

BR8306750
21.07.82

INIS-mf--7821

~~E. MARQUES~~



COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR

VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA DA
PRODUÇÃO DE RADIOISÓTOPOS NO BRASIL

DPC-1.1, OUT 81

C N E N	DOCUMENTAÇÃO DE PROJETO (DOP)	NÚMERO	FOLHA
		ORGÃO	0 DE 23 DATA 10 / 10 / 81

DISTRIBUIÇÃO	CANCELA	CÓPIA	ARQUIVO
--------------	---------	-------	---------

TÍTULO

VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA DA PRODUÇÃO DE RADIOISÓTOPOS NO BRASIL

AUTOR (ES)

OSMÁRIO VIEIRA LIMA

SUMÁRIO

O ~~objetivo deste trabalho é analisar~~ ^{Análise} a viabilidade técnica e econômica da produção de radioisótopos no Brasil através de um reator nuclear de baixa potência que possa também ser utilizado em pesquisas,

Para isto, mostrou-se a importância da aplicação dos radioisótopos e das radiações controladas, nas áreas da medicina, indústria e agronomia, o consumo de radioisótopos no Brasil e avaliações de custos de reatores nucleares para a sua produção.

Na avaliação de custos de um reator para produção de radioisótopos, considerou-se estudos desenvolvidos pelo Departamento de Engenharia Nuclear da Universidade Federal de Minas Gerais - DEN/UFMG, que além de indicarem as possíveis linhas de reatores que melhor se ajustam aos condicionantes brasileiros, apresentam importantes estimativas de seus custos.

A análise de informações justifica a viabilidade técnica e econômica e a necessidade de produção de radioisótopos no Brasil. (autor)

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO	1
2. APLICAÇÃO DE RADIOISÓTOPO E DE RADIAÇÃO CONTROLADA	1
2.1 - Aplicação na medicina	1
2.2 - Aplicação na indústria	4
2.3 - Aplicação na agronomia	6
3. APLICAÇÃO DE RADIOISÓTOPOS NO BRASIL	7
3.1 - Aplicação na medicina	11
3.2 - Aplicação na indústria	13
3.3 - Aplicação na agronomia	13
4. REATOR PARA PESQUISA E PRODUÇÃO DE RADIOISÓTOPOS	15
4.1 - Reator JEEP 2	15
4.2 - Reator R1	17
4.3 - Reator X-10	17
4.4 - Reator a H ₂ O - UO ₂ enriquecido a 3,5%	18
4.5 - Avaliação de custos dos reatores de pesquisa	19
5. CONCLUSÕES	21
6. REFERÊNCIA	23

VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA DA PRODUÇÃO DE RADIOISÓTOPOS NO BRASIL

1. INTRODUÇÃO

O objetivo deste trabalho é analisar a viabilidade técnica e econômica da produção de radioisótopos no Brasil através de um reator nuclear de baixa potência que possa também ser usado em pesquisa.

Atualmente, radioisótopos e radiação controlada vem sendo aplicados cada vez mais no cotidiano de nossas vidas, procurando, por exemplo, melhorar:

- . a produção de alimentos e a sua preservação quando estocada;
- . a localização de lençóis de água;
- . a esterilização de equipamentos médicos;
- . as análises hormonais;
- . o controle de processos industriais;
- . os estudos de poluição ambiental;
- . e uma série de outros processos.

Basicamente, a aplicação de radioisótopos e da radiação controlada vem se estendendo na indústria, agronomia e medicina numa forma necessária, auxiliando o homem a obter melhores condições para a sua vida.

Os radioisótopos utilizados e de interesse comercial enquadram-se em duas classes: aqueles encontrados na natureza (p. ex.: rádio 226) e aqueles produzidos em aceleradores (p. ex.: potássio 43 e o iodo 123) e em reatores nucleares. Nos reatores nucleares, os radioisótopos são produzidos por irradiação deliberada de amostras (p. ex.: cobalto 60 e carbono 14) e decorrentes do processo de fissão (p. ex.: estrôncio 90 e o césio 137).

2. APLICAÇÃO DE RADIOISÓTOPO E DE RADIAÇÃO CONTROLADA.

2.1 - Aplicação na medicina.

Na medicina e na biologia, as aplicações dos radioisótopos são múltiplas e podem ser divididas em dois grandes grupos:

- a) como fontes de irradiação - o material biológico recebe apenas a radiação emitida pelo radioisótopo usado; e
- b) como traçadores - o radioisótopo é incorporado ao meio biológico que se deseja estudar.

Alguns radioisótopos utilizados na medicina e os tipos de rejeitos são mostrados na tabela 1.

Como fontes de irradiação, os radioisótopos são aplicados na radioterapia, constituindo até recentemente o uso mais extenso na medicina, em esterilização de instrumentos médicos, na radiobiologia fundamental, etc., sem que haja a sua interação como o meio biológico. São os casos em que são aplicados a distância ou são introduzidos no meio biológico mas perfeitamente envolvidos por uma blindagem ou numa condição química que não permita troca.

Como traçadores radioativos, os radioisótopos são aplicados na terapia e nos diagnósticos "in vivo" e "in vitro". O processo consiste em introduzir um radioisótopo previamente escolhido no meio biológico que se pretende estudar.

Os critérios de escolha de um radioisótopo são baseados na probabilidade de desaparecimento do mesmo seja por desintegração, seja por eliminação; na minimização da dose de radiação absorvida pelo paciente; e na sua eletividade pelo meio biológico a estudar.

Na terapia, os traçadores radioativos são pouco aplicados tendo em vista da maioria dos agentes terapêuticos não apresentarem bastante eletividade com a área que se deseja a sua ação curadora. Essa eletividade está associada a sua medida de tratamento e relativamente, ao número de efeitos colaterais indesejáveis. No diagnóstico os traçadores radioativos são essenciais.

Os diagnósticos "in vitro" são efetuados através das técnicas de radioimunissaiu ou processos correlatos que podem ser aplicados para medidas de hormônios, enzimas, virus de hepatite, certos soros proteínicos, algumas drogas e outras substâncias.

TABELA 1: Radionuclídeos utilizados na clínica e os tipos de rejeitos.

RADIONUCLÍDEO	PERÍODO	USO PARCIAL	QUANTIDADE MÉDIA USADA POR PACIENTE	ELIMINAÇÃO FISIOLÓGICA E TIPOS DE REJEITOS
Cr 51	27,8 d	fins clínicos	10 a 200 μ Ci	eliminado lentamente
Co 57	270 d	fins clínicos	0,5 a 1,0 μ Ci	eliminado lentamente
Co 60	5,27 a	fins clínicos	0,5 a 1,0 μ Ci	eliminado lentamente
Au 198	2,7 d	diagnóstico terapia	250 μ Ci até 150 mCi	em grande parte retido pelo organismo em grande parte retido no organismo
I 125	60 d	diagnóstico	1 a 50 μ Ci	cerca de 75% são eliminados na urina
I 131	8,04 d	diagnóstico terapia	1 a 50 μ Ci até 200 mCi	cerca de 75% são eliminados na urina cerca de 75% são eliminados na urina
Hg 187	65 b	diagnóstico	até 1 mCi	eliminado parcialmente
Hg 203	47 d	diagnóstico	até 250 μ Ci	eliminado parcialmente
P 32	14,2 d	diagnóstico terapia	até 300 mCi até 10 mCi	em grande parte eliminado pela urina em grande parte eliminado pela urina
Sr 85	65 d	diagnóstico	10 a 100 μ Ci	em grande parte eliminado pela urina e fezes
Yt 87	3,3 d			gerador utilizado
Sr 87m	2,8 h	diagnóstico	até 3 mCi	eliminado lentamente
Fe 59	45 d	diagnóstico	10 a 100 μ Ci	eliminado lentamente
Se 75	120 d	diagnóstico	250 μ Ci	eliminado lentamente
Mo 99	2,6 d			gerador utilizado
Tc 99m	6h	diagnóstico	até 15 mCi	em grande parte eliminado pela urina
Sn 133	115 d			gerador utilizado
In 113m	1,66h	diagnóstico	até 10 mCi	gerador utilizado
C 14	5.760 a	pesquisas	10 μ Ci	vários, conforme a experiência
H 3	12,26 a	pesquisas indicadores biológicos	variável	grande parte passa nos efluentes líquidos
Xe 113	5,27 d	diagnóstico	até 10 mCi	eliminado pela expiração

Fonte: Referência /11/.

No diagnóstico "in vivo", algumas drogas radicativas tem sido usadas a mais de 20 anos como é o caso dos conhecidos compostos do iodo, os quais são muito aplicados no estudo da tiróide, pulmão, fígado, rim, e da circulação e volume do sangue.

2.2 - Aplicação na indústria.

Os radioisótopos e a radiação controlada vem solucionando problemas e proporcionando grandes facilidades à indústria. Atualmente, está comprovada a viabilidade técnica e econômica do uso de tais recursos em quase todos os ramos da indústria. Os radioisótopos, por possuírem propriedades químicas essencialmente idênticas as dos seus isótopos não radioativos, podem ser usados como "rotuladores" de elementos químicos, permitindo que um determinado elemento em questão ou o composto químico que o contenha, possa ser acompanhado ou traçado ao longo de uma série de transformações químicas ou físicas.

Os radioisótopos como traçadores são usados amplamente em indústrias, tais como:

Indústria química.

Prospecção e extração de petróleo.

Indústria de celulose.

Siderurgia.

Indústria de materiais fibrosos.

Engenharia sanitária.

Indústria de ligas metálicas.

E outras.

Algumas das aplicações típicas dos traçadores radioativos na indústria são:

- controle e estudo de ventilação:

a) eficiência de filtros;

b) taxa de fluxo;

- eficiência em mistura de:

a) fluídos;

- b) pós;
- c) pastas fluídas (p. ex.: cimento);
- d) gases;
- razão de desgastes em:
 - a) metais;
 - b) borrachas;
 - c) etc.;
- estudos de corrosão em geral;
- determinação de fugas e fissuras em:
 - a) tubulações enterradas;
 - b) cabos pressurizados subterrâneos;
 - c) estações repetidoras submarinas;
 - d) etc.;
- medidas de vazão de:
 - a) líquidos em tubos;
 - b) rios e cursos de água;
 - c) descargas sólidas;
 - d) gases;
 - e) etc.

Como radiação controlada, a propriedade de penetração ou reflexão na matéria vem sendo usada cada vez mais na indústria, em controles quantitativos de massa, densidade e espessura de materiais diversos.

Quanto ao aspecto qualitativo, esta propriedade tem sido usada para medidas externas de níveis, particularmente quando as condições de temperatura e pressão do meio são altas ou quando a substância armazenada é corrosiva.

Além disto, a propriedade de penetração dos raios γ sobre os filmes fotográficos vem substituindo o controle de peças por radiografia; a gamagrafia cada vez mais é usada no controle de peças metálicas acabadas em decorrência das vantagens que oferece com respeito à aparelhagem condensada, mais robusta, mais barata e independente de corrente elétrica.

2.3 - Aplicação na agronomia.

Os radioisótopos e a radiação controlada vem procurando, de várias maneiras, aumentar a produtividade agrícola. No presente, existe no mundo diversos programas de pesquisa visando objetivos, tais como:

- a) Uso eficiente de fertilizantes - recentemente, estimou-se que 50% dos fertilizantes utilizados em todo o mundo podem ser economizados desde que haja melhoria no processo de fertilização, na administração de água e na preparação da terra /3/.

A classificação de fertilizantes com radioisótopos (^{32}P) ou com isótopos estáveis (^{15}N) proporcionam um meio de determinar como os fertilizantes são absorvidos pelas plantas e como se perdem no meio ambiente.

- b) Controle ou eliminação de insetos nocivos - alguns insetos são importantes ao balanço ecológico natural, outros destroem alimentos, ou ainda, são vetores de doenças infecciosas. Estima-se que o mundo perde 10% da sua produção total de alimentos devido ao ataque de insetos /3/.

Atualmente, existe um método biológico de controle de insetos, a técnica de esterilização de insetos (SIT). Essa técnica não polui o meio ambiente, nem tão pouco destrói os insetos benéficos, como ocorre quando se usa inseticidas químicos. Consiste na esterilização de uma grande quantidade de machos através de doses de radiação ionizantes. Os machos esterilizados são portanto liberados a área infectada e a conseqüente união destes machos com fêmeas não produzem progenitos. Portanto, se o processo é repetido, a população de insetos diminui drasticamente.

Além do controle de insetos nocivos, os radioisótopos também são usados em análises de distribuição e na monitoração de movimentos de insetos ecológicos.

- c) Preservação de alimentos durante a estocagem - o problema de preservação de alimentos tem sido analisado desde os primórdios da humanidade. Processos da secagem, defumação, adição de sal, cura de carnes, frutas e vegetais vem sendo usados por milênios. Contudo, nesses processos há perdas na aparência, odor, gosto, textura e nas propriedades nutritivas dos alimentos.

A refrigeração, em grande escala, possibilitou a preservação dos alimentos com suas propriedades naturais por mais tempo, entretanto, especialistas do mundo inteiro estimam que cerca de 25% a 30% dos alimentos produzidos ainda são perdidos no processo de estocagem devido a microrganismos e pragas /3/.

A irradiação dos alimentos, além de não trazer nenhum efeito indesejado ao ser humano, vem contribuindo significativamente para estender a vida de certos alimentos - p. ex.: A vida útil da cebola está em torno de 15 dias enquanto que irradiada se estende para quase 6 meses.

- d) Mutações de plantas - estima-se que as áreas produtoras de alimento de todo o mundo perdem, anualmente, cerca de 10% de suas produções devido a doenças de plantas. Em certos lugares e sobre determinadas condições climáticas, as perdas podem ser muito altas e eventualmente, podem levar a perda total da safra /3/.

A mutação, ou seja: a criação de plantas resistentes as pragas é, evidentemente, o mais eficiente meio de combater essas perdas.

As radiações ionizantes tem contribuído significativamente nesse processo, mudando determinados aspectos genéticos das plantas. O uso de radioisótopos tem produzido os resultados desejados mais rapidamente que o método convencional.

3. APLICAÇÃO DE RADIOISÓTOPOS NO BRASIL.

No Brasil, os radioisótopos são aplicados, basicamente, na medicina, indústria e pesquisa, onde a área médica é a principal consumidora, utilizando em 1980 cerca de 70% do consumo total /1/ (ver figura 1).

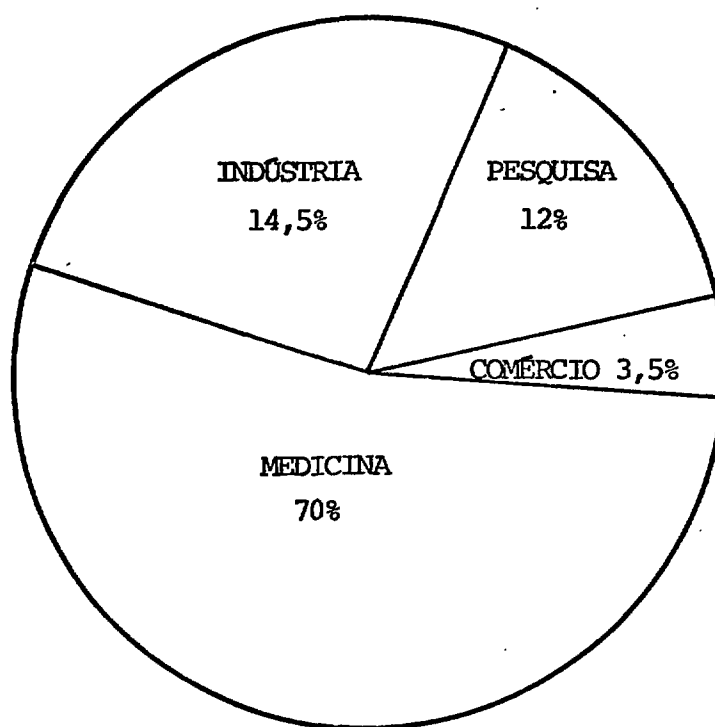


Figura 1: Aplicação de radioisótopos por área:
(% em unidades monetárias).

FONTE: DIN/CNEN /1/.

Quanto à produção de radioisótopos no Brasil, esta é de pequena proporção, sendo toda utilizada em pesquisas. No presente, o mercado é suprido por países como: EUA (principal importador), Canadá, Alemanha, Inglaterra e outros.

A tabela 2 mostra os dispêndios com radioisótopos efetuados pelo Brasil de janeiro a dezembro de 1980 e a tabela 3, os radioisótopos importados e suas atividades utilizadas também neste ano.

TABELA 2: Dispendio brasileiro com radioisótopos em 1980.

MÊS	CR\$	US\$	Fr Fr	Fls	£	DM	Sw Fr
. JAN	3.663.708,75	366.905,29	43.064,45	27.640,00	25.364,00	160,00	
. FEV	5.706.200,00	393.237,25	8.445,00	2.200,00	37.565,00	96.238,00	
. MAR	5.785.820,00	106.816,00	130.435,00	33.000,00	1.770,00	9.680,00	
. ABR	8.803.630,00	280.107,00	4.869,90	38.980,00	4.525,00	33.802,00	
. MAI	11.098.170,00	379.345,65	18.540,00		18.041,00	22.620,00	10.780,00
. JUN	8.082.300,00	133.030,35	416.000,00		8.020,00	10.786,00	4.374,50
. JUL	17.679.720,00	391.492,95		20.800,00	3.457,00	37.866,00	5.814.000,00
. AGOS	9.391.978,00	295.165,00			25.246,80	7.020,00	
. SET	10.382.250,00	276.176,66			5.544,00	12.926,00	
. OUT	12.466.163,00	71.142,70		6.840,00	274,00	45.150,00	
. NOV	7.291.300,00	212.752,50	9.000,00		1.520,00	21.060,00	
. DEZ	5.643.318,00	245.272,00	4.846,62		4.810,00	14.820,00	

Fonte: DIN/CNEN /4/.

TABELA 3: Consumo brasileiro de radioisótopos em 1980 (atividade em mCi)

RADIOISÓTOPO	ATIVIDADE	RADIOISÓTOPOS	ATIVIDADE	RADIOISÓTOPO	ATIVIDADE
Cd 109	1,001	Ra 226	177,705	Ce 141	10,00
Pm 147	1.308,80	Po 210	1.670,01	Sn 113	0,001
In 113	1.500,00	Rb 86	12,00	I 131	32,00
Sr 90	845,10003	Tc 99	1.066.005,00	Fe 59	12,25
Co 60	134.830.670,01	Co 57	106,5949	Co 58	0,0064
Hg 203	120,00	P 32	102,751	Cs 137	41.178,93
Ga 67	1.023,00	Tl 201	2.313,00	C 14	17,701
H 3	15.213,437	I 125	3.169,46535	S 35	548,001
Pu 238	30,00	Na 22	2,102	Kr 85	12.300,00
Mo 99	2.100,00	Ir 192	22.706.585,55	Th 232	15,3797
Am 241	156.606,992	Ru 103	1,00	Sc 46	1,00
Sc 75	2,00	Ca 45	27,00	Bi 207	0,001
Am/Be	1.740,00	Fe 55	120,00	Mu 54	0,001
Cr 51	467,75	Ba 133	0,001	Ni 63	0,005
SUB-TOTAL	135.011.628,9903	SUB-TOTAL	23.780.292,17925	SUB-TOTAL	54.115,2761
				TOTAL	158.846.036,44565

Fonte: DIN/CNEN /4/.

3.1 - Aplicação na medicina

Em todo o mundo, a medicina nuclear é uma especialidade oficialmente reconhecida. No Brasil, o órgão que licencia as pessoas que praticam esta especialidade é a Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), que está ligada ao Colégio Brasileiro de Radiologia - este subordinado a Associação Médica Brasileira - para especializar, coordenar, regular e incentivar o uso de radioisótopos tanto no diagnóstico (in vivo e in vitro) quanto na terapia /5/.

Em fins de 1980, a CNEN tinha em seus arquivos 1341 entidades usuárias de radiação ionizante licenciadas na área médica, distribuídas em todo o país /1/ (ver tabela 4).

Quanto ao seu consumo, o maior dispêndio de divisas com radioisótopos em 1980, foi destinado a área médica (ver figura 1). Como ilustração, a tabela 5 apresenta os gastos efetuados com apenas os radiofármacos marcados com o Iodo 125 - principal radioisótopo aplicado na área médica, o que representou em atividade apenas 3.169 mCi (ver tabela 3).

Além do maior consumo de radioisótopos, a área médica vem apresentando também as maiores taxas de crescimento para este consumo. Este alto crescimento está associado a certos aspectos antes inatingíveis como é o caso de certos exames hormonais e enzimáticos. Uma característica única dos radioisótopos é que eles podem ser usados facilmente em pequenas quantidades.

TABELA 4 - Distribuição geográfica das entidades usuárias de radiação ionizante cadastradas na área de medicina.

LOCALIZAÇÃO		ATIVIDADES		TELETE- RÁPIA	RAIO-X DIAG.	TOTAL
		IN VIVO	IN VITRO			
N O R T E	AMAZONAS	2	4	5	-	11
	AMAPÁ	-	-	1	-	1
	RORAIMA	-	-	-	-	-
	PARÁ	2	3	3	2	10
TOTAL		4	7	9	2	22
N O R D E S T E	MARANHÃO	1	2	1	-	4
	PIAUI	1	2	1	1	5
	CEARÁ	3	13	5	0	21
	R.G. NORTE	3	5	1	1	10
	PARAIBA	2	5	3	-	10
	PERNAMBUCO	2	13	5	10	30
	ALAGOAS	1	3	4	2	10
	SERGIPE	1	8	1	-	10
BAHIA	6	20	4	5	35	
TOTAL		20	71	25	19	135
S U L	PARANÁ	8	34	12	18	72
	SANTA CATARINA	4	18	7	3	32
	R.G. SUL	20	53	13	18	104
TOTAL		32	105	32	39	208
S U D E S T E	MINAS GERAIS	12	56	20	41	129
	ESPÍRITO SANTO	5	10	2	3	20
	RIO DE JANEIRO	27	111	38	74	250
	SÃO PAULO	65	229	61	155	510
TOTAL		109	406	121	273	909
C O E N S T R E O	MATO GROSSO	2	10	2	4	18
	GOIÁS	4	15	5	2	26
	DISTRITO FEDERAL	6	11	2	4	23
TOTAL		12	36	9	10	67
TOTAL GERAL		177	625	196	343	1.341

Dados até dezembro/80

Fonte: CNEN /1/.

TABELA 5: Dispêndio com radiofármacos marcados com o Iodo 125 em 1980.

MÊS	CR\$	US\$	Fr Fr
JAN	601.358,75	314.722,74	29.875,00
FEV	2.881.100,00	224.861,00	3.605,00
MAR	1.634.910,00	36.352,00	86.535,00
ABR	3.300.400,00	56.868,00	-
MAI	5.147.800,00	164.812,00	18.540,00
JUN	4.591.950,00	53.018,00	-
JUL	3.974.250,00	112.228,80	-
AGO	3.625.350,00	152.995,00	-
SET	3.410.550,00	165.133,00	-
OUT	3.800.787,00	21.538,60	-
NOV	1.589.550,00	90.744,20	-
DEZ	57.038,00	62.655,00	4.080,00

FONTE: DIN/CNEN /4/.

3.2 - Aplicação na indústria.

Em 1980, distribuídas por todo o país, 271 indústrias tinham licença da CNEN, para o uso de radioisótopos /1/ (ver tabela 6). Na indústria, a CNEN como órgão licenciador atua diretamente fazendo controle dosimétrico, fiscalizando e orientando.

Em termos de consumo industrial, o Iridio 192 é o radioisótopo mais usado seguido pelo Cobalto 60, embora este último possua uma vida de 26 vezes maior que o primeiro (5,272 anos/74 dias). Esta preferência está relacionada à energia de emissão dos raios γ , a qual é importante na gammagrafia. O Cobalto 60 é muito usado como fonte de irradiação nos processos de medição de nível e espessura. O consumo de Iridio 192 no Brasil em 1980 foi de 22.706.585,55 mCi /4/, quase todo consumido pela indústria brasileira, embora este radioisótopo seja também usado na medicina e pesquisa.

3.3 - Aplicação na agronomia.

A aplicação de radioisótopos e da radiação controlada tem

TABELA 6 - Distribuição geográfica das entidades usuárias de radiação ionizante cadastradas na CNEN na área de indústria.

LOCALIZAÇÃO	APLICAÇÕES		TOTAL
	RADIOGRAFIA	MEDIDORES	
RONDÔNIA	-	1	1
PARÁ	-	1	1
AMAPÁ	-	1	1
CEARÁ	1	-	1
PARAÍBA	-	1	1
PERNAMBUCO	2	2	4
SERGIPE	1	-	1
BAHIA	5	12	17
PARANÁ	1	6	7
RIO GRANDE DO SUL	8	3	11
MINAS GERAIS	12	19	31
ESPÍRITO SANTO	-	2	2
RIO DE JANEIRO	35	19	54
SÃO PAULO	67	68	135
MATO GROSSO	-	1	1
GOLÁS	-	1	1
DISTRITO FEDERAL	1	1	2
T O T A L	133	138	271

Dados até dezembro/80

FONTE: CNEN /1/.

solucionado sérios problemas na agricultura. Estas soluções vem sendo adota das já a algum tempo em países desenvolvidos e em certos países em desenvolvimento.

Excetuando-se o caso de pesquisa, no Brasil, ainda não se fez nenhuma aplicação de radioisótopo nesta área embora estes resultados não sejam ignorados. Observe por exemplo que a CNEN em 1980 aplicou cerca de 57,6% dos seus resultados destinados a pesquisa, a aplicação de radioisótopos na agricultura /1/ (ver figura 2).

4. REATOR PARA PESQUISA E PRODUÇÃO DE RADIOISÓTOPOS.

Em 1980, a Comissão Nacional de Energia Nuclear - CNEN firmou convênio com a Fundação Christiano Ottoni - FCO - da Universidade Federal de Minas Gerais UFMG, com o objetivo de obter subsídios para a tomada de decisão quanto ao projeto, construção e instalação de um reator para pesquisa e produção de radioisótopos.

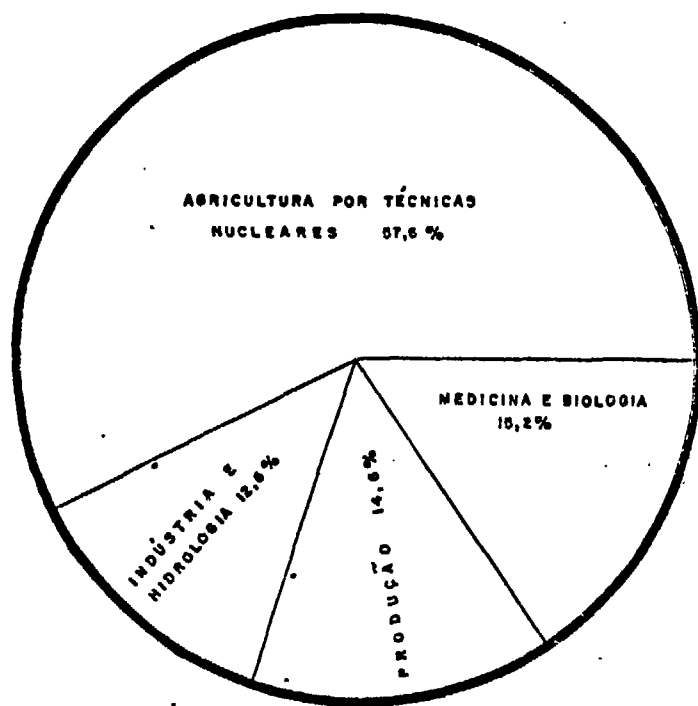
Imposições de que o projeto deve apresentar condições de máxima nacionalização e viabilidade técnica e financeira foram levadas em consideração pelo Departamento de Engenharia Nuclear - DEN/UFMG, ao qual foram atribuídos estudos preliminares (Nota técnica ENRN nº 01/80/6/).

Em 1981, o DEN/UFMG apresentou um relatório parcial /6/ à CNEN, constituído de diversas notas técnicas. Neste relatório, 4 linhas possíveis de reatores foram apresentadas.

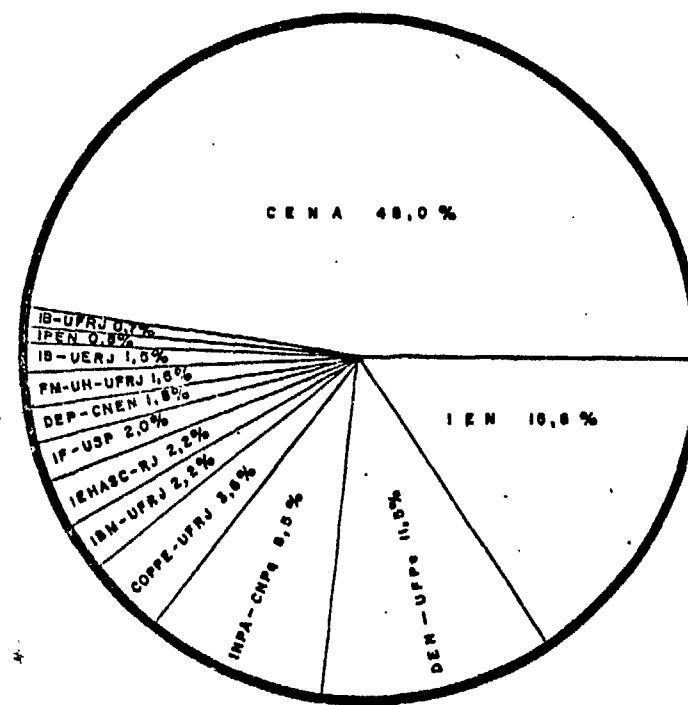
4.1 - Reator JEEP-2 (Joint Establishment Experimental Pile nº 2).

O reator JEEP-2 é do tipo tanque com potência normal de 2MW (térmicos), que possui como combustível o UO_2 enriquecido a 3,5% e como moderador, refletor e refrigerante a água pesada (5 ton. de D_2O ; temp. max. = 50°C). Os fluxos máximos de nêutrons térmicos e rápidos são, respectivamente, $2,7 \times 10^{13}$ n/cm².s e $3,8 \times 10^{13}$ n/cm².s. O seu núcleo possui 55 posições disponíveis para os elementos combustíveis, é de forma cilíndrica com 88,7cm de diâmetro e 90,0cm de altura. Sua massa crítica é de 5,2kg de U-235 e a sua carga do núcleo para a potência nominal é de 6,6kg de U-235. A potência específica média do combustível e a densidade média de potência são, respectivamente, de 9,4 kW/kg UO_2 e 3,6kW/litro. No elemento combustível (varetas cilíndricas com 1,28cm de diâmetro e 90cm de altura), a temperatura máxima

APLICAÇÃO DE RADIOISÓTOPOS



Cr\$ 20.041.000,00



Cr\$ 20.041.000,00

FIGURA 2: Distribuição de recursos por instituição e por área.

FONTE: CNEN /1/.

no seu centro é de 1440°C e no revestimento (alumínio com 0,1cm de espessura) é de 100°C. O reator possui 5 barras de segurança e 1 de regulagem que possibilitam o seu desligamento brusco em cerca de 1,1 seg. Além das barras, o acionamento do refletor superior pode ser usado no controle, segurança e desligamento do reator. O nível de radiação na superfície externa da blindagem é de 0,25mr/hora. Mais informações podem ser vistas na nota técnica ENRN-06/80 /6/.

4.2 - Reator RI.

De propriedade da AB Atomenergy, o reator RI é do tipo tanque com potência nominal de 600 kW (térmicos), usa o urânio natural e é moderado e refrigerado a água pesada (6.600 kg de D₂O; temp. _{max} =40°C). O fluxo máximo de nêutrons térmicos é de $2,2 \times 10^{12}$ n/cm².s e de nêutrons rápidos de $2,2 \times 10^{11}$ n/cm².s. O núcleo é cilíndrico com 185cm de diâmetro e cerca de 233 cm de altura, possui 126 elementos combustíveis e para a potência nominal necessita de cerca de 2500kg de U-natural. A potência média e combustível é de 0,2 kW/kg e a densidade média de potência de 120 kW/m³. A temperatura máxima no elemento combustível é de 76°C e no revestimento (alumínio em liga com 5% de Mg) de 65°C. O reator possui duas barras de controle e segurança que possibilitam o seu desligamento em cerca de 1 seg. Outros meios de controle, segurança e desligamento podem ser efetuados abaixando-se o nível de D₂O por comando normal ou por queda de todo D₂O em 90 seg. A blindagem possibilita, na superfície externa do reator, o nível de radiação abaixo do recomendável. Para maiores informações, ver nota técnica ENRN nº 02/81 /6/.

4.3 - Reator X-10.

O reator X-10, de propriedade da USAEC-Union Carbide Nuclear Company, possui como combustível o urânio natural, moderado a grafita (612.500 kg de grafita incluindo refletor) e refrigerado a ar (temp. máxima estimada igual a 200°C). Sua potência nominal é de 3,5 MW (térmicos). O fluxo máximo de nêutrons térmicos é de $1,1 \times 10^{12}$ n/cm².s e de nêutrons rápidos de $1,0 \times 10^{12}$ n/cm².s. O núcleo ativo é de forma cúbica com aproximadamente 5,5m, possui 1248 canais de combustível, massa crítica de 27400 kg de U-Natural, carga do núcleo na potência de operação de 48000kg de U-natural, potência específica média do combustível de 0,073 kW/kg de U-natural e densidade média de potência de 0,0207 kW/litro. A temperatura máxima no reves

timento do elemento combustível é de 270°C. O reator possui 3 barras de segurança, 2 de controle e 2 de regulagem. Para desligamento rápido, as barras de segurança são introduzidas por queda gravitacional em cerca de 1 seg. e as barras de controle em cerca de 4 seg. operadas hidraulicamente. O nível de radiação na superfície externa do reator é de 1 mr/hora. A nota técnica ENRN nº 03/81 /6/ apresenta mais informações.

4.4 - Reator a H₂O - UO₂ enriquecido a 3,5%.

O DEN/UFMG está desenvolvendo o anteprojeto de um reator a H₂O e UO₂ (3,5%) com a finalidade de avaliar a sua viabilidade técnica e financeira de projeto, construção e instalação.

As razões que o DEN/UFMG citou na nota técnica ENRN nº 04/81 /6/, para considerar esta linha de reator, foram as seguintes:

- a) possibilidade de interação com segmentos do Programa Nuclear Brasileiro;
- b) características neutrônicas e termohidráulicas importantes para um reator de pesquisa;
- c) visibilidade total do reator e facilidade de acesso ao seu núcleo;
- d) perspectivas de custo reduzido e de elevado índice de nacionalização, caso o enriquecimento do UO₂ seja feito pela NUCLEBRÁS.

A idéia do DEN é elevar ao máximo o índice de nacionalização do reator fixando as características deste em consonância com o Programa Nuclear Brasileiro.

Algumas características básicas deste reator são:

O reator é do tipo piscina, com potência nominal de 1 MW térmico, usando UO₂ levemente enriquecido (3,5%), moderado e refrigerado a água leve e tendo como refletor a água leve e grafita de modo a se ter níveis de radiação no seu exterior inferiores a 0,25 mr/hora. Os fluxos médios de nêutrons térmicos e rápidos são de $3,0 \times 10^{12}$ n/cm².s e $1,2 \times 10^{13}$ n/cm².s respectivamente. O núcleo é de forma cilíndrica de 58cm de diâmetro e 53cm de altura ativa, massa crítica: 307 kg de UO₂ (3,5%), carga do núcleo para a potência nominal: 332 kg de UO₂ (3,5%), potência específica média no combustível: 3,26 kW/kg, densidade média de potência no núcleo: 7,14 kW/litro e mo

derador: 110 kg de H_2O à temp. máxima de $40^\circ C$. Os elementos combustíveis são formados por varetas cilíndricas de 1,108cm de diâmetro e 73cm de altura, contendo UO_2 (3,5%) e refletores de grafita de 10cm nas extremidades. O revestimento é feito com alumínio (99,9%) de 0,1cm de espessura. A temperatura máxima no elemento combustível é de $200^\circ C$ e no revestimento de $110^\circ C$. O reator possui 4 barras de segurança e controle grosso e 2 reguladoras que caem por gravidade no caso de desligamento imediato. Para maiores informações ver nota técnica ENRN nº 04/81 /6/.

4.5 - Avaliação de custos dos reatores de pesquisa.

As estimativas de custos (diretos) efetuados pelo DEN/UFMG, para os reatores citados acima, foram formuladas considerando as seguintes parcelas: combustível, moderador, refletor, sistemas de refrigeração (primário e secundário), blindagem, sistema de controle, edificações, equipamentos auxiliares (ponte rolante, sistema de exaustão e de condicionamento de ar da sala do reator, etc...), pessoal (projeto, análise de segurança e estudos de localização e consultoria).

As premissas básicas (custo: U_3O_8 , conversão e enriquecimento, fabricação, grafita, etc...), consideradas na determinação das parcelas mais específicas, foram obtidas baseando-se em preços internacionais moldados aos condicionantes dos projetos e da realidade nacional. As parcelas menos específicas foram determinadas considerando preços médios nacionais (custos: concreto; água leve filtrada, destilada e deionizada; bombas; válvulas e tubulações primárias e secundárias; edificações; etc...).

As estimativas para as quatro linhas de reatores, se encontram na tabela 7. Todas as estimativas foram referenciadas a dezembro/1980.

Com a avaliação de custos dos reatores selecionados, a equipe do DEN/UFMG, responsável pelo projeto, indicou o reator a H_2O e UO_2 (3,5%) como o mais viável para pesquisa e produção de radioisótopos, embora estejam cientes do caráter preliminar das estimativas (ver nota técnica ENRN nº 06/81 /4/). Para a escolha do reator a H_2O e UO_2 (3,5%), as seguintes razões foram mencionadas:

- a) Além de maior índice de nacionalização, apresenta maior viabilidade técnica e econômica para o País.

TABELA 7: Reator de Pesquisa - custos em US\$ 1.000 (1 US\$ - Cr\$ 70).

	UO ₂ (3,5%) - H ₂ O		UNAT-GRAFITA X-10		U. NAT-D ₂ O RI		UO ₂ (3,5%) D ₂ O JEEP	
	1 MW	7,2x10 ¹²	3,5MW	1,1.10 ¹²	0,6MW	2,2.10 ¹²	2MW	2,7.10 ¹³
	QUANT.	CUSTO	QUANT.	CUSTO	QUANT.	CUSTO	QUANT.	CUSTO
. COMBUSTÍVEL	330 kg	370	27 ton.	5.970	2,9 ton.	640	220 kg	252
. MODERADOR	80 ton.	3	612 ton.	3.240	6,6 ton.	1.600	5,0 ton.	1.200
. REFLETOR	1 ton.	5	-	-	50 ton.	265	-	-
. REFRIGERAÇÃO	-	80	-	280	-	50	-	160
. BLINDAGEM	600 m ³	130	1.250 m ³	260	1.000 m ³	210	740 m ³	160
. CONTROLE	-	400	-	400	-	400	-	400
. EDIFICAÇÕES	-	430	-	430	-	430	-	430
. EQUIPAMENTOS AUXILIARES	-	110	-	110	-	110	-	110
. PESSOAL (PROJETO, ANÁLISE, ETC)	-	830	-	830	-	830	-	830
. SUB-TOTAL	-	2.358	-	11.520	-	4.535	-	3.542
. EVENTUAIS 30%	-	707	-	3.456	-	1.360	-	1.060
. TOTAL	-	3.065	-	14.976	-	5.895	-	4.602

OBS.: Os custos de financiamento não estão incluídos.

FONTE: DEN/UFMG /6/.

- b) Mais adequado à pesquisa e produção de radioisótopos, visto ser o seu núcleo mais acessível e de carregamento flexível para irradiação de amostras e de experimentos em física de reatores.
- c) Maior segurança sobre o ponto de vista de probabilidade de contaminação de pessoal ou de equipamento.
- d) Baixo nível de enriquecimento do seu combustível evitando uma forte dependência externa.

5. CONCLUSÕES

A decisão de um País em desenvolvimento de produzir radioisótopos, depende antes de tudo do seu consumo. No Brasil, o consumo de radioisótopos em 1980 foi de aproximadamente 158.850 Ci (mais de 85% foram produzidos em reatores nucleares) e, este consumo pode ser considerado reprimido por falta de oferta e custos altos dos radioisótopos importados: O CENA - Centro de Energia Nuclear na Agricultura, por exemplo, usa em muitas de suas pesquisas, isótopos estáveis como o N 15, por falta de radioisótopos adequados.

Além de possuir um consumo significativo, a viabilidade econômica da produção de radioisótopos é comprovada. Compare, por exemplo, o dispêndio de divisas que ocorreu em 1980 apenas com o I 125 (ver tabela 5), com o investimento do reator a H₂O e UC₂ enriquecido a 3,5% (cerca de U\$ 3.x10⁶ - ver item 4.4). Pode-se concluir, que mais da metade do investimento necessário para construção de um reator no Brasil, foi gasto com a importação de um único radioisótopo.

Quanto ao conhecimento técnico dos processos de obtenção do produto final, sabe-se que um país produtor deve ser capaz de preparar os alvos, efetuar as suas irradiações e separar os radioisótopos desejados para a sua distribuição final. Atualmente o Brasil, já tem uma considerável experiência na produção de radioisótopos e um exemplo desta capacidade é o IPEN - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares. As vantagens inerentes à produção local de radioisótopos são grandes, justificando qualquer esforço necessário, no sentido de implantar um complexo de produção. Algumas vantagens são:

- a) obtenção de radioisótopos em casos de urgência;
- b) possibilidades de aplicação de radioisótopos com meia vida relativamente curta;
- c) facilidades de contato entre o usuário e o produtor;
- d) maior oferta de radioisótopos ao usuário tanto sobre o ponto de vista de tipo quanto de quantidade;
- e) menor probabilidade de perda de qualidade do produto final devido ao transporte (bruscas mudanças de temperatura, transporte por pessoas inadequadas, etc...);
- f) economia de divisas para o país;
- g) desenvolvimento e aprimoramento técnico e científico para a produção de radioisótopos;
- h) maior número de empregos e treinamento de pessoal;
- i) maior estabilidade de preços de radioisótopos para o usuário (o produto importado teve o seu preço em geral dobrado e em certos casos triplicado no último ano); e outros.

Concluindo, além de reforçar a idéia da construção de um reator, lança-se neste trabalho a hipótese de coordenação centralizada de radioisótopos no Brasil tendo em vista a sua importância no bem estar da sociedade e na economia nacional. Como exemplo de sua viabilidade, citamos a África do Sul: A Comissão de Energia Atômica (AEA), órgão licenciador do uso de radioisótopos deste país, decidiu em 1965, beneficiando-se da experiência internacional, por em execução um limitado programa de produção de radioisótopo. Com a experiência adquirida neste programa e em subsequentes, a AEB levou a África do Sul a um nível de independência tecnológica, comparável aos países desenvolvidos, exibindo hoje, na PELINDABA, um sofisticado complexo de produção de radioisótopo /7/.

Outros países, como a Coreia /8/ e Espanha /9/, possuem estruturas semelhantes a da África do Sul, e uma série de benefícios tem sido proporcionados a esses países.

6. REFERENCIA

1. BRASIL. Comissão Nacional de Energia Nuclear. Relatório anual 1980. Rio de Janeiro, CNEN, 1981, 159p.
2. BRASIL. Comissão Nacional de Energia Nuclear. Relatório anual 1979. Rio de Janeiro, CNEN, 1980, 152p.
3. INTERNATIONAL Atomic Energy Agency. Isotopos in day to day life. Vienna, IAEA, 1977. 64p.
4. BRASIL. Comissão Nacional de Energia Nuclear. Relatórios mensais. DIN 2.2 jan/dez. 1980. Rio de Janeiro, CNEN, 1981.
5. ROZENTAL, J.J. Normas, licenciamento de pessoas físicas e jurídicas para uso de radioisótopos e situação no Brasil.
6. BRASIL. Comissão Nacional de Energia Nuclear. Fundação Christiano Ottoni. Estudo preliminar de um reator de pesquisa; Relatório parcial. Belo Horizonte, FCO, 1981.
7. ATOMIC Energy Board. Twenty-fourty annual report 1980. Pelindaba, 1981.
8. KOREA. Ministry of Science and Technology. Atomic energy activities in Korea, 1981. Korea, MST, 1981, 47p.
9. RODRIGUEZ, G. D. Isótopos. In: Energia nuclear 20 (103), sept./oct. 1976 p.: 407/419.
10. QUADRADO. A.A. Isótopos radioativos na tecnologia e na indústria. Rio de Janeiro. IME, 1962. 126p.
11. ROCHA, A.F.G.da. Medicina nuclear, Rio de Janeiro, Guanabara Koogan, 1976. 473p.
12. USAEC. Energia nuclear: sua aplicação na indústria. Rio de Janeiro, Lidador, 1975, 105p.