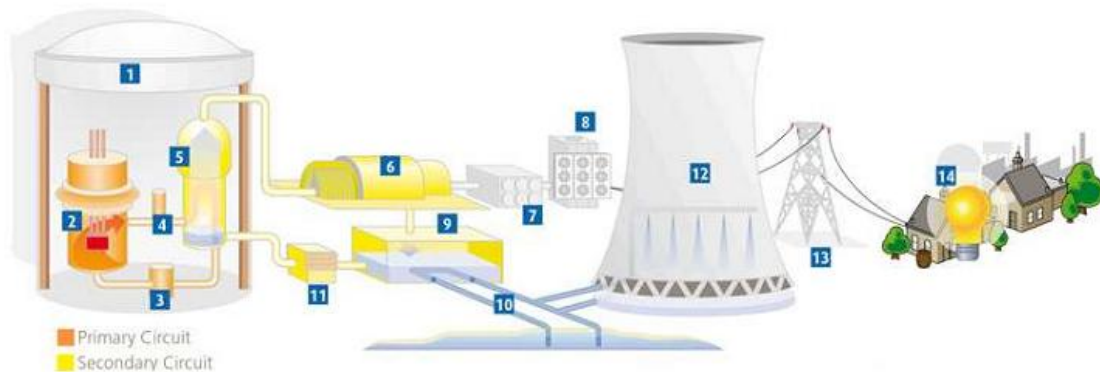


Figura 4.1 - Representação esquemática de uma central nuclear [33]

- | | |
|--------------------------|----------------------------|
| 1 – Contendor | 8 – Transformador |
| 2 – Reactor | 9 - Condensador |
| 3 – Bomba de alimentação | 10 – Água de Refrigeração |
| 4 - Pressurizador | 11 – Bombas de alimentação |
| 5 – Permutador de calor | 12 – Torre de refrigeração |
| 6 - Turbina | 13 – Rede eléctrica |
| 7 – Alternador | 14 – Consumidores |

Uma central nuclear é uma central termoelétrica em que um reator nuclear actua como caldeira [6]. Uma central nuclear segue alguns princípios idênticos aos de uma central térmica clássica, sendo a principal diferença a forma como se produz o calor para gerar vapor. Enquanto numa central térmica é necessário queimar combustível para produzir vapor de água, numa central nuclear o calor provém de uma reacção nuclear que acontece no núcleo do reator, denominada de fissão nuclear. Desta reacção nuclear resulta grande quantidade de calor e consequentemente vapor de água necessário para accionar uma turbina a vapor, tal como acontece numa central térmica convencional [25].

4.1 Reactores nucleares

Um reactor nuclear é definido como um equipamento capaz de iniciar, manter e controlar as reacções de fissão em cadeia que ocorrem no núcleo. Actualmente os reactores são utilizados principalmente para a produção de energia eléctrica, embora o seu objectivo inicial fosse a produção de armamento nuclear. Os reactores nucleares são constituídos por combustível, refrigerador, barras de controlo, elementos estruturais, e moderador no caso de reactores nucleares térmicos. Existem duas formas de projectar um reactor: ou se projecta o reactor de forma a retardar os neutrões rápidos, ou de forma a aumentar a proporção de átomos fissionáveis. No caso de retardar os neutrões rápidos utiliza-se um moderador (água leve, água pesada ou grafite) e os neutrões lentos resultantes deste processo denominam-se neutrões térmicos, de modo que os reactores que utilizam esta técnica são chamados de reactores térmicos, e os segundos reactores mencionados utilizam neutrões rápidos, pelo que são conhecidos como reactores rápidos. Quando se constrói um reactor térmico, é necessário ter uma massa crítica de combustível, ou seja, material fissionável suficiente e uma disposição ideal de combustível de forma a manter a reacção em cadeia. A disposição dos absorventes de neutrões e das barras de controlo permitem manter a criticalidade (taxa de fissão constante) em operação e a subcriticalidade (taxa de fissão decrescente) em caso de paragem, ou supercriticalidade (taxa de fissão crescente) para iniciar a reacção [34].

Actualmente existe uma grande variedade de reactores em uso no mundo. A Tabela 4.1 lista os tipos de centrais nucleares em operação, bem como os modelos de reactores mais usados. Observa-se que o reactor dominante é o reactor de água leve (*Light Water Reactor* - LWR), que utiliza água natural e urânio enriquecido em pastilhas de UO_2 como combustível. Existem dois tipos de reactor de água leve: o reactor de água pressurizada (PWR) e o reactor de água em ebulição (BWR). Juntos, eles respondem por 88% da capacidade mundial de geração presente e 85% da capacidade nominal a ser construída ou em projecto. Os principais tipos de reactores em uso na geração de electricidade serão agora discutidos [1].

Tabela 4.1 - Centrais nucleares em operação comercial [35, 36]

Tipo de Reactor	Principais Países	Número	Potência (GWe)	Combustível	Refrigerador	Moderador
Reactor de água pressurizada (PWR)	Estados Unidos, França, Japão, Rússia, China	270	247,9	Urânio enriquecido (UO ₂)	Água Leve	Água Leve
Reactor de água em ebulição (BWR)	Estados Unidos, Japão, Suécia	84	77,6	Urânio enriquecido (UO ₂)	Água Leve	Água Leve
Reactor de água pesada pressurizada 'CANDU' (PHWR)	Canadá	47	23,1	Urânio natural (UO ₂)	Água pesada	Água pesada
Reactor refrigerado a gás (AGR & Magnox)	Reino Unido	17	10,8	U natural (metal), Urânio enriquecido (UO ₂)	CO ₂	Grafite
Light Water Graphite Reactor (RBMK)	Rússia	15	12,3	Urânio enriquecido (UO ₂)	Água Leve	Grafite
Reactor de neutrões rápidos (FBR)	Japão, Rússia	2	0,58	PuO ₂ e UO ₂	Sódio líquido	-
Outros	Rússia	4	0,05	Urânio enriquecido (UO ₂)	Água Leve	Grafite
TOTAL	-	437	386,5	-	-	-

4.2 Classificação de reactores de acordo com algumas características

Os reactores nucleares são variados no seu princípio de funcionamento, combustível e utilização. Como tal existem várias classificações que se podem atribuir, entre as quais se destacam a classificação quanto ao tipo de fissão, se é térmica (reactores térmicos) ou rápida (reactores rápidos), quanto ao tipo de moderador, destacam-se os reactores moderados a grafite, água (leve ou pesada) e reactores moderados com elementos leves (sal fundido ou metal líquido). Quanto ao tipo de combustível os reactores podem usar combustível sólido (urânio), combustível líquido (Reactores homogéneos aquosos e reactores a sal fundido) e combustível gasoso (teórico). Os reactores também podem ser classificados quanto à sua utilização, eles podem ser utilizados para produção de energia eléctrica (centrais nucleares), propulsão (propulsão nuclear naval) e reactores para investigação [37].

4.2.1 Reactor PWR

O reactor PWR é um reactor térmico, moderado a água leve, arrefecido com água pressurizada, de combustível sólido para produção de electricidade.

Este capítulo tem como objectivo fazer uma descrição mais abrangente dum reactor PWR. É o tipo de reactor mais usado no mundo nomeadamente em França, Reino Unido, Rússia, Japão e Coreia do Sul. Este reactor utiliza urânio enriquecido como combustível e água leve como moderador e refrigerador. No PWR o refrigerador primário (água) é bombeado sob alta pressão para o núcleo do reactor onde é aquecido pela energia gerada pela fissão de átomos. A água aquecida, então, flui para um permutador de calor, onde este por sua vez transfere a sua energia térmica para um sistema secundário onde o vapor é gerado e flui para turbinas que estão acopladas a um alternador, que por sua vez gera energia eléctrica. Em contraste com um reactor de água em ebulição, a pressão no circuito de arrefecimento primário é mantida em circuito fechado, impedindo assim que a água entre em ebulição e por conseguinte evapore dentro do reactor. Por esta razão este tipo de reactor é chamado de *Pressurized water reactor*.

O hidrogénio contido na água leve torna-a um bom moderador reduzindo assim a energia dos neutrões provenientes do processo de fissão. Apesar disto este moderador tem uma secção de absorção de neutrões elevada.

Não se poderia usar urânio natural neste tipo de reactor, pelo facto de este ter uma taxa de produção de neutrões significativamente baixa perante a taxa de absorção dos mesmos por parte do moderador. Por esta razão a solução de combustível neste tipo de reactor é o urânio enriquecido [1, 38].

A Figura 4.2 descreve esquematicamente este tipo de reactor.

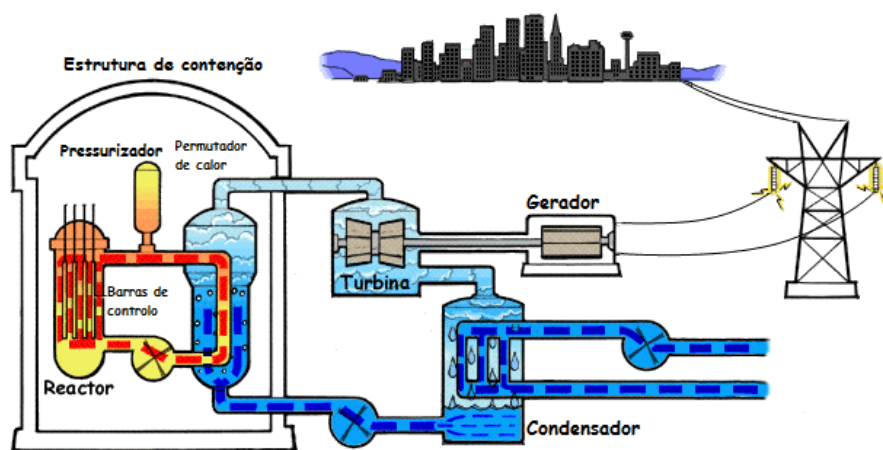


Figura 4.2 - Esquema de funcionamento de um reactor PWR [39]

O núcleo é a parte do reactor onde se produz e se mantém a reacção nuclear em cadeia. O seu objectivo é aquecer a água do circuito primário. Projecta-se o núcleo para operar de forma segura e controlada, de modo a maximizar a quantidade de energia extraída do combustível. A água quente do circuito primário é transportada para o permutador de calor. O calor é transferido através das paredes desses tubos para o refrigerador de menor pressão no circuito secundário. A transferência de calor é realizada sem a mistura dos dois fluidos, o que é desejável uma vez que o refrigerador primário pode tornar-se radioactivo.

Numa central nuclear, o vapor sob pressão alimenta uma turbina a vapor, que acciona um gerador eléctrico ligado à rede eléctrica. Depois de passar pela turbina o refrigerador secundário (vapor saturado) é arrefecido e condensado por meio de um condensador. O condensador converte o vapor em líquido de modo que possa ser transportado de volta para o permutador de calor. Antes de ser transportado para o permutador de calor, o vapor condensado (conhecido como água de alimentação) é por vezes pré-aquecido de forma a minimizar o choque térmico [40].

O reactor PWR, quando comparado com outros tipos de reactores, tem duas particularidades que lhe conferem o estatuto de reactor mais utilizado. Uma das particularidades é a separação entre o fluido transportador de calor e o fluido que gera vapor no circuito secundário. No caso do reactor BWR, esta separação entre os dois fluidos não existe, por esta razão este tipo de reactor requer rigorosas condições de segurança. A outra particularidade é o uso da água como refrigerador e moderador. Por ser uma substância muito abundante na natureza, não acrescenta custos adicionais, quando comparado com alguns projectos mais exóticos, como é o caso dos reactores “*breeder*” que utilizam outras substâncias em vez da água como refrigerador e moderador (sódio por exemplo, no estado líquido como refrigerador) ou grafite como moderador [41]. Cada componente do núcleo do reactor tem um papel importante na geração de energia.

4.2.2 Componentes de um reactor PWR

4.2.2.1 Refrigerador

Como já foi referido anteriormente, a água leve é usada como refrigerador no circuito primário do reactor PWR. Ela entra pela parte inferior do núcleo do reactor a cerca de 275°C, é aquecida à medida que flui para cima através do núcleo do reactor até a uma temperatura de cerca de 315°C. A água permanece no estado líquido, apesar da temperatura elevada, este facto deve-se à alta pressão no circuito de arrefecimento primário, geralmente cerca de 15,5 MPa (153 atm).

A pressão no circuito primário é mantida por um pressurizador, um recipiente separado que é ligado ao circuito primário e parcialmente cheio de água que é aquecida por aquecedores eléctricos submersos até ao ponto de ebulição para a pressão desejada. Para atingir a pressão de 15,5 MPa, a temperatura no pressurizador é mantida em 345°C, o que dá uma margem de sub-arrefecimento. A diferença entre a temperatura no pressurizador e a mais alta temperatura no núcleo do reactor é de 30°C. Variações no sistema de refrigeração do reactor resultam em grandes oscilações no volume de fluido de arrefecimento, de forma que o volume total do pressurizador é projectado de forma a absorver essas variações sem expor os aquecedores ou esvaziar o pressurizador. As variações de pressão no sistema de arrefecimento primário manifestam-se em variações de temperatura no pressurizador e são controlados através do uso de aquecedores automáticos e jactos de água, que fazem com que aumente ou diminua a temperatura no pressurizador conforme a necessidade [40].

A circulação do refrigerador é assegurada por meio de poderosas bombas, que podem consumir até 6 MW cada [42]. O refrigerador absorve o calor do núcleo do reactor que seguidamente transmite, por meio de um permutador de calor, ao circuito secundário, transformando neste circuito a água em vapor. A pressão e temperatura no circuito secundário são mais baixas, geralmente cerca de 6,2 MPa (60 atm) e 275°C respectivamente que correspondem à entrada na turbina a vapor.

4.2.2.2 Moderador

Os reactores de água pressurizada, tal como todos os modelos de reactores térmicos, necessitam que os neutrões que derivam do processo de fissão sejam abrandados (um processo chamado de moderação ou termalização) a fim de interagir com o combustível nuclear e sustentar a reacção em cadeia.

O moderador é a água que é também utilizada como refrigerador, isto permite que os neutrões sofram colisões múltiplas com átomos de hidrogénio diminuindo assim a sua velocidade no processo de colisão. Quanto maior for a densidade da água maior será a frequência com que este processo de moderação ocorre.

O reactor PWR utiliza como combustível urânio enriquecido, como na fissão do urânio há libertação de neutrões com elevada energia, é necessário abrandar estes mesmos neutrões a fim de que o processo de fissão em cadeia ocorra.

O uso da água como moderador é um aditivo à segurança nos reactores PWR, porque um aumento da temperatura faz com que a água diminua a sua densidade, reduzindo assim a frequência do processo de moderação, diminuindo conseqüentemente a frequência das reacções de fissão e portanto a temperatura do reactor. Esta propriedade, conhecida como o coeficiente de reactividade térmica negativa, promove a estabilidade dos reactores PWR.

Em contraste com o reactor RBMK usado em Chernobyl, que utilizava grafite como moderador em vez de água e água como refrigerador, e que portanto tinha um grande coeficiente de reactividade térmica positiva. Isso fez com que aumentasse a geração de calor quando a temperatura da água de refrigeração aumentou. Os RBMK são portanto menos estáveis do que os reactores de água pressurizada, daí que esta característica do reactor RBMK foi uma das muitas causas do desastre de Chernobyl. [43] A água, para além da sua propriedade de retardar os neutrões quando usado como moderador, também tem a propriedade de absorver neutrões, embora com uma secção eficaz baixa. Isso faz com que o combustível utilizado neste tipo de reactor seja urânio enriquecido.

4.2.2.3 Combustível

Após o enriquecimento e fabricação do combustível em pastilhas de formato cilíndrico, o combustível é empilhado num tubo de uma liga de zircónio resistente a corrosão, com cerca de 4 metros de comprimento (Figura 4.3). O zircónio é escolhido pelas suas propriedades mecânicas e baixa secção eficaz de absorção de neutrões [44]. As barras são então agrupadas em conjuntos denominados elementos de combustível, que por sua vez são introduzidos no interior do núcleo do reactor. Um típico reactor PWR pode agrupar entre 200 a 300 barras e produz na ordem dos 900 a 1500 MWe [40].

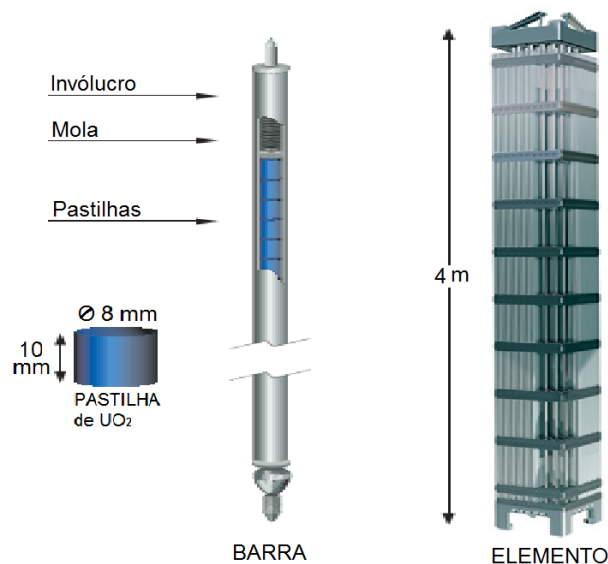


Figura 4.3 - Composição de um elemento combustível [10]

O ciclo de reabastecimento de combustível de um reactor PWR comercial está compreendido entre 18 a 24 meses. Aproximadamente 1/3 do núcleo é substituído a cada reabastecimento [45].

4.2.2.4 Barras de controlo

As barras de controlo são necessárias para regular a operação do reactor e fornecer um meio de paragem rápida. Elas são constituídas por um material com uma secção eficaz de absorção de neutrões elevada, este factor faz com que os neutrões de fissão sejam absorvidos, fazendo com que a reacção no reactor passe a um estado de sub-críticidade o que faz com que esta mesma

reação pare. Boro e cádmio são particularmente bons materiais de controlo devido às características evidenciadas anteriormente. As barras de controlo para reactores de água pressurizada (PWR) usam geralmente boro na forma de carboneto de boro (B_4C) ou cádmio numa liga de prata-índio que contenha 5% cádmio. Uma característica importante no reactor PWR é o facto de as barras de controlo estarem localizadas na parte de cima do reactor, a localização das barras possibilita que em caso de avaria do sistema controlo elas possam entrar no reactor devido a gravidade. [1].

4.3 Outros modelos de reactores nucleares

4.3.1 Reactor BWR

O reactor BWR é um reactor térmico, moderado a água leve, arrefecido com água em ebulição, de combustível sólido para produção de electricidade.

O princípio de funcionamento do BWR é idêntico ao do PWR, mas sem o permutador de calor, porque só existe um circuito de água para transmitir potência, ou seja, o BWR funciona a uma pressão mais baixa, o que permite que a água no seu reactor entre em ebulição dando origem a vapor (radioactivo), que é directamente utilizado na produção de energia eléctrica por intermédio de uma turbina acoplada a um alternador.

Contrariamente à posição das barras no reactor PWR, no BWR as barras são introduzidas pela parte inferior do reactor, porque como a água se transforma em vapor na parte superior do reactor, a turbulência causada pelo processo de ebulição causaria algumas perturbações no momento em as barras fossem introduzidas.

O reactor BWR é uma alternativa importante comparativamente ao PWR e ambos são utilizados, por exemplo, nos Estados Unidos e Japão [1, 38].

4.3.2 Reactor PHWR

O reactor PHWR é um reactor térmico, moderado a água pesada, arrefecido com água pesada pressurizada, de combustível sólido para produção de electricidade.

Um projecto canadense também conhecido como CANDU é um reactor de energia nuclear que utiliza urânio natural como combustível, e água pesada (D_2O óxido de deutério) como refrigerador e moderador. O refrigerador a água pesada é mantido sob pressão a fim de elevar o seu ponto de ebulição, permitindo que seja aquecido a temperaturas mais elevadas sem entrar em ebulição, tal como no PWR. Embora o custo da água pesada seja significativamente maior em relação a água leve, este reactor acaba por ser vantajoso economicamente porque permite que o reactor funcione sem a necessidade de instalações para o enriquecimento do combustível e os custos daí decorrentes, atenuando assim o custo adicional de água pesada.

À água pesada é um melhor moderador que a água leve porque tem muito deutério. Apesar de por colisão (inelástica) o deutério (2H) tirar menos energia ao neutrão (1n) do que o hidrogénio (1H), a secção eficaz de absorção de neutrões do deutério é mais baixa, resultando assim numa maior quantidade de neutrões termalizados. Em contrapartida o urânio natural tem uma taxa de produção de neutrões inferior à do urânio enriquecido. Estas diferenças equilibram-se resultando num reactor funcional.

Para além do Canada, existem outros países com reactores CANDU em operação como é o caso da Índia, Coreia do Sul e Argentina [1, 38].

4.3.3 Reactor AGR

O reactor AGR é um reactor térmico, moderado a grafite, arrefecido a gás, de combustível sólido para produção de electricidade.

Também conhecido como reactor Magnox, este tipo de reactor tem como moderador a grafite, o arrefecedor é um gás como por exemplo o CO_2 ou Hélio, no entanto estes arrefecedores são pouco densos para servirem de moderador. A grafite tem uma secção eficaz de captura de neutrões baixa, o que a torna

um bom moderador. Este tipo de reactor é muito usado no Reino Unido onde foi concebido e desenvolvido e também na antiga União Soviética.

Tem uma menor frequência de reabastecimento. Em teoria, são mais fáceis de reabastecer que os LWR [1, 38].

4.3.4 RBMK - Light Water Graphite Reactor

O reactor RBMK é um reactor térmico, moderado a grafite, arrefecido com água leve, de combustível sólido para produção de electricidade.

Desenvolvidos na antiga União Soviética, os RBMK foram construídos para produzir plutónio, mas também produzem energia. Em 2010, havia pelo menos 11 reactores RBMK operacionais na Rússia e 2 na Lituânia, mas não há planos para construir novos reactores do tipo RBMK (a tecnologia RBMK foi desenvolvida na década de 1950 e agora é considerada obsoleta) e há pressão internacional para fechar aquelas que permanecem.

Na central nuclear de Chernobyl no momento do acidente, havia quatro dessas unidades que entanto foram todas fechadas [1, 46].

4.3.5 Reactor FBR

O reactor FBR é um reactor rápido, sem moderador, arrefecido com metal líquido, de combustível sólido para produção de combustível nuclear e electricidade.

Este tipo de reactor tem uma particularidade comparativamente aos outros reactores, não é necessário utilizar um moderador porque o objectivo é usar neutrões rápidos para produzir combustível nuclear (^{239}Pu , ^{233}U) a partir de materiais férteis (^{238}U , ^{232}Th), mas também produzem energia. O núcleo de reactor é arrefecido com metais líquidos (sódio).

Existem apenas dois reactores FBR em operação no mundo, um em França e o outro na Rússia [1, 38]. Um resumo das características típicas dos reactores nucleares pode ser observado na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Valores e gamas actuais típicos de reactores nucleares [47]

Entrada de energia	Combustível nuclear: UO ₂ nat. ou enriquecido, mistura óxido U / Pu (MOX), urânio metálico
Saída	Electricidade, calor
Tecnologias nucleares	LWR (PWR, BWR); HWR; AGR; FBR;
Eficiência (%)	LWR, HWR: 30-32; LWR/EPR: 36; HTGR: até 50; FBR 40
Tempo de construção (meses)	Mínimo 40; típicos 60; Conservador 72
Tempo de vida técnico (anos)	Mínimo 30 com uma eventual prorrogação até 60; LWR / EPR 60
Factor de carga (%)	Típico 83-85, máximo 94
Máxima disponibilidade (%)	95
Potência típica (MW)	800-1200;típico 1000; LWR/EPR 1600; SMR 200-600
Capacidade instalada (Mundial) (GW)	370
Idade média das centrais (anos)	Cerca de 80% das actuais centrais nucleares foram construídas entre 1970 e 1990

4.4 Acidentes nucleares

Na energia nuclear chamam-se a acidentes nucleares àqueles eventos que emitem um determinado nível de radiação susceptível de prejudicar a saúde pública. Os acidentes nucleares são classificados como incidentes nucleares (nível 1 a 3 na escala internacional de eventos nucleares) e acidentes nucleares (nível 4 a 7 na escala internacional de eventos nucleares) de acordo com a gravidade como já foi referido anteriormente. E isso inclui tanto acidentes nucleares e acidentes radioactivos. Para se poder entender, um acidente nuclear pode ser uma avaria de um reactor de uma central nuclear e um acidente por radiação poderia ser o derramamento de uma fonte de radiação num rio. Apesar da maioria dos acidentes nucleares conhecidos terem ocorridos em centrais de energia nuclear, estes também podem ocorrer em outros centros que trabalhem com energia nuclear, tais como hospitais ou laboratórios de pesquisa [5].

4.4.1 Acidente nuclear de Chernobil



Figura 4.4 - Central nuclear de Chernobil após o acidente [48]

A central nuclear de Chernobil (Figura 4.4) está situada a cerca de 130 km a norte de Kiev, Ucrânia, cerca de 20 km a sul da fronteira com a Bielorrússia. Esta central era composta por 4 reactores nucleares do tipo RBMK – 1000, as unidades 1 e 2 foram construídas entre 1970 e 1977, enquanto as unidades 3 e 4 do mesmo projecto foram concluídas em 1983. No momento do acidente estavam ainda em construção duas unidades adicionais que entretanto foram interrompidas.

Reactores como os de Chernobil têm sistemas alternativos de emergência (geradores diesel) disponíveis como reserva, mas a sua activação não é instantânea. Foi elaborado um teste com o objectivo de determinar se as turbinas, na sua fase de queda de rotação (inércia rotacional), poderiam alimentar as bombas até que os sistemas alternativos estivessem disponíveis. O teste foi realizado com sucesso numa unidade (com as medidas de protecção activas) e o resultado foi negativo, isto é, as turbinas não produziram energia suficiente, na fase de queda de rotação, para alimentar as bombas de água. Entretanto, foram feitas melhorias adicionais nas turbinas, o que levou à necessidade de repetir os testes [49].

No dia 26 de Abril de 1986, o reactor da unidade 4 estava programado para ser desligado afim de se proceder à manutenção de rotina. Foi decidido aproveitar esta oportunidade para repetir o teste. O teste, em que o reactor estava a funcionar a uma potência relativamente baixa, não decorreu conforme planeado, o reactor ficou fora de controlo provocando uma explosão e incêndio que destruiu o edifício do reactor e lançou grandes quantidades de radiação para a atmosfera.

Medidas de segurança foram ignoradas, o combustível de urânio no reactor superaqueceu e derreteu as barreiras de protecção. Uma das falhas neste projecto de reactores RBMK (em Chernobyl) é que não tinham o que é conhecido como uma estrutura de contenção, isto é, uma estrutura que permite manter a radiação no interior da central, no caso de um acidente no reactor. Consequentemente, isótopos radioactivos de plutónio, iodo, estrôncio e céσιο foram espalhados numa área ampla. Além disso, os blocos de grafite utilizados como material de moderação no reactor RBMK pegaram fogo a alta temperatura, e a entrada do ar no núcleo do reactor contribuiu para emissão de materiais radioactivos no meio ambiente [50].

O acidente nuclear de Chernobyl foi classificado como nível 7 de acordo com a Escala Internacional de Eventos Nucleares (INES) da AIEA, ou seja, o pior acidente ambiental, e serve como referência para planeamento e controlo de dispositivos e sistemas de protecção das instalações nucleares [5].

As lições aprendidas com o acidente foram uma força motriz significativa para identificar os pontos fracos e melhorar a segurança de reactores como é o caso do VVER e RBMK. Actualizações foram realizadas em todas as unidades RBMK para eliminar as deficiências de *design* que contribuíram para o acidente de Chernobyl, melhoraram-se os mecanismos de paragem do reactor e aumentou-se a consciência geral de segurança entre os funcionários.

Tão importante quanto o trabalho que tem sido desenvolvido na melhoria de segurança a nível do desenho do reactor tem sido a melhoria de segurança do ponto de vista da operação e dos sistemas de supervisão regulatória [50].

O acidente de Chernobyl foi o produto de uma falta de cultura de segurança. O projecto do reactor era pobre do ponto de vista da segurança, e a isso acresceu o comportamento irresponsável dos operadores, os quais provocaram um estado operacional perigoso. Os operadores não estavam informados sobre isso, eles não estavam em conformidade com os procedimentos operacionais. A combinação desses factores provocou o acidente nuclear de máxima gravidade na qual o reactor foi totalmente destruído em poucos segundos [49].

A fase de desmantelamento da central nuclear de Chernobyl, que inclui a retirada do combustível nuclear dos outros dois reactores, será concluída em 2013. No entanto o desmantelamento completo e a transformação da central numa instalação ecologicamente segura demorará cerca de 70 anos [51].

4.4.2 Acidente nuclear de Three Mile Island



Figura 4.5 - Central nuclear de Three Mile Island em funcionamento [52]

Three Mile Island é uma ilha no rio Susquehanna perto de Harrisburg, Pensilvânia, no nordeste dos Estados Unidos. Possui uma área de 3,29 km².

A central nuclear de Three Mile Island (Figura 4.5) estava equipada com dois reactores PWR. Um dos reactores tinha uma potência instalada de 800 MWe (775 MWe líquidos) e entrou em serviço em 1974, o outro reactor tinha uma potência instalada de 906 MWe (880 MWe).

O acidente nuclear na unidade 2 aconteceu às 4h00 da manhã do dia 28 de Março de 1979 quando o reactor estava a operar a 97% da sua potência. A avaria no circuito de arrefecimento secundário causou um aumento de temperatura no circuito de arrefecimento primário, provocando a introdução das barras de controlo destinada a parar de forma automática a reacção de fissão no núcleo do reactor [53].

Este acidente ocorreu porque as bombas primárias de alimentação do circuito secundário deixaram de funcionar por causa de uma avaria mecânica ou eléctrica. Isto impediu a remoção de calor do sistema primário para o permutador de calor. Por esta razão a pressão e a temperatura no circuito primário começaram a subir imediatamente. Como se não bastasse surgiu outro problema na central, o sistema de água de emergência (reserva do sistema secundário) tinha sido testado 42 horas antes do acidente. Como parte do teste, as válvulas são fechadas e no final do teste são abertas novamente. Mas desta vez, por um erro administrativo ou humano, a válvula foi deixada fechada, o que impediu que o sistema de emergência funcionasse. Como consequências dessas falhas, o acidente na central de Three Mile Island causou danos no reactor, mas felizmente teve um limitado escape de produtos

radioactivos para o exterior, apesar de ter fundido cerca de um terço do combustível, o núcleo do reactor em si manteve sua integridade e conteve o combustível danificado. A radiação libertada não constituiu perigo para a saúde, isto foi confirmado por milhares de amostras ambientais e outras, e medidas tomadas durante e após o acidente [54]. O acidente nuclear de Three Mile Island foi classificado como nível 5 na Escala Internacional de Eventos Nucleares. Este acidente levou à melhoria da segurança nas centrais nucleares, definição de medidas correctivas e desenvolvimento de programas de treinamento e capacitação de pessoal foram aplicadas em todos os países com instalações nucleares [5].

A licença de operação da central de Three Mile Island (unidade 2) foi emitida em 08 de Fevereiro de 1978, e a operação comercial foi declarada em 30 de Dezembro de 1978. O acidente nuclear ocorrido nesta central como já foi referido anteriormente, levou ao seu encerramento e posterior desmantelamento, passando primeiro por um programa substancial de retirada do combustível usado e descontaminação das instalações.

O valor total estimado para custo de desmantelamento da central é cerca de 836,9 milhões de dólares. Em 31 Dezembro de 2009 os fundos de desmantelamento eram de 576,8 milhões de dólares [55].

4.4.3 Acidente nuclear de Fukushima, Japão



Figura 4.6 - Central nuclear de Fukushima durante o acidente [5]

A central nuclear de Fukushima (Figura 4.6) é uma central localizada na cidade de Okuma, no distrito de Futaba e província de Fukushima ou Fucoxima, na

ilha de Honshu, Japão. Foi a primeira central nuclear construída e administrada pela *The Tokyo Electric Power Company* (TEPCO), e é formada por 6 reactores de água em ebulição. Esses reactores de água leve têm uma capacidade combinada de 4,7 GWe, fazendo de Fukushima uma das 25 maiores centrais nucleares do mundo [56, 57].

No dia 11 de Março de 2011 ocorreu o acidente mais grave da história depois do acidente nuclear de Chernobil. Este acidente foi causado por um terramoto de 8,9 graus na escala de Richter, perto da costa noroeste do Japão, seguido de um *tsunami* que afectou gravemente a central nuclear Japonesa [5].

O desastre ocorrido na central de Fukushima relançou a discussão sobre a segurança das centrais nucleares que utilizam substâncias radioactivas como o urânio para produzir energia eléctrica. Fukushima foi o centro de todas as atenções na medida em que esta central tem reactores de segunda geração com mais de 40 anos. Apesar de estar preparada para aguentar um forte abalo, o *tsunami* provocou um corte de electricidade deixando assim a central sem energia para bombear água para arrefecer os reactores. O *tsunami* atingiu os sistemas alternativos de primeiro recurso (geradores a gasóleo) danificando-os, entraram então em funcionamento os segundos sistemas alternativos que são baterias semelhantes a baterias de automóveis, tendo apenas 3 horas de autonomia.

A inactividade dos sistemas de refrigeração dos reactores levou à evaporação da água das piscinas que armazenam as barras de combustível usadas deixando-as descobertas, o que levou à sua oxidação e libertação de hidrogénio que provocou explosões e proliferação de radioactividade [58].

As autoridades japonesas determinaram a princípio que o acidente tinha sido de categoria 4 de acordo com a escala internacional de acidentes nucleares (INES). No dia 18 de Março, o Organismo Internacional de Energia Atómica (OIEA) informou que, em vista dos danos causados nos núcleos dos reactores, a autoridade reguladora japonesa tinha decidido elevar o nível de acidente nos reactores 2 e 3 para categoria 5, e que a perda das funções de refrigeração na piscina de combustível usado do reactor 4 foi classificada como categoria 3. No dia 15 de Março especialistas nucleares franceses sugeriam que o acidente devia subir para categoria 6 [59]. O acidente nuclear de Fukushima acabou por ser descrito como o pior desde o acidente de Chernobyl [60].

Este acidente nuclear não só resultou em prejuízos materiais mas também suscitou mudanças de opinião por parte de alguns países utilizadores de energia nuclear, como é o caso da Alemanha. Este "segundo Chernobyl" veio no pior momento para a chanceler Angela Merkel, que se reuniu com o seu gabinete de crise com objectivo de testar a segurança das 17 centrais nucleares existentes no país [61].

Apesar de haver muitos reactores de segunda geração em funcionamento, já estão em operação reactores de terceira geração que, de acordo com alguns especialistas e defensores da energia nuclear, poderiam ter evitado o acidente, têm maior capacidade de resistência a catástrofes naturais e não só. A pensar em ataques terroristas, as centrais de terceira geração foram concebidas para resistir ao impacto do choque de um avião, outro factor importante no plano da segurança é que não dependem de energia exterior para o processo de arrefecimento e produzem menos lixo radioactivo, mas a evolução da tecnologia não fica por aqui e já se fala numa quarta geração de reactores que dentro de 20 anos poderão estar disponíveis [58].

Segundo a opinião de alguns engenheiros e analistas, o desmantelamento dos reactores pode levar quatro décadas a ser concluído e custar mais de 1,15 biliões de ienes (US\$ 14,8 mil milhões) [62].

4.5 Níveis de alerta nuclear

A escala INES foi introduzida pela AIEA (Agência Internacional de Energia Atómica) no ano de 1990. Nela é estabelecida uma escala de gravidade de incidentes e acidentes nucleares. Esta ferramenta é utilizada em todo o mundo para comunicar ao público informações sistemática sobre a relevância de eventos nucleares e radiológicos, do ponto de vista da segurança. Ao todo são 7 níveis, sendo os 3 primeiros de incidentes e os 4 subsequentes acidentes. Muitas vezes considera-se, também, um nível 0, onde nenhuma mudança na segurança é proporcionada, bem como consequências à população local [63].

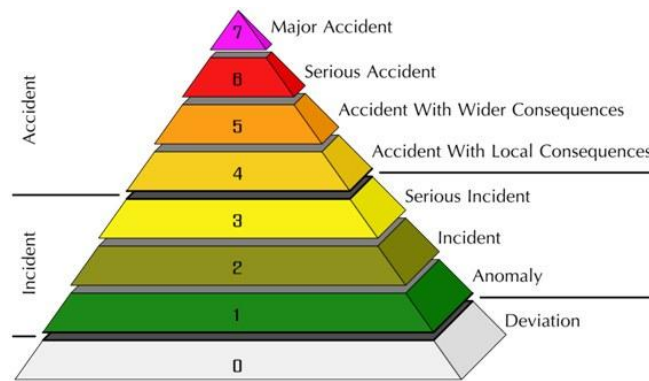


Figura 4.7 - Escala Internacional de Eventos Nucleares [63]

Nível 0 Desvio - Nenhuma relevância para a segurança.

Nível 1 Anomalia - este nível inclui a superexposição de uma pessoa acima dos níveis de radiação anual regulamentados. Pequenos problemas com componentes de segurança e roubo ou perda de uma fonte de baixo nível de radioatividade.

Nível 2 Incidente - incluem a exposição de uma pessoa a mais de 10 mSv ou exposição de um trabalhador acima do limite anual regulamentado. Além disso também se estabelece o nível 2 quando numa área de operação os níveis de radioatividade forem superiores a 50 mSv, contaminação relevante dentro de uma instalação, falhas de segurança importantes, mas com nenhum efeito significativo ou embalagem inadequada de uma fonte de alta radioatividade.

Nível 3 Incidente grave - A exposição 10 vezes superiores aos níveis anuais recomendado para os trabalhadores, efeito não-letais para a saúde, como por exemplo queimaduras, grave contaminação de uma zona de trabalho (mais de 1 Sv/h), perda ou roubo de uma fonte de radioatividade alta e/ou erro no manuseamento dessas fontes.

Nível 4 Acidente com consequências locais - Impacto sobre as pessoas ou o ambiente. Libertação menor de material radioactivo, morte por radiação, Combustível fundido ou danificado e libertação de quantidades significativas de radiação com probabilidade de exposição pública.

Nível 5 Acidente com consequências de longo alcance - Liberação de quantidade limitada de materiais radioactivos com várias mortes ou grande quantidade dentro de uma instalação. Nesses acidentes, há danos no núcleo do reactor, alta probabilidade de exposição à população. Geralmente são causados por incêndios ou acidentes graves.

Nível 6 Acidente grave – Liberação em quantidade relevante de materiais radioactivos para o ambiente externo, passível de exigir aplicação de medidas remediadoras. O acidente de Fukushima I, no Japão, em março de 2011, foi classificado pela Autoridade Francesa de Segurança Nuclear (ASN) como nível 6, embora as autoridades japonesas afirmassem que esse acidente foi de nível 4.

Nível 7 Acidente mais grave ou superior - Liberação extensa de material radioactivo com efeitos amplos sobre a saúde da população e do meio ambiente, com exigência de acções remediadoras planeadas pelas autoridades. O nível 7 foi confirmado apenas no acidente de Chernobyl, na Ucrânia, afirma-se que a radioactividade média das proximidades do local de explosão do reactor era 400 vezes maior que a gerada pela bomba de Hiroshima [63]. Um resumo de todos os incidentes e acidentes nucleares é evidenciado na Figura 4.8.

Casos de eventos com radiação e em instalações nucleares

Níveis de radiação:

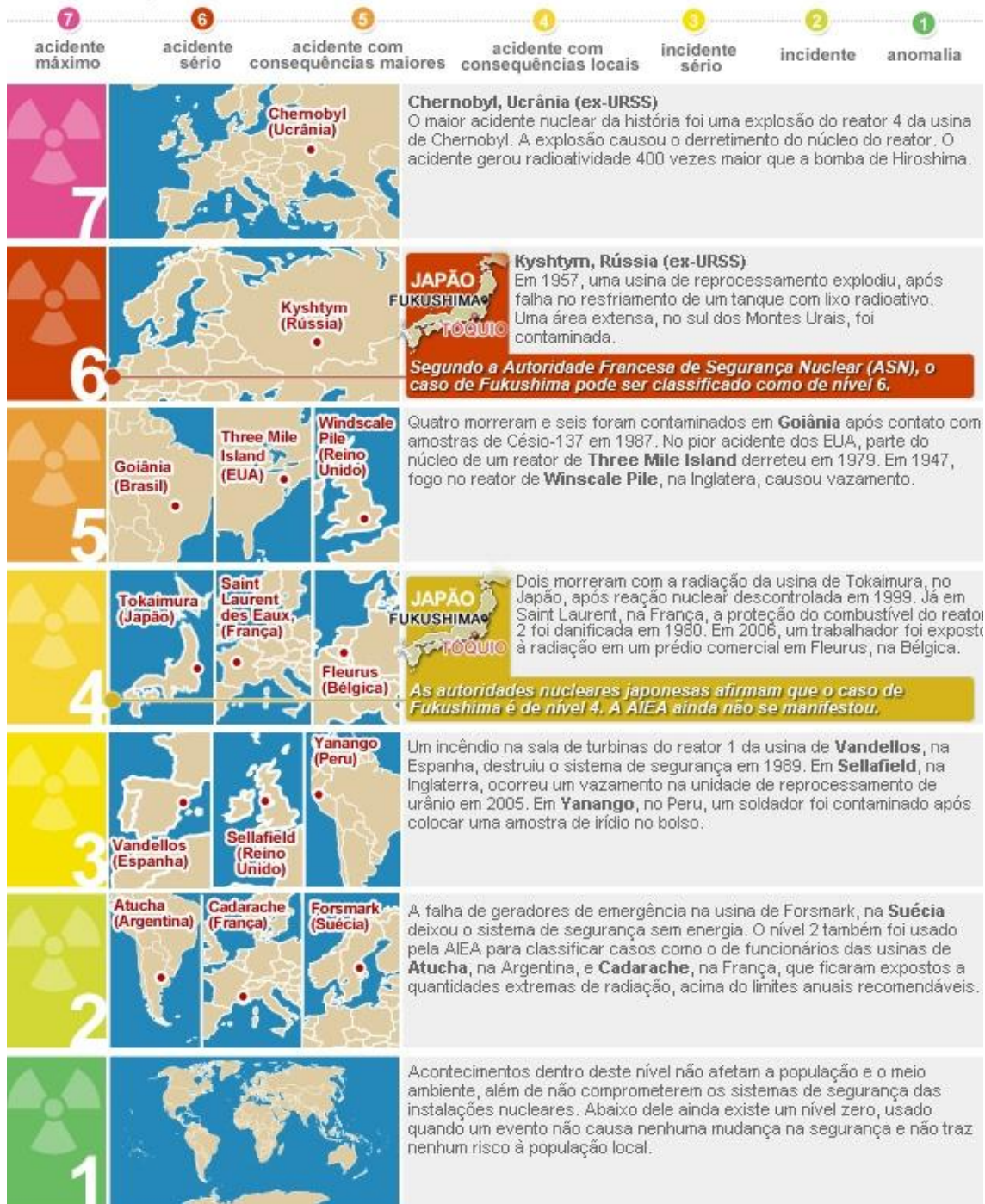


Figura 4.8 - Acidentes Nucleares Classificados com a INES [64]

4.6 Desmantelamento de centrais nucleares

O desmantelamento de uma central nuclear é definido como a cessação das operações e retirada de serviço das instalações e, eventualmente, a sua remoção completa.

As actividades de desmantelamento destinam-se a colocar as instalações numa condição que assegura a saúde e segurança do público em geral e do meio ambiente, enquanto ao mesmo tempo protege a saúde e a segurança dos trabalhadores que irão trabalhar no desmantelamento da central.

O desmantelamento envolve, portanto, todas as operações administrativas e técnicas que permitam retirar a central da lista de estabelecimentos licenciados. As operações administrativas destinam-se particularmente à elaboração de planos de desmantelamento e obtenção de autorizações de certificados de livre acesso para as instalações e local.

As operações técnicas incluem entre outros a descontaminação, desmantelamento e gestão de resíduos.

O desmantelamento não visa a destruição da estrutura, mas libertá-la de todas as obrigações e controlos correspondentes à classe a que eles pertencem. Este é o objectivo final a alcançar [65].

4.6.1 Necessidade de se proceder ao desmantelamento

Há cerca de cinquenta anos atrás, os governos decidiram introduzir a tecnologia nuclear no mix energético, de modo a lidar com a forte necessidade de energia. Hoje em dia, a energia nuclear ainda atende à demanda de energia, mas também produz resíduos radioactivos, que não podem ser directamente vazados para o ambiente.

O procedimento de desmantelamento minimiza (ou em alguns casos, tem esta finalidade) a quantidade de resíduos radioactivos com base na aplicação de normas rigorosas, que garantem a saúde e segurança públicas, bem como a protecção do ambiente.

Quando se prepara um plano para o desmantelamento de uma central nuclear, é ponderada uma série de factores. O plano varia de acordo com cada

instalação e estes factores devem ser avaliados numa base de caso a caso. Estes factores incluem a política nuclear nacional, características da instalação, saúde, segurança, protecção ambiental, gestão dos resíduos radioactivos, utilização futura do local, melhorias da tecnologia de desmantelamento que possam ser alcançadas no futuro, custo e disponibilidade de fundos para o desmantelamento e várias considerações de ordem social.

O tipo de reactor, a localização da instalação e a quantidade total de radioactividade contida na central são elementos importantes na selecção de uma estratégia de desmantelamento. A quantidade e a localização da radioactividade são determinadas pelo tipo de reactor e pelo seu historial de funcionamento. Por exemplo, num reactor BWR a radioactividade circula no circuito da turbina, enquanto num reactor PWR a radioactividade está contida no sistema de arrefecimento primário e não contamina o circuito da turbina [65].

4.6.2 Fases do processo de desmantelamento

4.6.3 DECON (descontaminação)

Na DECON, todos os componentes e estruturas que são radioactivas são limpas ou desmontadas, embaladas e enviadas para um local de eliminação de baixo nível de resíduos, ou então são armazenados temporariamente no local. Uma vez que esta tarefa que leva cinco ou mais anos a ser realizada, for concluída e o órgão regulador retirar a licença da central, parte do local pode ser reutilizado para outros fins [65].

4.6.4 SAFSTOR (Armazenamento seguro)

No SAFSTOR, a central nuclear é mantida intacta e posta em regime de armazenamento protectorio durante dezenas de anos (20 a 150 anos). Este método destina-se a bloquear a parte da central que contem materiais radioactivos e monitorizá-lo com uma força de segurança local. Este método usa o tempo como um agente de descontaminação, ou seja, a radioactividade

existente vai diminuindo com o passar do tempo para níveis considerados seguros.

Por exemplo, se uma central estiver inactiva por 30 anos, a radioactividade do cobalto-60 será reduzida para 1/50 do seu nível original; depois de 50 anos, a radioactividade será apenas 1 / 1000 do seu nível original. A partir do momento em que a radioactividade diminui para níveis mais baixos, a unidade é desmontada [65].

4.6.5 Enterramento

Esta opção destina-se ao encerramento de estruturas, sistemas e componentes radioactivos com uma substância de longa duração, tal como o cimento. A central (envolvida com uma estrutura de protecção) é mantida de forma adequada e continuamente vigiada até que a radioactividade diminua para um nível que permita a rescisão da licença da central. A maioria das centrais nucleares terá concentrações de radioactividade superiores aos limites de utilização irrestrita mesmo depois de 100 anos, portanto, disposições especiais serão necessárias para o período de acompanhamento prolongado que esta opção exige [65].

4.6.6 Custos e disponibilidade de fundos

O custo de desmantelamento das instalações nucleares baseia-se nos seguintes factores: escolha de sequência de fases de desmantelamento, tempo de cada fase de desmantelamento e actividades de desmantelamento realizadas em cada fase.

Além disso, os custos dependem do país em que as operações estão a decorrer e de factores específicos do local, tais como o tipo de reactor, gestão de resíduos e práticas de eliminação dos mesmos.

Custos de desmantelamento totais incluem todos os custos desde o início do desmantelamento até o local ser libertado para uso irrestrito. Supõe-se que cada instalação acabará por ser desmantelada na fase 3, até porque antes desta fase, existe ainda alguma radioactividade que continua a exceder os

limites de acesso ilimitado ao local por um período muito mais longo que o previsto na fase 2.

As estimativas de custos são baseadas em experiências de desmantelamentos e descontaminação anteriores, nomeadamente custos de vigilância, de manutenção e substituições de componentes nucleares etc. As tabelas (6.1, 6.2 e 6.3) mostram-nos que os custos de desmantelamento não são os mesmos para todos os países utilizadores desta tecnologia. É importante referir que quando se iniciam as actividades de produção de energia eléctrica por meio da nuclear, há que conviver com os riscos daí inerentes, podendo os mesmos ocorrer durante o tempo de vida útil da central. Nesta altura passa-se por uma avaliação, a fim de se determinar se a central tem condições de continuar em funcionamento ou encerrar as suas actividades, só neste momento é que é possível fazer uma previsão do custo total de desmantelamento [65].

Exemplos de processos de desmantelamento são resumidos na Tabela 4.3, Tabela 4.4 e Tabela 4.5

Tabela 4.3 – Custo de desmantelamento nuclear na Europa Ocidental [66]

País	Localização	Tipo de Reactor	Tempo de Operação	Fase de Desmantelamento	Custo total de Desmantelamento (M€) inflacionado ⁴
França	Brennilis	HWGCR 70 MWe	12 anos (1967–1979)	3 Fases	1512,18
França	Superphénix at Creys-Malville	FBR 1242 MWe	11 anos (1985-1996)	Adiado	4689,90
Reino Unido	Berkeley	2x138 MWe	27 anos (1962-1989)	Armazenamento seguro: 30 anos	968,00
Reino Unido	Sellafield-Windscale	-	18 anos (1963-1981)	Remoção do reactor em 2009 – projecto piloto	244,32
Alemanha ocidental	Gundremmingen - A	BWR - 250 MWe	11 anos	Desmantelamento imediato – projecto piloto	246,55
Espanha	Vandellós 1	UNGG - 480 MWe	18 anos, Incidente: incêndio num turbogerador - 1989	Armazenamento seguro: 30 anos demolição interna	203,16
Alemanha oriental	Rheinsberg - 1	VVER - 210 70-80 MWe	24 anos (1966-1990)	Em desmantelamento desde 1996 Armazenamento seguro	24,78

Tabela 4.4 – Custo de desmantelamento nuclear na América do Norte [66]

País	Localização	Tipo de Reactor	Tempo de Operação	Fase de Desmantelamento	Custo total de Desmantelamento (M€) inflacionado ⁴
Canada (Québec)	Gentilly-1	CANDU-BWR 250 MWe	180 dias (entre 1966 e 1973)	Parada desde 1986	98,41
Canadá (Ontário)	Pickering NGS Unidades A2 e A3	CANDU-PWR 8x542 MWe	30 anos (1974-2004)	Duas unidades actualmente paradas Desmantelamento em 2012?	1593,48
EUA	Fort St. Vrain	HTGR (hélio-grafite) 380 MWe	12 anos (1977-1989)	Desmantelamento imediato	265,44
EUA	Rancho Seco	Multi-unidades PWR 913 MWe	12 anos (Fechada apos um referendo em 1989)	Armazenamento seguro: 5-10 anos Conclusão 2018	511,32
EUA	Shippingport	(Primeiro BWR) 60 MWe	25 anos (Fechada em 1989)	Desmantelamento concluído (5 anos) (Primeiro pequeno reactor experimental)	133,95
EUA	Yankee Rowe	PWR 185 MWe	31 anos (1960-1991)	Desmantelamento concluído	745,37
EUA	Maine Yankee	PWR 860 MWe	24 anos (Fechado em 1996)	Desmantelamento concluído - Demolido em 2004	678,57
EUA	Connecticut Yankee	PWR 590 MWe	28 anos (Fechado em 1996)	Desmantelada - demolido em 2007	876,26
EUA	Exelon - Zion 1 e 2	PWR – Westinghouse 2x1040 MWe	25 anos (1973-1998) Fechado incidente nos vaporizadores	Armazenamento seguro (Abertura para os visitantes em 2018)	1118,64

Tabela 4.5 – Custo de desmantelamento nuclear na Ásia [66]

País	Localização	Tipo de Reactor	Tempo de Operação	Fase de Desmantelamento	Custo total de Desmantelamento (M€) inflacionado ⁴
China	Beijing (CIAE)	HWR 10 MWe (multipurpose) (Reactor experimental para a produção de plutónio e de trítio)	49 anos (1958-2007)	Descontaminação e Armazenamento seguro 20 anos (até 2027)	9,45
Japão	Tokai-1	Magnox (GCR) 160 MWe	32 anos (1966-1988)	Armazenamento seguro: 10 anos e Descontaminação até: 2018	739,43

⁴ Inflacionado no país de origem até ao ano 2010 e convertido em euros com taxas de câmbio de 31/12/2010

Capítulo 5

Custo da central nuclear

5.1 Principais indicadores

5.2 Viabilidade económica

5 Custo da central nuclear

O custo de geração de energia através da energia nuclear pode ser separado nos seguintes componentes: custo de licenciamento, custo de construção, custo de operação e manutenção da instalação, custo de tratamento dos resíduos radioactivos e custo de desmantelamento [67]. Uma maneira eficaz de estimar os custos das tecnologias de geração de electricidade é adicionar o custo de capital e, no caso da energia nuclear, os custos de desmantelamento aos custos de operação, e dividir isto pela quantidade de electricidade que é expectável que a central gere durante o seu tempo de vida. Este cálculo dá uma medida conhecida como “custo nivelado”, expressa em termos de custo por kWh ou MWh.

$$C_n = \frac{\sum_{a=1}^{Tvu} C_T^a / (1+i)^a}{\sum_{a=1}^{Tvu} E_p^a / (1+i)^a} \quad [68] \quad (5.1)$$

C_n – Custo nivelado (€/MWh)

C_T^a – Custos totais do ano a (€)

E_p^a – Energia produzida no ano a (MWh)

5.1 Principais indicadores

Os custos em seguida apresentados são, em parte, provenientes de um estudo realizado em Espanha para a construção de 11 novas centrais nucleares. Foi seguida a filosofia deste estudo pela proximidade do país uma vez que em Portugal não existe experiência em reactores nucleares para produção de energia eléctrica.

5.1.1 Custo de licenciamento

A Tabela 5.1 apresenta uma hipótese de licenciamento e construção. No caso dos custos de licenciamento ela evidencia um valor fixo de 120 M€ que vai evoluindo na sua distribuição temporal desde quatro anos para a primeira

central até dois anos a partir da terceira. Relativamente ao custo de construção o seu valor total é de 2880 M€ cuja distribuição temporal vai variando entre seis anos para as seis primeiras centrais e cinco anos para as restantes centrais.

Tabela 5.1 - Hipótese de licenciamento e construção de 11 centrais nucleares de 1000 MW em Espanha, distribuição temporal do licenciamento (vermelho) e construção (negro) [12]

Central \ Ano	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
2009	20										
2010	30	30									
2011	30	30									
2012	40	60	60	60							
2013	300	300	60	60							
2014	540	540	300	300							
2015	600	600	540	540							
2016	750	750	600	600							
2017	450	450	750	750	60	60					
2018	240	240	450	450	60	60	60	60			
2019			240	240	300	300	60	60			
2020					540	540	360	360			
2021					600	600	660	660			
2022					750	750	750	750			
2023					450	450	750	750	60	60	60
2024					240	240	360	360	60	60	60
2025									360	360	360
2026									660	660	660
2027									750	750	750
2028									750	750	750
2029									360	360	360

5.1.2 Custo de construção

Também referidos como custos de capital, estes custos são aqueles definidos durante o estudo de viabilidade, licenciamento, estudos ambientais e construção de uma nova central nuclear. No entanto, nos custos de capital não estão incluídos o custo de armazenamento inicial de combustível ou os custos de ligação à rede de distribuição.

Tabela 5.2 - Estimativas de custos de construção em vários países [12]

País	Custos de construção (€/kW)
Canadá	1688
Estados Unidos da América	1656
República Checa	952
Finlândia	2485
França	2163
Alemanha	3000
Holanda	1365
Eslováquia	2633
Suíça	2933
Japão	2918
República da Coreia	2013
Coreia do Norte	2517
Roménia	1049
Média	2069,5
Intervalo	952-3000

O custo da mão-de-obra e a experiência a nível da implementação da energia nuclear pesam bastante nos custos de construção, tal pode ser evidenciado pela diferença de custo entre a Roménia (1049 €/kW) e a Alemanha (3000 €/kW) e entre a Alemanha e a França (2163 €/kW) na Tabela 8.2.

Segundo dados da ENEA, o custo de construção de uma central nuclear (*capital cost, overnight*) é de 1272-2245 €/kW (valor típico 1871 €/kW em 2007 e 2245 €/kW em 2008) [47].

Tabela 5.3 - Distribuição do investimento para construção de uma central de 1000 MW [12]

Ano	Actividades de investimento	% sobre o total	Total (M€)
1	Licenciamento	2	60
2	Licenciamento		
3	Licenciamento	2	60
4	Licenciamento		
5	Obras de construção civil	10	300
6	Equipamentos + construção civil	18	540
7	Equipamentos + construção civil	20	600
8	Equipamentos + construção civil	25	750
9	Equipamentos + construção civil	15	450
10	Acabamentos + testes	8	240
	Total	100	3000

5.1.3 Estimativas recentes de custos de construção

De acordo com os dados mais recentes, o consórcio finlandês Fennovoima anunciou a construção de um reactor nuclear em Pyhajoki, no norte da Finlândia. Esta será a primeira nova central nuclear no mundo desde o acidente nuclear de 11 de Março na central japonesa de Fukushima.

O projecto, a um custo total estimado entre 4 a 6 mil milhões de euros, fornecerá energia a accionistas da Fennovoima, incluindo a siderúrgica Outokumpu, a rede varejista Kesko e subsidiárias locais da metalúrgica sueca Boliden.

O executivo-chefe da Fennovoima, Tapio Saarenpaa, disse em entrevista colectiva que a obra deve começar em 2015, salientando que irão receber ofertas de fabricantes de equipamentos no início do ano. Depois de passarem

por esta fase e terem escolhido o fornecedor poder-se-á solicitar o alvará de construção do governo, por volta de 2012-13.

Partidários finlandeses da energia nuclear dizem que o país não tem condições económicas de reduzir o uso desse recurso, como fará a Alemanha. Os longos e gélidos invernos finlandeses exigem um elevado consumo energético, e os sectores madeireiro e siderúrgico do país também precisam de fontes baratas e confiáveis de electricidade [68].

5.1.4 Custo de operação e manutenção

Os custos de operação e manutenção (O&M), relacionam-se com a gestão e manutenção de uma central durante o seu tempo de vida. Os custos de O&M incluem: operação e monitorização da central; manutenção (materiais de trabalho e serviços); equipas de apoio à engenharia, administração, gestão de resíduos e lixos; despesas gerais com serviços da central (externos à localização); impostos e taxas (específica da central), seguros (específico da central); órgão de apoio, vigilância, créditos, outros. [12]

Tabela 5.4 - Estimativa de custo de combustível e O&M de uma central nuclear de 1000 MW (€/MWh) a desenvolver no projecto (preços de 2007) [12]

	Urânio	Enriquecimento	Fabricação	Equipamentos	Colaboradores internos	Colaboradores externos	Total	% sobre total
Combustível	1,925	1,225	0,35				3,5	22,13
O&M puro				1,11	2,59		3,7	23,4
O&M substituição				2,21	0,34	0,85	3,4	21,5
Desmantelamento e disposição final do combustível				1	0,5	3,5	5	31,62
Seguros RC e RC nuclear							0,21	1,35
Total	1,925	1,225	0,35	4,32	3,43	4,35	15,81	100
% do total	12,17	7,75	2,21	27,32	21,69	27,51	100	

Na Tabela 5.4 está representado não só a estimativa do custo de combustível de uma central de 1000 MW, mas também o custo de operação e manutenção relativo à substituição do combustível usado. Nos períodos em que é necessário proceder a substituição deste mesmo combustível, este processo

requer condições apertadas de segurança devido a radioactividade dos produtos da fissão. Por essa razão há necessidade de subcontratar pessoal especializado e equipamentos que em condições normais de funcionamento da central não havia necessidade. A tabela acima dá-nos uma estimativa destes custos adicionais, cerca de 21,5% do total dos custos da central.

Tabela 5.5 - Custo de O&M anuais em diversos países

Países	Custos de O&M Anuais (€/kW)
Canadá	58,2
Estados Unidos da América	55
República Checa	54,4
Finlândia	41,96
França	40,3
Alemanha	56,8
Holanda	59
Eslováquia	68
Suíça	46,7
Japão	94,0
República da Coreia	60,31
Coreia do Norte	50,72
Roménia	71,6
Média	58,2
Intervalo	40,3 – 94,0

Segundo dados da ENEA (2007) os custos de operação e manutenção (O&M) fixos e variáveis rondam entre os 7,50 e 12,00 €/MWh [47].

5.1.5 Custo de combustível

Um reactor a água pressurizada (PWR) requer combustível novo a cada 12, 18 ou 24 meses. Desde o princípio a atracção básica da energia nuclear tem sido o baixo preço do combustível quando comparado com as centrais a carvão, petróleo e gás, apesar do custo do urânio ter aumentado nos últimos anos. O combustível representa uma componente pequena nos custos de uma central nuclear, mas, o urânio tem de ser processado, enriquecido e fabricado em elementos combustíveis, e cerca de 2/3 do custo são devidos ao enriquecimento e fabricação. Na avaliação económica para obtenção de licenças de instalações de energia nuclear tem-se em conta a gestão do combustível radioactivo utilizado, a eliminação final do mesmo e a separação dos resíduos do combustível utilizado.

Tabela 5.6 - Custos, em Euros, de 1 kg de urânio enriquecido a 3,6% na forma de UO₂ [16]

	Quantidade	% ²³⁵ U/U	Custo unitário	Total
Urânio natural	9,61 kg (U ₃ O ₈) = 8,15 kg U	0,72	85,8 €/kg (U ₃ O ₈) + 16,5 €/kg (U ₃ O ₈) ⁵	983 €
Conversão	11,99 kg (UF ₆) = 8,11 kg U	0,72	4,9 €/kg (U na forma de U ₃ O ₈)	40 €
Enriquecimento 4,57 SWU	1,49 kg (UF ₆) = 1,01 kg U	3,6	99,5 €/SWU + 16,5 €/kg (U empobrecido excedente) ⁵	508 €
Fabricação	1,13 kg (UO ₂) = 1 kg U	3,6	344,3 €/kg (U na forma de UO ₂)	344 €
Total				1875 €

A Tabela 5.6 ilustra os custos inerentes ao fabrico do combustível nuclear. Para fabricação de 1kg de urânio enriquecido a 3,6% na forma de UO₂, é necessário 9,61 kg de minério de urânio (U₃O₈) (tendo um custo unitário de 102,3 €/kg), nos quais estão contidos 8,15 kg de urânio natural. Como já foi referido no Capítulo 3, estes 9,61 kg de minério são então convertidos, com uma perda de 0,5% de urânio, em 11,99 kg de UF₆ contendo 8,11 kg de urânio natural, a um custo unitário de 4,9 €/kg de urânio na forma de U₃O₈. O enriquecimento dos 11,99 kg UF₆, dá origem a 1,49 kg de UF₆ nos quais estão contidos 1,01 kg de U enriquecido a 3,6%. Para que este processo de enriquecimento ocorra são necessários 4,57 SWU⁶ (Unidade de Trabalho Separativo), que têm um custo unitário de 99,5 €/SWU. O processo de enriquecimento dá origem a urânio empobrecido que é um resíduo do processo e tem que ser tratado, esse tratamento custa 16,5 €/kg de urânio empobrecido. Por fim os 1,49 kg de UF₆ são então convertidos em UO₂ e transformados em pastilhas de combustível durante a fabricação de combustível a um custo unitário de 344,3 €/kg de urânio na forma de UO₂, resultando em 1,13 kg de UO₂. Este processo origina uma perda de 1% de urânio enriquecido.

Com esta quantidade de combustível é possível produzir 42 MWd com uma eficiência de 34,2%.

O urânio tem a vantagem de ser uma fonte altamente concentrada de energia que é facilmente transportável e barata. As quantidades necessárias para produzir a mesma energia são muito menores do que o carvão ou óleo. Um kilo de urânio natural renderá cerca de 20000 vezes mais energia que a mesma

⁵ Custo de tratamento de resíduos relacionados com a produção de combustível

⁶ É uma função da quantidade de urânio processado e o grau a que é enriquecido

quantidade de carvão. É, portanto, intrinsecamente uma mercadoria negociável e muito portátil.



Figura 5.1 - Equivalência de abastecimento de combustível para uma central eléctrica de 1000 MWe [21]

5.1.6 Custo de tratamento de resíduos

Os reactores nucleares produzem resíduos radioactivos, estima-se que mundialmente são produzidas cerca de 1200 toneladas/ano. Existem processos de reaproveitamento do combustível usado nomeadamente em França. Este processo consiste em separar as substâncias recicláveis do lixo. Os processos de tratamento do combustível nuclear gasto deixam sempre resíduos altamente radioactivos que devem ser armazenados em locais apropriados para o efeito. Tanto o processo de tratamento como o seu transporte fazem subir os custos das centrais nucleares. A maior parte dos reactores procedem ao armazenamento dos resíduos durante algum tempo no próprio local do reactor, minimizando e adiando assim os problemas que derivam do transporte de resíduos radioactivos.

Segundo dados da ENEA (2007) o custo de tratamento dos resíduos ronda entre os 0,75 e 1,50 €/MWh [47].

5.1.7 Custo de desmantelamento

Custos de desmantelamento são aqueles que ocorrem quando a central nuclear chega ao fim do seu tempo de vida, um custo comum a todas as tecnologias de geração de energia. A energia nuclear também tem de acarretar com os custos de gestão a longo prazo e eliminação dos resíduos radioactivos. Os custos de desmantelamento são significativos e sujeitos a muitas incertezas.

A Tabela 5.7 evidencia o custo de desmantelamento em vários países. Como já foi referido anteriormente, este custo depende de vários factores e muitas situações podem levar ao fim das operações e respectivo desmantelamento, desde uma avaria num sistema importante, sendo que por razões económicas não é viável a sua reparação, até ao fim do tempo de vida útil da central. É importante referir que uma percentagem das receitas é destinada ao desmantelamento da central, como tal há vantagem da central funcionar até ao fim do seu tempo de vida útil.

Tabela 5.7 - Custos de desmantelamento em países da OCDE, Janeiro de 1988⁷ [69]

País	Tipo de Reactor	Potência (MWe)	Custo 1988 (M US\$)	Custo 2010 (M US\$)	Custo 2010 (M€)	Custo (€/kWe)
Bélgica	PWR	1390	207	340	254	182,81
Canadá	HWR	881	196	331	248	281,00
	HWR	400	164	277	207	517,86
Finlândia	PWR	1000	189	315	236	235,90
França	PWR	1390	208	321	240	172,77
Alemanha	PWR	1256	280	449	336	267,42
Itália	PWR	945	477	1001	749	792,50
Japão	PWR	1100	221	248	185	168,45
Holanda	PWR	1300	320	519	388	298,63
Espanha	PWR	950	268	620	464	488,16
RU	PWR	1175	380	717	537	456,69
EUA	PWR	1144	130	247	185	161,52

Como breve conclusão sobre as previsões de custo de uma central nuclear, são apresentados na Tabela 5.8 os resultados dos estudos efectuados por várias universidades e instituições reconhecidas internacionalmente. Nota-se a enorme incerteza que há nos custos associados ao nuclear, o que permite avaliar os riscos inerentes quando se decide iniciar a construção de uma central nuclear. Um aspecto importante que torna o investimento elevado é o custo de capital, que de acordo com os estudos varia entre 7,50% (Royal Academy of Technology) a 12,50% (University of Chicago). Por outro lado é possível constatar que o custo de geração de electricidade deste tipo de

⁷ Os resultados são de uma pesquisa conjunta 1988 NEA / IEA. Estimativas de custos são baseadas em respostas a questionário.

tecnologia é uma das mais baixas quando comparado com outras tecnologias de geração de electricidade. Outro aspecto importante é o factor de carga que mostra a enorme potencialidade que o nuclear tem.

Não obstante as desvantagens que o nuclear apresenta, ela tem sido muitas vezes alternativa em muitos países como forma de combater o enorme crescimento do consumo de electricidade.

Tabela 5.8 - Comparação de suposições em previsões recentes dos custos de geração das centrais de energia nuclear [70]

Previsão	Custo construção (€/kW)	Tempo de construção (meses)	Custo de capital (% real)	Factor de carga (%)	Custo de O&M com combustível (€/MWh)	Vida útil (anos)	Custo de geração (€/MWh)
Rice University	-	-	-	-	-	-	50
Lappeenranta Univ	1875	-	0,00%	91,00%	18	60	24
Performance and Innovation Uni	1200	-	11,50%	80,00%	-	22,5	44,7
Scully Capital	942,5	60	-	90,00%	12	40	
Massachusetts Institute of Technology	1600	60	11,50%	80,00%	11	32,5	73
Royal Academy of Engineers	1660	-	7,50%	90,00%	22	40	41
Royal Academy of Engineers (update)	1520	60	10,00%	90,00%	23	40	41
Chicago University	1125	84	12,50%	85,00%	12	40	50,5
Canadian Nuclear Assoc.	1550	72	10,00%	90,00%	11	30	50
IEA/NEA	2600	90	10,00%	85,00%	27,5	40	29
OXERA	2350	-	10,00%	95,00%	10	40	56
UK Energy Review 2006	1875	72	10,00%	82,50%	17,3	40	57

5.2 Viabilidade económica

Uma Análise de Viabilidade (ou Estudo de Viabilidade) consiste num estudo técnico de carácter financeiro que procura determinar as possibilidades de sucesso económico e financeiro de um determinado projecto, seja ele um projecto de investimento, o lançamento de um novo produto, a entrada num novo mercado ou um projecto de reestruturação organizacional. Através deste estudo são efectuadas previsões dos proveitos e dos custos gerados pelo projecto e calculados diversos indicadores de viabilidade, baseados na avaliação dos fluxos de tesouraria gerados, entre os quais a Taxa Interna de Rentabilidade (TIR), o Valor Actual Líquido e o Prazo de Recuperação do Investimento (PRI) ou Payback Period.

Naturalmente que, ao basear-se em dados previsionais, qualquer estudo de viabilidade envolve um elevado grau de incerteza. De forma a limitar os efeitos dessa incerteza e avaliar a robustez dos resultados do projecto poderá também ser efectuada uma análise de sensibilidade, na qual são testados diversos cenários mais pessimistas e mais optimistas.

As análises de viabilidade são necessárias para apoiar a tomada de decisões dos investidores (as suas conclusões podem determinar a realização ou não de um determinado investimento, por exemplo), mas também podem ser requeridas pelos diferentes financiadores do projecto tais como accionistas, bancos, instituições gestoras de programas de apoio, entre outras. Por outro lado, o próprio processo de execução das análises de viabilidade obriga à execução de trabalhos de planeamento com todas as vantagens daí decorrentes.

Como já foi referido anteriormente, este trabalho tem como objectivo o estudo de viabilidade económica da implementação de um reactor nuclear para produção de energia eléctrica em Portugal. Neste trabalho considerou-se que a actividade da empresa se inicia com o licenciamento e construção da central nuclear e não foi tomado em conta o efeito das amortizações nem dos impostos. Antes de iniciar-se propriamente o estudo de viabilidade convém definir alguns indicadores de viabilidade anteriormente referenciados.

5.2.1 Indicadores económicos

Cash-Flow (em português, fluxo de caixa), representa o saldo entre as entradas e saídas de capital de uma empresa durante um determinado período de tempo, sendo calculado através da construção de um mapa de fluxos de tesouraria.

O Valor Actual Líquido (VAL) tem como objectivo avaliar a viabilidade de um projecto de investimento através do cálculo do valor actual de todos os seus cash-flows.

Por valor actual entende-se o valor hoje de um determinado montante a obter no futuro. Como qualquer investimento apenas gera cash-flow no futuro, é necessário actualizar o valor de cada um desses cash-flows e compará-los com o valor do investimento. No caso do valor do investimento ser inferior ao valor actual dos cash-flows, o VAL é positivo o que significa que o projecto apresenta uma rentabilidade positiva.

$$VAL = \sum_{a=1}^{T_{vu}} \frac{CF^a}{(1+i)^a} \quad (5.2)$$

VAL – Valor Actual Líquido (M€)

CF^a – Cash-flow do ano a

a – Ano do investimento

T_{vu} – Tempo de vida útil (a)

i – Taxa de actualização

A taxa interna de rentabilidade (TIR) representa a rentabilidade gerada por um determinado investimento (muito utilizada como um dos indicadores chave em estudos de análise de viabilidade), ou seja, representa uma taxa de juro tal que, se o capital investido tivesse sido colocado a essa taxa, obter-se-ia exactamente a mesma taxa de rendibilidade final. Por outras palavras, representa uma taxa que se utilizada como taxa de desconto, torna o VAL igual a zero. A partir do momento em que a rentabilidade dos projectos de investimento seja conhecida, o critério de decisão sobre o investimento

consiste simplesmente em aceitar os que apresentam uma TIR superior ao custo de financiamento acrescido de uma determinada taxa de risco que lhes esteja associada.

$$VAL = 0 = \sum_{a=1}^{T_{vu}} \frac{CF^a}{(1+TIR)^a} \quad (5.3)$$

TIR -Taxa interna de rentabilidade

Payback (conhecido em português como prazo de recuperação do capital) é o período de tempo que um projecto leva a recuperar o capital inicialmente investido.

Taxa de actualização a taxa aplicada aos rendimentos ou cash-flows futuros de forma a obter o seu valor actual. Podendo ser utilizada indiferenciadamente como taxa de actualização de rendimentos futuros ou como taxa de capitalização, esta taxa pode ser entendida como o prémio exigido pelos investidores como forma de compensação do risco e da incerteza quanto ao recebimento dos benefícios futuros. Assim, na sua estimativa é incluído não apenas uma taxa de juros sem risco, mas também uma taxa de risco exigida pelos investidores para o tipo de empresa ou de projecto em causa.

Período de carência (de capital) é um intervalo de tempo no decorrer de um empréstimo em que o devedor apenas paga juros sobre o capital em dívida e não efectua reembolsos.

Período de reembolso é o período durante o qual um devedor reembolsa o capital em dívida.

Receita bruta é o capital recebido pelos produtos ou serviços vendidos

$$R_b = \frac{P_v \times E_p^a}{1000000} \quad (5.4)$$

R_b – Receita bruta (M€)

P_v – Preço de venda (€/MWh)

E_p^a – Energia anual produzida no ano a (MWh)

O preço de venda foi estimado de acordo com o preço médio de venda do MIBEL, a partir dos dados da Figura 5.2, que também é coincidente com o preço médio do último ano da energia eléctrica em Portugal, de cerca de 50 €/MWh [71].

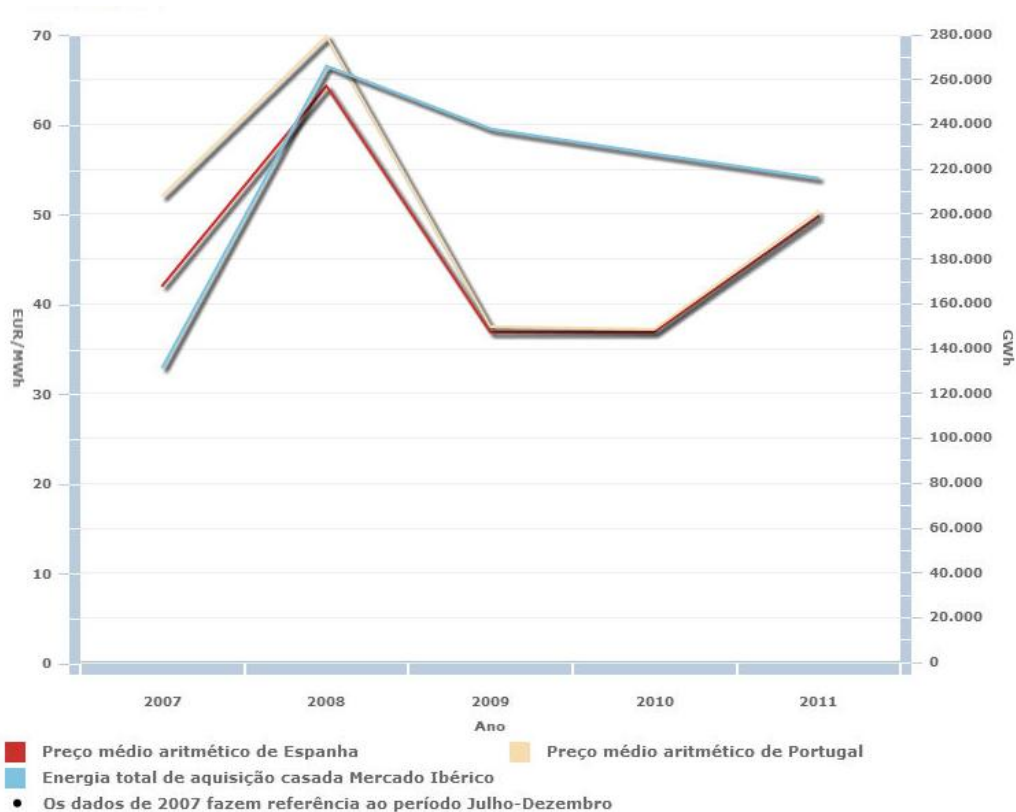


Figura 5.2 - Preços médios aritméticos de electricidade em Portugal e Espanha e energia total anual [71]

Energia anual produzida é função da potência instalada e do tempo equivalente de funcionamento da central.

Factor de carga representa a percentagem de tempo que uma central a plena carga precisa para produzir a energia anualmente produzida. No factor estão contabilizados o tempo que a central está a funcionar e a potência a que a central está a funcionar.

$$E_p^a = P_i \times F_c \times N_h \quad (5.5)$$

F_c – Factor de carga

N_h – Número de horas do ano

5.2.2 Cálculo de viabilidade económica

Na Tabela 5.9 são apresentados três cenários com um conjunto de dados de entrada, distintos em alguns aspectos importantes, os cenários apresentados são: cenário base, cenário pessimista e cenário optimista.

Procurou-se de uma certa forma apresentar valores que fossem bastante realistas por forma a tornar os resultados próximos da realidade e assim se compreender quais os factores que influenciam negativa e positivamente o investimento em centrais nucleares para produção de energia eléctrica.

Tabela 5.9 - Dados de entrada [12, 47, 70]

Caracterização do Projecto	Cenário pessimista	Cenário base	Cenário optimista
Tecnologia:	PWR	PWR	PWR
Potência da Central (MW):	1000	1000	1000
Factor de carga:	83,18%	88,18%	95,00%
Tempo de vida útil da Central (anos):	30	40	60
Custo de licenciamento (M€):	120	120	120
Tempo de licenciamento (anos):	8	4	2
Custo de construção (€/kW):	3750	2070	952
Tempo de construção (anos):	6	5	3
Financiamento (%):	100	100	100
Custo de capital:	10,00%	7,00%	5,00%
Período de carência (anos):	14	9	5
Período de reembolso (anos):	20	30	50
Custos de operação e manutenção (€/MWh):	24,00	11,97	7,10
Custo de combustível (€/MWh):	17,00	7,48	3,5
Custo de tratamento dos resíduos (€/MWh):	2	1,50	0,75
Custo de desmantelamento (€/kW):	973,91	598,71	393,30
Período de angariação (anos):	29	39	59
Taxa de juros do fundo de desmantelamento:	4%	4%	4%
Seguro de responsabilidade civil (€/MWh):	0,21	0,21	0,21
Taxa de actualização:	6%	6%	6%
Preço venda de mercado (€/MWh):	50,00	50,00	50,00

Definidos os indicadores, a avaliação económica será feita com recurso aos mapas económicos que a seguir serão inumerados.

- 1- Mapa de investimento
- 2- Mapa de financiamento
- 3- Mapa de exploração
- 4- Mapa de cash-flow

Mapa de Investimento

Um investimento é uma aplicação de fundos escassos que geram rendimento, durante um certo tempo, de forma a maximizar a riqueza da empresa. O mapa de investimento identifica os meios necessários para iniciar um projecto de investimento e a sua alocação ao longo do tempo bem como a sua proveniência.

Mapa de Financiamento

Tendo em conta os montantes de capital necessário para certos investimentos, pode ser necessário financiamento externo para os concretizar. O mapa de financiamento contém o planeamento dos empréstimos, pagamento de juros e reembolsos.

Mapa de Exploração

As previsões de receitas do investimento são feitas a partir do estudo de mercado, que, ao analisar a evolução da procura de um bem ou serviço, permite prever com maior ou menor fiabilidade o valor das vendas. Geralmente os projectos serão dimensionados para responder à procura. No caso da produção de energia eléctrica em regime especial renovável, assume-se a venda de toda energia produzida.

As previsões dos custos de exploração serão feitas mediante a atribuição de preços aos recursos a utilizar, quantificados pelo estudo técnico.

Mapa de Cash-Flow

Os critérios de avaliação de projectos são medidas ou indicadores de rentabilidade dos projectos de investimento que servem de suporte à tomada de decisão de implementar ou não o projecto.

Todos os processos de tomada de decisão são estabelecidos em termos relativos, i.e., num contexto de cenários.

Quando a tomada de decisão se faz em termos de implementar o projecto vs. não implementar o projecto, compara-se o cash-flow do projecto com um cash flow nulo, pelo que o cash flow do projecto é tomado em termos absolutos.

Quando se comparam os cash flows de dois projectos de investimento alternativos, pode-se determinar o cash flow absoluto actualizado de cada um deles à mesma taxa de actualização.

De seguida é explicada resumidamente a evolução económica do projecto de investimento do cenário base. Pode-se também analisar detalhadamente os cálculos dos três cenários nas tabelas que se encontram em anexo (Tabela A.1, Tabela A.2 e Tabela A.3).

Tabela 5.10 - Mapa de investimento (M€)

Anos	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Custos de Licenciamento	-30	-30	-30	-30					
Custos de Construção					-414	-414	-414	-414	-414
Capital Próprio									
Capital Alheio	30	30	30	30	414	414	414	414	414

Pode-se observar no mapa de investimento da Tabela 5.10, no caso do licenciamento tal como já foi referido anteriormente (Tabela 5.1), optou-se por fazer uma distribuição uniforme do custo de licenciamento (120 M€) ao longo dos 4 anos, relativamente ao custo de construção optou-se também por fazer uma distribuição uniforme desse custo ao longo dos 5 anos. Note-se que os custos de construção, como é óbvio, só começam a ser contabilizados a partir do ano de construção, o ano 5.

O capital alheio é relativo ao empréstimo bancário que é feito em cada ano.

Tabela 5.11 - Mapa de financiamento (M€)

Anos	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Empréstimo Licenciamento	30	30	30	30						
Empréstimo Construção					414	414	414	414	414	
Capital em Dívida	30	60	90	120	534	948	1362	1776	2190	2190
Anuidade										176,5
Reembolso										23,2
Juros	2,1	4,2	6,3	8,4	37,4	66,4	95,3	124,3	153,3	153,3

No mapa de financiamento da Tabela 5.11, a anuidade é igual aos juros durante o período de carência, e durante o período de reembolso é igual à soma dos juros com os reembolsos.

Tabela 5.12 - Mapa de exploração (M€)

Anos	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Receita Bruta	386,2	386,2	386,2	386,2	386,2	386,2	386,2	386,2	386,2	386,2	386,2
Custos de Operação	-161,8	-161,8	-161,8	-161,8	-161,8	-161,8	-161,8	-161,8	-161,8	-161,8	-161,8
Custo de Desmantelamento	-15,4	-15,4	-15,4	-15,4	-15,4	-15,4	-15,4	-15,4	-15,4	-15,4	-15,4
Seguros	1,62	1,62	1,62	1,62	1,62	1,62	1,62	1,62	1,62	1,62	1,62
Resultado antes juros e impostos	207,4	207,4	207,4	207,4	207,4	207,4	207,4	207,4	207,4	207,4	207,4
Juros	-153,3	-151,7	-149,9	-148,1	-146,1	-144,0	-141,7	-139,3	-136,7	-133,9	-130,9
Resultado Líquido	54,1	55,8	57,5	59,4	61,3	63,5	65,7	68,2	70,9	73,6	76,6

No mapa de exploração da Tabela 5.12 encontra-se o valor da receita bruta calculada segundo a Equação 5.4, esta receita tem início no ano 10, primeiro ano de funcionamento, e é uma constante ao longo dos anos uma vez que se assumiu o mesmo preço de venda e a mesma energia produzida todos os anos. De facto, usando o factor de carga deste cenário (88,18%), a respectiva potência produzida (1000 MWe), o número de horas de um ano (8760 h) e o preço assumido de venda de energia eléctrica (50 €/MWh), obtemos:

$$E_p = P_i \times F_{cg} \times N_h = 1000 \times \frac{88,18\%}{100} \times 8760 \Rightarrow E_p = 7724568 \text{ MWh} \quad (5.6)$$

$$R_b = \frac{P_v \times E_p}{1000000} = \frac{50 \times 7725000}{1000000} \Rightarrow R_b = 386,2 \text{ M€} \quad (5.7)$$

Relativamente ao custo operação e manutenção, este é igual para todos os anos de funcionamento porque estes estão indexados à energia produzida e a energia produzida é a mesma durante os anos de funcionamento.

O custo de desmantelamento representa um valor que é angariado para um fundo de desmantelamento durante o período de angariação, que tem início com o funcionamento da central. Este fundo de desmantelamento será utilizada para financiar o desmantelamento da central.

O resultado líquido é o somatório da receita bruta e das despesas.

Tabela 5.13 - Mapa de cash-flow (M€)

Anos	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Investimento											
Reembolsos	-23,9	-24,8	-26,5	-28,4	-30,4	-32,5	-34,8	-37,2	-39,8	-42,6	-45,6
Resultado Líquido	54,1	55,8	57,5	59,3	61,3	63,5	65,7	68,2	70,8	73,6	76,6
Cashflow	30,9	30,9	30,9	30,9	30,9	30,9	30,9	30,9	30,9	30,9	30,9
Cashflow actualizado	17,3	16,3	15,4	14,5	13,7	12,9	12,9	11,5	10,8	10,2	9,7
Cashflow act. acumulado	-318,9	-302,0	-286,6	-272,1	-258,4	-245,5	-233,3	-221,8	-211,0	-201,8	-191,1

O cash-flow representa o saldo entre as entradas e saídas de capital, o cash-flow actualizado é um fluxo de tesouraria futuro visto a partir do presente, para tal é usada uma taxa de actualização.

O cash-flow actualizado acumulado é utilizado para determinar o pay-back de um investimento realizado totalmente com capital próprio, ou seja, a partir do momento em que o cash-flow actualizado acumulado se torna positivo o investimento inicial já está pago e a central começa a dar lucro. Para o cenário base aqui discutido, isso não acontece porque o investimento é 100% financiado, e no momento em que o cash-flow actualizado acumulado é positivo, ainda existem encargos com o empréstimo, portanto é necessário transportar para o primeiro ano todos os encargos com o empréstimo e só então voltar a calcular o cash-flow actualizado acumulado e verificar em que ano este é positivo. O pay-back será o período de tempo decorrido até o primeiro cash-flow actualizado acumulado positivo.

Tabela 5.14 – Resultado do investimento

Resultados	Cenário pessimista	Cenário base	Cenário optimista
Investimento (M€)	3870	2190	1072
Energia Anual Produzida (GWh)	7287	7725	8322
VAL (M€)	-2939	75	2988
TIR	-	7%	82,89%
Pay-back (anos)	-	49	9
Custo de Geração (€/MWh)	116,26	48,91	20,27
Capital próprio inicial (M€)	1460	512	131

Na Tabela 5.14 são apresentados os resultados de viabilidade económica dos três cenários: Cenário base, cenário pessimista e cenário optimista. Relativamente ao cenário base, os valores que influenciam o custo da central nuclear como sejam, custo de licenciamento, custo de construção, tempo de licenciamento, tempo de construção e custo de capital, verifica-se que o tempo de licenciamento e construção contribuem positivamente para o sucesso do investimento e o custo de construção é bastante atractivo. Quanto ao custo de capital (7%), este por sua vez contribui negativamente tornando o custo total da central elevado.

O cenário optimista torna o investimento bastante atractivo embora este esteja bastante fora da realidade, nomeadamente o custo de construção (952 €/kW), custo de capital (no caso de empréstimo bancário), tempo de construção e tempo de licenciamento. As condições da construção de uma central nuclear no cenário optimista em termos económicos são bastante vantajosas, porque se forem cumpridos todos os prazos relativos ao tempo de licenciamento e construção (factores importantes na avaliação económica), ou seja 4 anos, consegue-se obter o retorno do investimento logo após o primeiro ano de funcionamento e quase duplicar o capital investido.

O cenário pessimista, pode-se dizer que é dos três o que está mais próximo da realidade, porque como será a primeira central nuclear e as competências de Portugal no domínio da energia nuclear são muito reduzidas ou quase nulas em alguns dos múltiplos domínios do conhecimento convocados para um programa nuclear, a opção por este tipo de energia implicaria prazos mais alargados no que concerne ao licenciamento e construção, levando assim a custos mais elevados devidos aos juros pagos durante esse período.

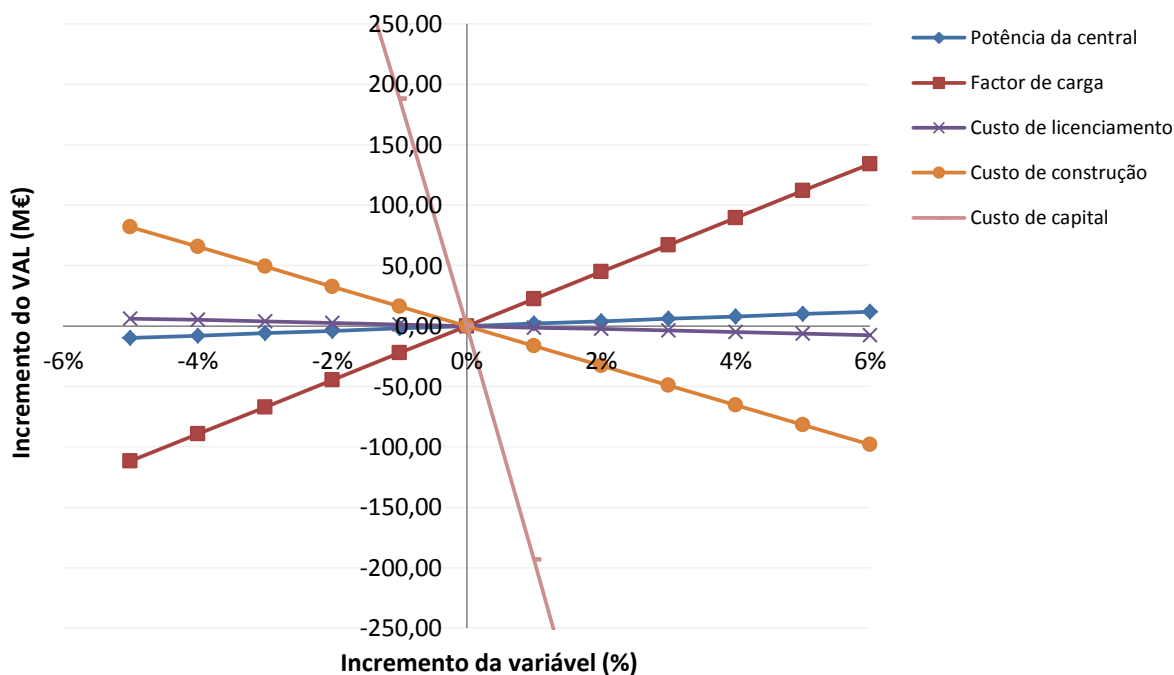


Figura 5.3 - Sensibilidade do VAL em função do incremento de diversas variáveis em percentagem em torno do cenário base

Na Figura 5.3 é possível identificar três variáveis que influenciam negativamente o VAL, sendo elas os custos de licenciamento, construção e capital. Este último, o de capital, é a variável que mais influencia o VAL. Identificam-se também duas variáveis que influenciam positivamente o VAL, como sejam a potência e o factor de carga, que, incrementados positivamente, actuam diluindo os custos fixos do investimento.

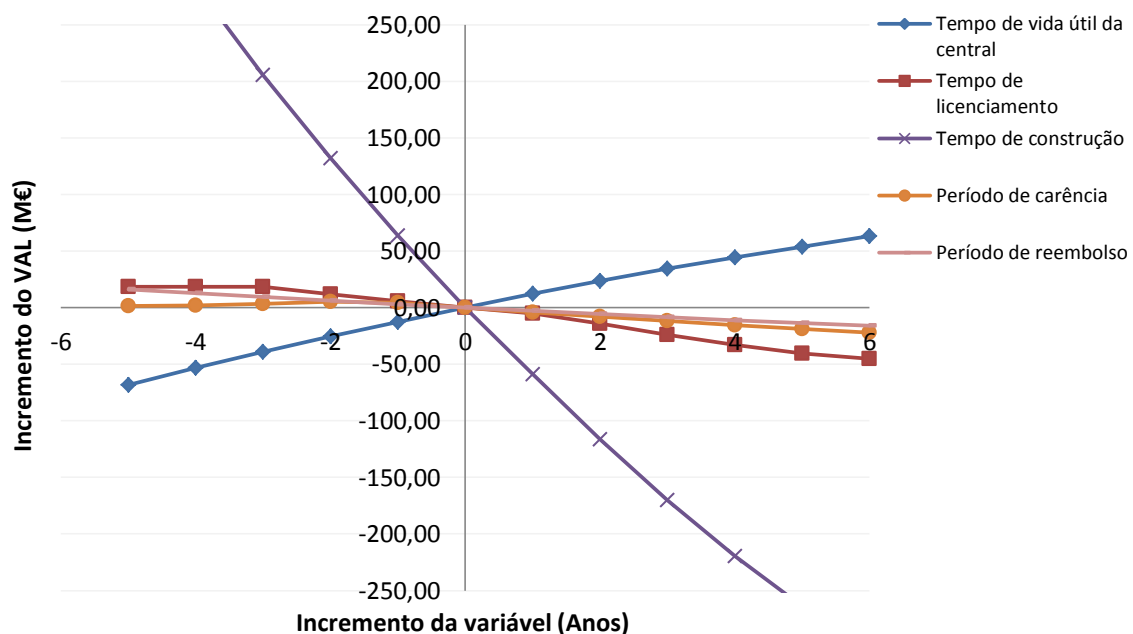


Figura 5.4 - Sensibilidade do VAL em função do incremento de diversas variáveis temporais em torno do cenário base

Na Figura 5.4 pode-se observar a influência negativa do tempo de licenciamento e construção que é explicável por durante este período não existir receita, ou seja, enquanto a central não estiver licenciada e construída o cash-flow é negativo. Observa-se igualmente a influência positiva do tempo de vida útil e do período de reembolso, sendo que o primeiro faz aumentar a receita total do investimento e o segundo provoca um adiamento do pagamento do investimento. Enquanto as funções de sensibilidade do VAL em função das outras variáveis são funções estritamente crescentes ou estritamente decrescentes, o período de carência tem um comportamento bastante diferente, ou seja, se a partir do cenário base se aplicarem incrementos negativos, a influência negativa que esta variável representar será mais acentuada do que se forem aplicados incrementos positivos. Isto acontece porque o reembolso está a ser efectuado antes do período de funcionamento da central e como tal não há receitas para fazer face as crescentes despesas.

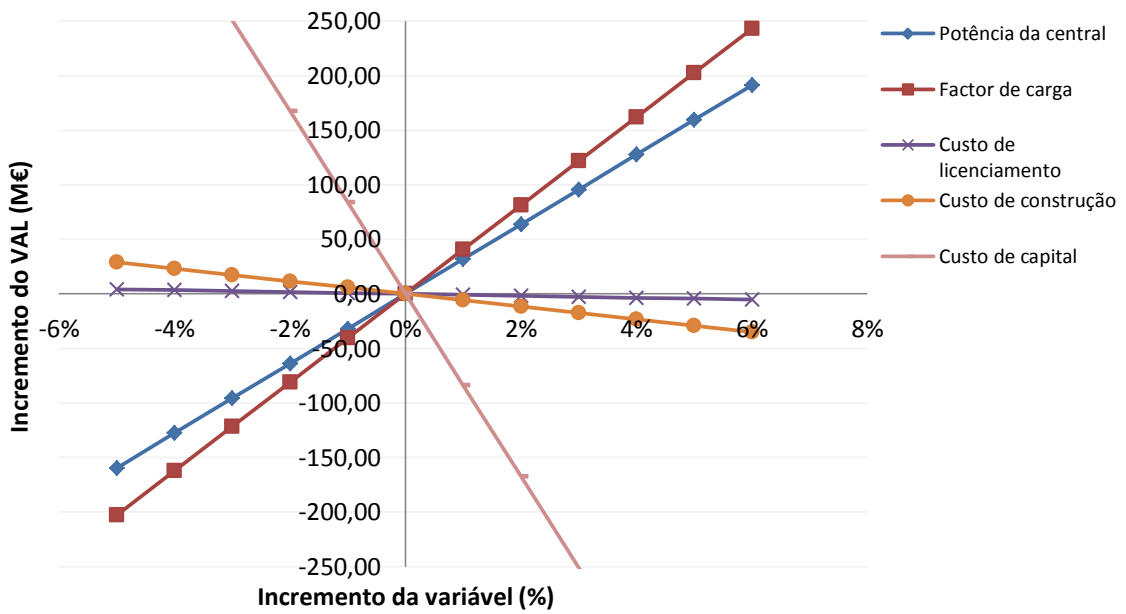


Figura 5.5 - Sensibilidade do VAL em função do incremento de diversas variáveis em percentagem em torno do cenário otimista

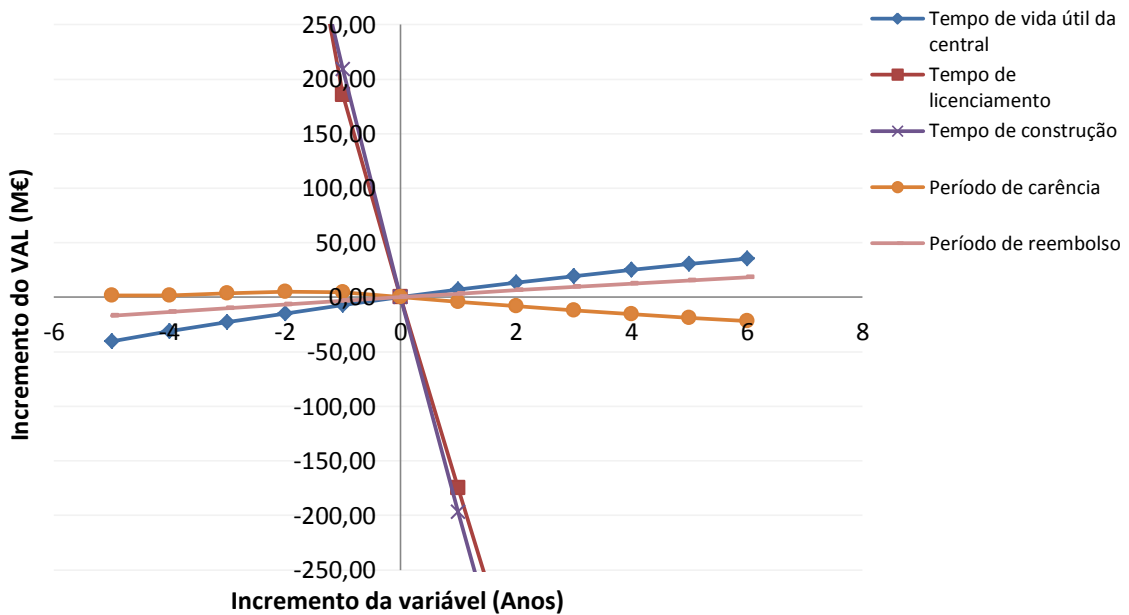


Figura 5.6 - Sensibilidade do VAL em função do incremento de diversas variáveis temporais em torno do cenário otimista

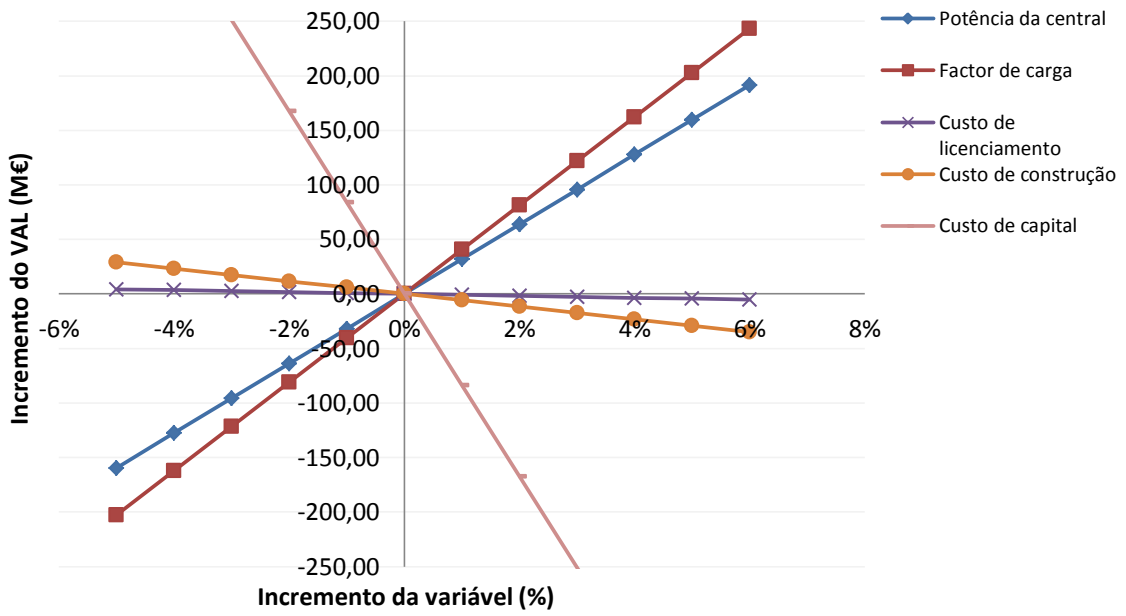


Figura 5.7 - Sensibilidade do VAL em função do incremento de diversas variáveis em percentagem em torno do cenário pessimista

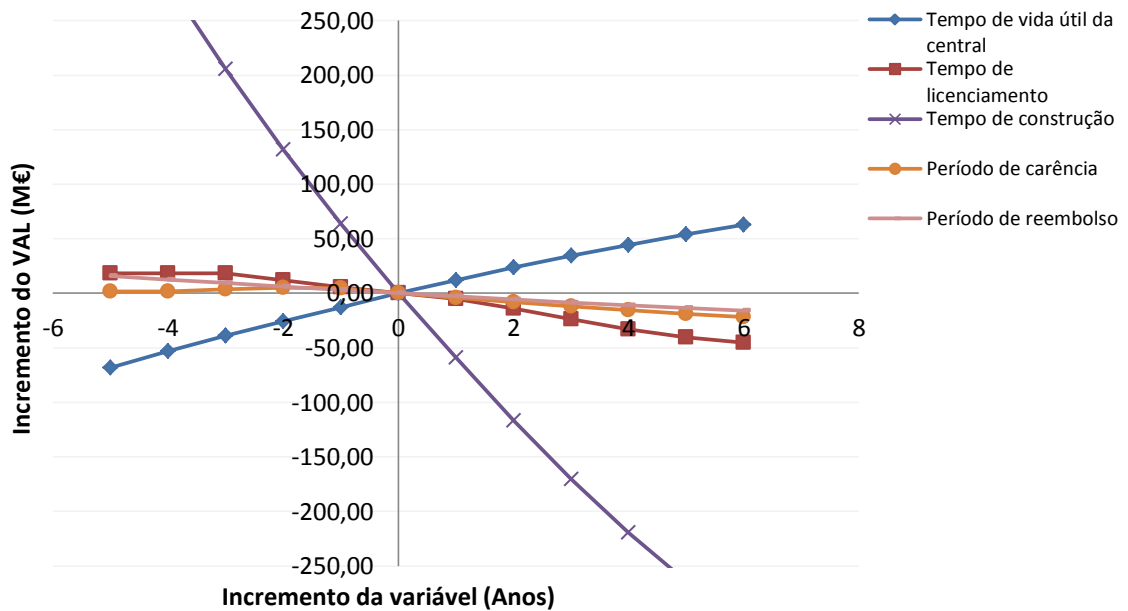


Figura 5.8 - Sensibilidade do VAL em função do incremento de diversas variáveis temporais em torno do cenário pessimista

Capítulo 6

Conclusões

6 Conclusões

Este estudo de viabilidade económica demonstrou que um investimento numa central nuclear para produção de energia eléctrica é economicamente viável no cenário base e optimista, mas só no cenário optimista a central será particularmente competitiva em relação a outras tecnologias de geração de energia eléctrica (custo nivelado de 20,3 €/MWh face ao custo nivelado de 48,9 €/MWh no cenário base, ao de preço de venda no MIBEL de 50 €/MWh e custo nivelado de 116,3 €/MWh no cenário pessimista). Tal como foi referido anteriormente uma das razões para os cenários base e pessimista serem tão poucos competitivos, é os custos fixos (licenciamento, construção e capital) serem bastante elevados. É de salientar que a única fonte de receita deste tipo de investimento é a energia produzida, que depende da potência da central. O facto de não se poder variar a potência dependendo da procura torna ainda mais o investimento bastante arriscado. Para garantir o escoamento da energia produzida ou o país terá um consumo elevado mesmo nas horas de vazio nos próximos anos que justifique a construção de uma central nuclear, ou realizar-se-ão contratos bilaterais com indústrias que garantam a venda da energia produzida de forma a viabilizar o investimento, ou então a capacidade de interligação entre Portugal e Espanha será suficiente para escoar essa produção nas horas em que o consumo português seja demasiado baixo.

O desmantelamento da central e o tratamento dos resíduos, que implicam um custo associado representam também um encargo elevado que poderá contribuir para o insucesso deste investimento. Durante o tempo de funcionamento da central, é depositada uma percentagem das receitas num fundo de desmantelamento para este fim, no entanto existe um elevado risco associado a este acto, porque a central pode, por várias razões, não atingir o tempo limite de funcionamento (de acordo com alguns exemplos aqui demonstrados) que garanta fundos suficientes para se proceder ao desmantelamento e eventual tratamento dos resíduos.

O recente acidente que ocorreu na central nuclear de Fukushima relançou o debate sobre a segurança nas centrais em diversos países, como é o caso da Alemanha e Espanha, este último decidiu com a ajuda da CSN, avaliar os

riscos e resistência das centrais em caso de sismos ou catástrofes naturais. Algumas propostas mostraram que a opção pela energia nuclear é uma alternativa não só para resolver os problemas da dependência dos combustíveis fósseis mas também para tornar o país mais competitivo em termos energéticos. A escalada recente do preço do petróleo e gás natural, associada à instabilidade crescente no Médio Oriente e à procura crescente e continuada de energia por parte das economias emergentes, parece favorecer ainda mais a energia nuclear como uma peça chave no “xadrez” energético do século XXI. Mas como contrapeso existem quatro problemas chaves que afastam a energia nuclear de toda esta equação, os riscos e as consequências de acidente, os resíduos radioactivos para os quais continua a não haver solução, a segurança face a atentados que foi identificado nos Estados Unidos como um alvo preferencial para acções terroristas e por último algo fundamental que são os custos de investimento e o tempo associado a construção de uma central nuclear.

Em suma, com energia nuclear ou não o desafio de Portugal passa por baixar a factura e a dependência energética.

Bibliografia

Bibliografia

- [1] D. Bodansky, Nuclear Energy Principles, Practices, and Prospects, 2004.
- [2] “RTP,” 16 Junho 2008. [Online]. Available: <http://ww1.rtp.pt/noticias/index.php?t=Relancado-debate-sobre-energia-nuclear-em-Portugal.rtp&article=96223&visual=3&layout=10&tm=6>. [Acedido em Novembro 2011].
- [3] “RTP,” 05 Agosto 2011. [Online]. Available: <http://www.rtp.pt/noticias/index.php?article=467573&tm=6&layout=122&visual=61>. [Acedido em Novembro 2011].
- [4] C. Granjeiro, “Física fundamental,” 05 Maio 2006. [Online]. Available: http://nuclear.com.sapo.pt/index_ficheiros/Page1216.htm. [Acedido em junho 2011].
- [5] “energia Nuclear,” [Online]. Available: <http://energia-nuclear.net/>. [Acedido em 14 06 2012].
- [6] L. P. S. Alfonso de la Torre Fernández del Pozo, Cuestiones Sobre La Energía, Madrid: Edición Enero, 2007.
- [7] R. Chang, Química, Amadora: Mc Graw - Hill, 1994.
- [8] G. iPED, “Fissão nuclear - Radiactividade,” 2001 . [Online]. Available: <http://www.colegioweb.com.br/quimica/fissao-nuclear.html>. [Acedido em 24 01 2012].
- [9] w. N. Association, “Some Physics of Uranium: Education: world Nuclear Association,” 09 2010. [Online]. Available: <http://www.world-nuclear.org/education/phys.htm>. [Acedido em 11 06 2012].
- [10] I. PRIS, “Power Reactor Information System,” [Online]. Available: <http://www.iaea.org/programmes/a2/>. [Acedido em 2011].
- [11] I. E. Agency, “Key World Energy STATISTICS 2011,” 2011. [Online]. Available: http://www.iea.org/textbase/nppdf/free/2011/key_world_energy_stats.pdf. [Acedido em 13 03 2012].
- [12] F. Nuclear, “Análisis económico de un proyecto de ampliación de la producción eléctrica nuclear en espanã,” 2008. [Online]. Available:

- <http://www.foronuclear.org/es/publicaciones-y-documentacion/publicaciones/analisis-economico-de-un-proyecto-de-ampliacion-de-la-produccion-electrica-nuclear-en-espana>. [Acedido em 03 2011].
- [13] Pordata, “Pordata - Produção primária de energia: por tipo de produto energético (%) - Europa,” 2009. [Online]. Available: <http://www.pordata.pt/Europa/Producao+primaria+de+energia+por+tipo+d+e+produto+energetico+%28percentagem%29-1730>. [Acedido em 19 12 2011].
- [14] w. C. Patterson, A Energia Nuclear, Dom Quixote, 1979.
- [15] I. d. E. p. o. Desenvolvimento, “Instituto de Estudos para o Desenvolvimento,” [Online]. Available: <http://www.ied-pt.org/pt/>. [Acedido em 09 2011].
- [16] W. N. Association, “Nuclear Power Economics Nuclear Energy Costs,” 12 2011. [Online]. Available: <http://www.world-nuclear.org/info/inf02.html>. [Acedido em 11 02 2012].
- [17] D. d. Notícias, “Indústria defende energia nuclear e quer repartir custos por todos,” 17 03 2005. [Online]. Available: http://www.dn.pt/inicio/interior.aspx?content_id=612749. [Acedido em 11 02 2012].
- [18] D. -. D. G. d. E. e. Geologia, “DGEG - Direcção Geral de Energia e Geologia,” 2010. [Online]. Available: <http://www.dgge.pt/>. [Acedido em 10 02 2012].
- [19] P. R. Pestana, Interviewee, [Entrevista]. 06 2012.
- [20] L. -. L. N. d. E. e. Geologia, “Portugal - Indústria Extractiva,” [Online]. Available: http://e-geo.ineti.pt/edicoes_online/diversos/ind_extractiva/parte2.htm. [Acedido em 15 06 2012].
- [21] F. Nuclear, “El Uranio. Reservas y suministro a las centrales nucleares,” 2011. [Online]. Available: <http://www.foronuclear.org/es/publicaciones-y-documentacion/publicaciones/uranio-reservas-y-suministro-a-las-centrales>. [Acedido em 23 01 2012].

- [22] A. Brasil, “Energia: Existe urânio para mais de um século, afirma AIEA e OCDE,” 13 06 2006. [Online]. Available: <http://noticias.ambientebrasil.com.br/clipping/2006/06/13/25153-energia-existe-uranio-para-mais-de-um-seculo-afirma-aiea-e-ocde.html>. [Acedido em 15 06 2012].
- [23] R. -. R. E. Nacionais, “REN Dados Técnicos 2011,” 2011. [Online]. Available: <http://www.centrodeinformacao.ren.pt/PT/InformacaoTecnica/DadosTecnicos/REN%20Dados%20T%C3%A9cnicos%202011.pdf>. [Acedido em 17 02 2012].
- [24] “Fusão e Fissão Nuclear,” Escola Secundária Professor José Augusto Lucas, 31 01 2011. [Online]. Available: http://energiafuturo.blogspot.com/2011_01_01_archive.html. [Acedido em 23 01 2012].
- [25] E. ISEL, *Folhas de apoio, Disciplina Mercados de Energia*.
- [26] U. S. n. R. Commission, “NRC: Uranium Enrichment,” 07 04 2011. [Online]. Available: <http://www.nrc.gov/materials/fuel-cycle-fac/ur-enrichment.html>. [Acedido em 25 01 2012].
- [27] “The Reason Behind the Fog at Fukushima Daiichi Nuclear Reactors,” 15 08 2011. [Online]. Available: <http://radioactivechat.blogspot.com/2011/08/reason-behind-fog-at-fukushima-daiichi.html>. [Acedido em 26 01 2012].
- [28] U. S. N. R. Commission, “NRC: Nuclear Fuel Pool Capacity,” 04 03 2011. [Online]. Available: <http://www.nrc.gov/waste/spent-fuel-storage/nuc-fuel-pool.html>. [Acedido em 26 01 2012].
- [29] U. S. N. R. Commission, “NRC: Storage of Spent Nuclear Fuel,” 16 09 2011. [Online]. Available: <http://www.nrc.gov/waste/spent-fuel-storage.html>. [Acedido em 25 01 2012].
- [30] U. N. R. Commission, “NRC: Typical Dry Cask Storage System,” 04 03 2011. [Online]. Available: <http://www.nrc.gov/waste/spent-fuel-storage/diagram-typical-dry-cask-system.html>. [Acedido em 01 01 2012].
- [31] C. -. C. d. S. Nuclear, “Resíduos radioactivos,” [Online]. Available:

- http://www.csn.es/index.php?option=com_content&view=article&id=10888&Itemid=287&lang=es. [Acedido em 11 06 2012].
- [32] “what is nuclear? / Nuclear waste,” 2011. [Online]. Available: <http://www.whatisnuclear.com/articles/waste.html#composition>. [Acedido em 01 02 2012].
- [33] E. IBERDROLA, “ANAV,” 2008. [Online]. Available: 213.27.212.87/anav/index.php?option=com_k2&view=item&task=download&id=120&Itemid=63&lang=es. [Acedido em 01 02 2012].
- [34] F. Nuclear, “Manual de tecnología nuclear para periodistas,” 2011. [Online]. Available: <http://www.foronuclear.org/es/publicaciones-y-documentacion/publicaciones/manual-de-tecnologia-nuclear-para-periodistas>. [Acedido em 01 02 2012].
- [35] I. PRIS, “Power reactor information system,” 2012 02 01. [Online]. Available: <http://www.iaea.org/programmes/a2/>. [Acedido em 01 02 2012].
- [36] W. N. Association, “Nuclear Reactor, Nuclear Power Plant, Nuclear Reactor Technology,” 03 2011. [Online]. Available: <http://www.world-nuclear.org/info/inf32.html>. [Acedido em 01 02 2012].
- [37] Admin, “Electrical Engineering Tutorials: Classification of Nuclear Reactors,” 30 04 2007. [Online]. Available: <http://www.powerelectricalblog.com/2007/04/classification-of-nuclear-reactors.html>. [Acedido em 14 06 2012].
- [38] E. P. Ferreira, *Folhas de apoio a disciplina de Energia Nuclear. Tipos de reactores nucleares*, 2011.
- [39] C. -. C. N. d. Energía, “CNE - Comisión Nacional de Energía,” [Online]. Available: <http://www.cne.es/cne/Home>. [Acedido em 02 02 2012].
- [40] S. G. e. A. Sesonske, *Nuclear Reactor Engineering*, Chapman e Hall, 1994.
- [41] J. J. D. L. J. Hmlton, *Nuclear Reactor Analysis*, 1976.
- [42] J. W. L. S. Tong, *Thermal Analysis of Pressurized Water Reactor*, 1996.
- [43] D. Mosey, *Reactor Accident*, 1990.
- [44] Chemicool, “Zirconium,” [Online]. Available:

- <http://www.chemicool.com/elements/zirconium.html>. [Acedido em 17 06 2012].
- [45] L. J. H. James J. Duderstadt, Nuclear Reactor Analysis, 1976.
- [46] D. Welle, "Lithuania shuts down last reactor," 31 12 2009. [Online]. Available: <http://www.dw-world.de/dw/article/0,,5074094,00.html>. [Acedido em 01 02 2012].
- [47] E. -. I. N. a. f. n. technologies, "Technology information from ENEA," 02 01 2009. [Online]. Available: www.enea.it. [Acedido em 03 2011].
- [48] "22 anos do acidente em Chernobyl Ecourbana," 28 04 2008. [Online]. Available: <http://ecourbana.wordpress.com/2008/04/28/22-anos-do-acidente-em-chenobyl/>. [Acedido em 14 06 2012].
- [49] w. N. Association, "Chernobyl Accident," 09 2011. [Online]. Available: <http://www.world-nuclear.org/info/chernobyl/inf07.html>. [Acedido em 14 02 2012].
- [50] I. -. I. A. E. Agency, "Frequently Asked Chernobyl Questions," [Online]. Available: <http://www.iaea.org/newscenter/features/chernobyl-15/chno-faq.shtml>. [Acedido em 14 02 2012].
- [51] KyivPost, "Kyiv Post. Independence. Community. Trust - Ukraine - Chernobyl nuclear plant to be decommissioned completely by 2013," 27 04 2010. [Online]. Available: <http://www.kyivpost.com/news/nation/detail/65096/>. [Acedido em 14 06 2012].
- [52] "Planeta Douglas: Antes de Fukushima e Chernobil, Aconteceu em Three Mile Island," 18 03 2011. [Online]. Available: <http://palavrasescritasdfs.blogspot.pt/2011/03/antes-de-fukushima-e-chernobyl.html>. [Acedido em 14 06 2012].
- [53] W. N. Association, "Three Mile Island TMI 2 Three Mile Island Accident," 01 2012. [Online]. Available: <http://www.world-nuclear.org/info/inf36.html>. [Acedido em 14 06 2012].
- [54] " What Happened and What Didn't in the TMI-2 Accident," [Online]. Available: <http://www.ans.org/pi/resources/sptopics/tmi/whathappened.html>.

- [Acedido em 14 06 2012].
- [55] U.S.NRC, "NRC: Three Mile Island - Unid 2," 29 03 2012. [Online]. Available: <http://www.nrc.gov/info-finder/decommissioning/power-reactor/three-mile-island-unit-2.html>. [Acedido em 14 06 2012].
- [56] "Nuclear Reactor Maps: Fukushima-Daiichi," [Online]. Available: http://nuctrans.org/Nuc_Trans/locations/daiichi/daiichi.htm. [Acedido em 14 06 2012].
- [57] W. N. Association, "Nuclear Power in Japan," 06 2012. [Online]. Available: <http://www.world-nuclear.org/info/inf79.html>. [Acedido em 15 06 2012].
- [58] S. Notícias, "Falar Global - Fala Futuro 1.0 Sic Notícias," 24 04 2011. [Online]. Available: <http://www.falarglobal.com/final/falarglobal.htm?term=fukushima>. [Acedido em 15 06 2012].
- [59] E. Universal, "Francia sube a 6 nivel de alerta por accidente nuclear em japón - Internacional - IL UNIVERSAL," 15 03 2011. [Online]. Available: <http://www.eluniversal.com/2011/03/15/francia-sube-a-6-nivel-de-alerta-por-accidente-nuclear-en-japon.shtml>. [Acedido em 15 06 2012].
- [60] Globo, "Jornal Nacional - Acidente em Fukushima atinge nível máximo de gravidade," 11 04 2011. [Online]. Available: <http://g1.globo.com/jornal-nacional/noticia/2011/04/acidente-em-fukushima-atinge-nivel-maximo-de-gravidade-afirma-agencia-de-noticia.html>. [Acedido em 15 06 2012].
- [61] E. País, "Merkel suspende el plan para alargar la vida de las centrales nucleares en Alemania," 14 03 2011. [Online]. Available: http://internacional.elpais.com/internacional/2011/03/14/actualidad/1300057211_850215.html. [Acedido em 15 06 2012].
- [62] Boomer, "Tepco Plants to Dismantle Fukushima Reactors Within 40 Years," 21 12 2011. [Online]. Available: <http://www.bloomberg.com/news/2011-12-21/tepco-sets-plans-to-dismantle-fukushima-reactors.html>. [Acedido em 15 06 2012].
- [63] I. N. e. Apredendo, "Escala Internacional de Accidentes Nucleares," 17 06 2011. [Online]. Available:

<http://www.infoescola.com/radioatividade/escala-internacional-de-acidentes-nucleares/>. [Acedido em 02 02 2012].

- [64] “Entenda a Escala Internacional de Acidente Nuclear,” 17 03 2011. [Online]. Available: <http://noticiasacontecimentos.com/2011/03/17/entenda-a-escala-internacional-de-acidente-nuclear/>. [Acedido em 14 02 2012].
- [65] “European website on Decommissioning of Nuclear Installations,” 19 10 2005. [Online]. Available: <http://www.eu-decom.be/about/initabout.htm>. [Acedido em 15 06 2012].
- [66] W. N. Association, “Nuclear Decommissioning: Decommission nuclear facilities,” 04 2012. [Online]. Available: <http://www.world-nuclear.org/info/inf19.html>. [Acedido em 15 06 2012].
- [67] Nuclearinfo, “Nuclear Power Education - Cost of Nuclear Power,” 27 07 2010. [Online]. Available: <http://nuclearinfo.net/Nuclearpower/WebHomeCostOfNuclearPower>. [Acedido em 12 02 2012].
- [68] R. Brasil, “Finlândia planeia 1ª central nuclear após o acidente de Fukushima,” 5 10 2011. [Online]. Available: <http://br.reuters.com/article/worldNews/idBRSPE79406J20111005>. [Acedido em 12 02 2012].
- [69] P. L. De, “Costs of decommissioning nuclear power plants,” 1988.
- [70] Greenpeace, “The economics of nuclear power,” 2007.
- [71] OMIE, “Resultados Mercado.swf,” 03 01 2012. [Online]. Available: <http://www.omel.es/files/flash/ResultadosMercado.swf>. [Acedido em 16 07 2012].
- [72] S. T. a. R. S. Dr. Christoph Richter, “Concentrating Solar Power Global Outlook 09 - Why Renewable Energy is Hot,” Greenpeace International, Amsterdam, 2009.
- [73] U. S. N. Commission, “NRC: Fuel Fabrication,” 31 03 2011. [Online]. Available: <http://www.nrc.gov/materials/fuel-cycle-fac/fuel-fab.html#light>. [Acedido em 25 01 2012].

Anexos

Tabela A.3 - Cenário otimista (M€) (2/2)

Mapa de Investimento

Anos	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65
Custos de Licenciamento	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Custos de Construção	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Capital Próprio	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Capital Alheio	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Mapa de Financiamento

Anos	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65
Empréstimo Licenciamento	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Empréstimo Construção	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Capital em Dívida	254,23	208,22	159,91	109,19	55,92	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Anuidade	58,72	58,72	58,72	58,72	58,72	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Reembolsos	46,01	48,31	50,73	53,26	55,92	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Juros	12,71	10,41	8,00	5,46	2,80	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Mapa de Exploração

Anos	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65
Receita Bruta	416,10	416,10	416,10	416,10	416,10	416,10	416,10	416,10	416,10	416,10	416,10	416,10	416,10	416,10	416,10
Custos de Operação	-94,45	-94,45	-94,45	-94,45	-94,45	-94,45	-94,45	-94,45	-94,45	-94,45	-94,45	-94,45	-94,45	-94,45	-94,45
Custo de Desmantelamento	-6,67	-6,67	-6,67	-6,67	-6,67	-6,67	-6,67	-6,67	-6,67	-6,67	-6,67	-6,67	-6,67	-6,67	0,00
Seguros	-1,75	-1,75	-1,75	-1,75	-1,75	-1,75	-1,75	-1,75	-1,75	-1,75	-1,75	-1,75	-1,75	-1,75	-1,75
Resultados antes juros e impostos	313,23	313,23	313,23	313,23	313,23	313,23	313,23	313,23	313,23	313,23	313,23	313,23	313,23	313,23	319,90
Juros	-12,71	-10,41	-8,00	-5,46	-2,80	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Resultado Líquido	300,52	302,82	305,24	307,77	310,44	313,23	313,23	313,23	313,23	313,23	313,23	313,23	313,23	313,23	319,90

Mapa de Cash-Flow

Anos	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65
Investimento	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Reembolsos	-46,01	-48,31	-50,73	-53,26	-55,92	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Resultado Líquido	300,52	302,82	305,24	307,77	310,44	313,23	313,23	313,23	313,23	313,23	313,23	313,23	313,23	313,23	319,90
Cashflow	254,51	254,51	254,51	254,51	254,51	313,23	313,23	313,23	313,23	313,23	313,23	313,23	313,23	313,23	319,90
Cashflow actualizado	13,03	12,30	11,60	10,94	10,32	11,99	11,31	10,67	10,07	9,50	8,96	8,45	7,97	7,52	7,25
Cashflow act. acumulado	2848,68	2860,97	2872,57	2883,52	2893,84	2905,83	2917,14	2927,81	2937,87	2947,37	2956,33	2964,78	2972,75	2980,27	2987,52