

SECÇÃO 2 — CENTRAIS TÉRMICAS: EQUIPAMENTO, EXPLORA- ÇÃO, CUSTOS (BASES ACTUAIS E TENDÊNCIAS)

ESTRUTURA DO CUSTO DO COMBUSTÍVEL NUCLEAR. CUSTOS DIRECTOS

1. A incidência do combustível no custo de produção da energia termoelétrica é bastante diferente no caso dos combustíveis fósseis e nucleares; como ordens de grandeza, 45 a 60% e 15 a 30%, respectivamente.

2. A menor incidência do combustível nuclear deriva paradoxalmente de um ciclo de utilização mais demorado e mais complicado que o dos combustíveis fósseis, mas que torna possível obter um valor energético específico extremamente elevado, 66 000 a 125 000 kWh/kg de urânio em comparação com 2,4 a 4,2 kWh/kg de combustível fóssil.

3. O custo do combustível nuclear tem dois aspectos fundamentalmente distintos: um decorrente dos encargos correspondentes às operações sofridas durante o ciclo de utilização, que se sumariza no Quadro I, e outro correspondente aos encargos resultantes da imobilização prolongada do combustível e ao desfasamento entre as despesas e as receitas. Sistematizando, chamaremos aos primeiros custos directos e aos segundos encargos financeiros.

4. Os custos directos são função dos custos das matérias-primas, dos processos tecnológicos, dos serviços utilizados e dos créditos provenientes da venda do plutónio produzido e do urânio não consumido. A incidência destes custos directos no custo de produção é função da taxa de queima a que é possível levar o combustível e do rendimento termodinâmico global da central.

5. Os encargos financeiros são função do contexto económico em que se processa o ciclo de utilização, da elasticidade das indústrias intervenientes nesse mesmo ciclo, da utilização que a central tiver durante a sua vida e do ritmo próprio do consumo de combustível do reactor. A sua incidência no custo do combustível é formalmente idêntica à de um capital investido.

6. O objectivo desta comunicação, é apenas o de dar uma ideia, para as aplicações mais características, do valor e conteúdo das diferentes parcelas que compõem os custos directos e da sua incidência no custo do combustível. Para isso utilizaremos a expressão:

$$P_i = C_i / 24.r.B \text{ $/kWh}$$

QUADRO I

CICLO DE UTILIZAÇÃO DO COMBUSTÍVEL NUCLEAR

Urânio metal	Óxido de urânio	
Natural	Enriquecido	
Extracção Transporte de minérios Concentração		
Transporte de concentrados Refinação		
Conversão em U	Conversão em UO_2	Conversão em UF_6
		Transporte UF_6 Separação isotópica
		Transporte UF_6 Conversão em UO_2
Transporte U 2.ª fusão	Transporte UO_2 Sinterização	
Embainhamento Montagem Transporte de elementos de combustível novos		
Armazenamento prévio na central Carregamento no reactor IRRADIAÇÃO Descarregamento do reactor Armazenamento temporário ou permanente na central		
Transporte de elementos de combustível irradiados Reprocessamento Conversão para UF_6 e Pu		
Transporte UF_6 e Pu Entrega ao comprador		

sendo: C₁, custo em \$/kg de U da parcela i; r, rendimento global da central; B, taxa de queima do combustível em kW_d/kg de U. O valor de B considerado será o que corresponde a um ciclo de utilização normal, atingido depois do período transitório inicial.

7. O erro cometido ao analisar um ciclo isolado sem ter em conta os períodos transitórios inicial e final é, no que diz respeito aos custos directos, inferior a 5%, sendo, por outro lado, em todos os casos os custos directos responsáveis por mais de 80% do custo do combustível.

8. Embora se reconheça o interesse futuro da utilização dos isótopos do plutónio e do isótopo 233 do urânio, provenientes da irradiação do urânio e do tório, como combustíveis nucleares, ela não é considerada nesta comunicação, dado o seu pequeno desenvolvimento industrial actual.

9. A análise da estrutura dos custos directos do combustível nuclear será, portanto, apenas referida às utilizações para as quais há já uma experiência industrial apreciável: urânio natural sob a forma de óxido e de metal (reactores moderados por água pesada e por grafito) e urânio ligeiramente enriquecido no isótopo 235, sob a forma de óxido (reactores moderados por água natural, em particular do tipo ebuliente). O Quadro II resume as características típicas dos três casos considerados. Nos parágrafos seguintes faz-se uma breve análise das cotações conhecidas, sendo, por comodidade, os custos indicados na base do dólar/kg de U.

QUADRO II

CARACTERÍSTICAS CONSIDERADAS

Designação	Metal	Óxido natural	Óxido enriquecido
Taxa de queima MWd/t de U	3500	10 000	10 000
Rendimento global %	31	28	30
Enriquecimento inicial %	0,711	0,711	1,90
Enriquecimento final %	0,42	0,17	0,73
Produção de plutónio g/kg de U	2,2	4,4	5,9
Perda de U no fabrico %	2	2	2
Perda de U na irradiação % (1)	0,56	1,40	2,12
Perda de U no reproprocessamento %	—	—	1
Perda de Pu no reproprocessamento %	—	—	0,3
Perda de U na conversão %	—	—	1
Perda de Pu na conversão %	—	—	1

(1) Corresponde ao urânio transformado em plutónio e em produtos de cisão.

10. CONCENTRADO — O custo do concentrado tem acusado uma baixa sensível ao longo dos anos, de 36 dólares/kg em 1956 a 10 dólares/kg em 1963, embora este último valor pareça reflectir um custo marginal, sendo de prever uma subida logo que a procura para fins pacíficos comece a tomar vulto. A USAEC continua a pagar 20,80 dólares/kg de U pelos contratos já firmados, com prazos de entrega até 1968, mas, segundo foi declarado oficialmente, não pagará um preço superior a 17,42 dólares/kg de U pelo concentrado a fornecer durante os anos de 1969 e 1970.

11. REFINAÇÃO E CONVERSÃO — A refinação do concentrado e a conversão para metal representa a médio prazo, segundo [1], um encargo de 6,22 dólares/kg de U, valor que se enquadra nas cotações referenciadas que apresentam uma dispersão de 4,8 a 6,7 dólares/kg. A refinação do concentrado e a conversão para óxido natural representam, segundo [2], um encargo actual de 7,49 dólares/kg de U, susceptível de evoluir, pela simples duplicação de capacidade de tratamento para 3,74 dólares/kg de U. A refinação do concentrado e a

conversão para hexafluoreto é cotada pela «Allied Chemical Corporation», única companhia privada a fornecer a USAEC com a hexafluoreto natural, em 2,52 dólares/kg de U. O contrato da ACC com a USAEC termina em 30 de Junho de 1964, sendo difícil prever a evolução futura deste preço, bastante dependente do programa militar dos E.U.A.. Para condições europeias a cotação avançada tem sido de 4 dólares/kg de U. No caso do óxido enriquecido é necessário converter o hexafluoreto em óxido. As cotações conhecidas variam entre 9,5 e 13,3 dólares/kg de U, para o enriquecimento que estamos a considerar. Também aqui é de prever uma descida a médio prazo, por aumento da capacidade unitária das instalações.

12. SEPARAÇÃO ISOTÓPICA — O valor unitário do custo de separação das fábricas de difusão gasosa americanas, tem tido uma evolução lenta. De 37,29 dólares em 1956 houve uma redução para 30,00 dólares em 1962, não parecendo provável uma grande alteração deste valor a médio prazo. Este custo das fábricas americanas é particularmente baixo devido não só ao baixo custo da energia eléctrica que as alimenta, como à dimensão importante que atingiram (segundo se supõe da ordem das 60 toneladas de urânio enriquecido por ano). Embora não existam indicações precisas, podem prever-se custos unitários duplos ou triplos no caso das fábricas europeias.

13. SINTERIZAÇÃO E RECTIFICAÇÃO — O custo de sinterização cotado por [2] para o óxido natural é de 7,49 dólares/kg de U, susceptível de redução por duplicação de capacidade para 6,24 dólares/kg de U. No caso do óxido ligeiramente enriquecido, as cotações conhecidas vão desde 11 a 18,5 dólares/kg de U, sendo de prever, dado que as restrições impostas pelo baixo enriquecimento não são muito importantes, o alinhamento desde custo pelo do óxido de urânio natural. Tanto num caso como no outro, o custo é não só função da capacidade de fabrico, como das dimensões e tolerâncias exigidas.

14. MATERIAIS AUXILIARES — Para os reactores que estamos a considerar, os materiais utilizados são ligas de magnésio e de zircónio. O impacto da energia nuclear na produção destes dois metais foi bastante diferente. A produção de magnésio teve um enorme desenvolvimento durante a última guerra, especialmente nos E.U.A., tendo a subida de preços no pós-guerra reflectido a diminuição de procura militar. Na Europa a produção tem aumentado, com a correlativa diminuição de preços, que, no entanto, se mantém superior aos americanos. A produção do zircónio decuplicou em dois anos e tem estado a aumentar em função do mercado nuclear, tendo os custos não só da matéria-prima como dos produtos fabricados apresentado baixas sensíveis. Segundo [1], os materiais auxiliares nos elementos de combustível de urânio natural metálico representam 4,8 dólares/kg de U, e pelo que acima se disse, não é de prever uma alteração substancial neste valor. Para os elementos de óxido natural os materiais auxiliares representam um encargo actual de 16,37 dólares/kg de U, prevendo-se uma evolução a curto prazo para 13,38 dólares/kg de U. No caso dos elementos de óxido enriquecido, a maior quantidade de materiais auxiliares avoluma a contribuição destes, que pode estimar-se a médio prazo em 24 dólares/kg de U.

15. FABRICO — O custo de fabrico dos elementos de combustível tem tido uma evolução rápida, devida não só à passagem da escala laboratorial para a industrial, como ao desenvolvimento tecnológico, normal numa indústria completamente nova. A sensibilidade à capacidade de fabrico é grande, sendo possível por duplicação da capacidade de fabrico reduzir de 40% o custo de fabrico no caso do metal. A médio prazo [1] prevê para os elementos de combustível com urânio metálico um custo de fabrico de 8 dólares/kg de U. As cotações inglesas, válidas para 1965-1970, prevêem um custo de 19,55 dólares/kg de U para todas as operações de transformação desde o concentrado até ao elemento de combustível com urânio metal.

16. REPROCESSAMENTO — Os custos de reprocessamento conhecidos são os indicados pela tabela oficial da USAEC, que se baseia numa fábrica hipotética com uma capacidade diária de 1 t de U, para baixos enriquecimentos. O preço a pagar é baseado numa cotação de aluguer diário das instalações, sendo o tempo a considerar o de ocupação efectiva somado com um período de preparação e limpeza, período que é no máximo de 8 dias. O encargo diário publicado em Março de 1957 era de 15 300 dólares, dos quais 6850 dólares para depreciação e 8450 para exploração, armazenamento de efluentes e gastos gerais. Estes encargos estão sujeitos a um agravamento (escalation) função dos valores de Julho de 1956 de dois índices industriais americanos. Devido a este agravamento o encargo diário actual é da ordem dos 18 000 dólares, prevendo-se uma subida para 23 000 dólares, no período 1974-75. Em 1963 uma companhia americana entrou no campo do reprocessamento, tendo já realizado contratos com cinco produtores de electricidade e com a USAEC, o que lhe deve permitir oferecer custos competitivos. A eficiência da recuperação de urânio e plutónio no reprocessamento é considerada de 99%, sendo os produtos finais soluções de nitratos de urânio e plutónio.

17. CONVERSÃO PARA HEXAFLUORETO E PLUTÓNIO METAL — Os custos conhecidos de conversão das soluções de nitratos de urânio e de plutónio em hexafluoreto de urânio e em plutónio são os indicados pela USAEC: 5,6 dólares/kg de U para a conversão UN-UF₆ e 1,5 dólares/g de Pu para a conversão PuN-Pu metal. Ainda segundo a USAEC, é de prever, nestas operações, 0,3% de perdas no urânio e 1% de perdas no plutónio.

18. TRANSPORTES E SEGUROS — A consideração das verbas de transportes e seguros apresentam aspectos bastante diferentes consoante se trata de materiais irradiados ou não. No caso dos materiais não irradiados, o transporte pode considerar-se convencional, havendo já exemplos de transporte de elementos de combustível por avião, dos E.U.A. para a Itália e para o Japão. Uma boa parte do custo do transporte é devida aos prémios de seguro, função mais do valor intrínseco dos materiais do que do risco que representam, que é, praticamente, nulo, e aos encargos com a embalagem, sendo, por isso, reduzida a sensibilidade à distância. No caso do transporte de materiais irradiados e de reactividade específica muito elevada, a experiência é ainda reduzida e as estimativas de custo mais sujeitas a erro. Este custo pode decompor-se em três rubricas: encargo com os contentores de transporte, encargo de transporte propriamente dito e seguro. Na avaliação das duas primeiras, os erros cometidos não serão grandes, o que já não acontecerá na avaliação do prémio de seguro. Segundo os valores publicados, teremos: 1,5 a 3,0 dólares/kg de U de encargo com os contentores de transporte; 1,5 a 2,5 dólares/kg de U/1000 km de encargo de transporte e 1,5 a 6,0 dólares/kg de U de prémio de seguro. Como se verifica, o custo total pode, no caso de transportes a grande distância, atingir 24 dólares/kg de U.

19. VALOR DO URÂNIO RESIDUAL — A valorização do urânio não consumido e recuperado por reprocessamento não apresenta problemas especiais se o seu enriquecimento for igual ou superior ao do urânio natural dado que encontrará preços de mercado a que se pode referir. No caso do enriquecimento ser inferior ao do urânio natural já podem pôr-se dúvidas quanto à sua valorização, uma vez que, à parte a USAEC, não será fácil encontrar outro comprador. De qualquer forma, os encargos de reprocessamento são suficientemente elevados para que, só por si, a recuperação do urânio residual seja economicamente interessante.

20. VALOR DO PLUTÓNIO PRODUZIDO — O plutónio produzido nos reactores das centrais industriais não pode ter outra aplicação que a de combustível nas mesmas e noutras centrais nucleares. A situação actual, porém, é a inexistência de centrais industriais que o possam utilizar. Por este facto as cotações da USAEC têm apenas um carácter

político e são susceptíveis de variação, como aliás tem acontecido. Com efeito, a USAEC, até 30 de Junho de 1962, pagou 30 a 45 dólares/g de Pu em função do conteúdo de Pu240, passando no período de 30 de Junho de 1962 a 30 de Junho de 1963 a pagar 30 dólares/g de Pu independentemente da composição isotópica. Desta data em diante e sob uma política temporária de compra de plutónio, até a legislação sobre a propriedade privada do combustível ser estabelecida, a USAEC pagará 10 dólares/g de Pu239 e Pu241, voluntariamente oferecido por utilizadores americanos ou estrangeiros. Atendendo à composição normal do plutónio produzido nos reactores de óxido enriquecido, o valor indicado corresponde a 6,7 a 8,2 dólares/g de Pu produzido. A única transacção de Pu que se conhece no caso europeu, foi realizada entre a UKAEA e o CEA, tendo a primeira vendido 45 kg de Pu à segunda, quantidade a ser entregue durante 1964. O custo praticado foi de 112 dólares/g de Pu, contendo 90% de Pu239 e 10% de Pu240. Este preço reflecte, apenas, o custo de produção para fins militares, não tendo qualquer significado a longo prazo. Independentemente deste valor político, o plutónio tem um valor energético que não é, contudo, o mesmo em diferentes reactores, e que está, portanto, ligado tanto com o valor de urânio natural como com os custos de enriquecimento. Para as condições actuais, estudos económicos realizados indicam que o plutónio pode ter um valor de 5,5 a 11-14 dólares/g em reactores conversores ou um máximo de 16,1 dólares/g em reactores reprodutores. Dum modo geral, quanto melhor for a economia neutrónica de um reactor menor será o valor que o plutónio terá como combustível para o abastecer.

21. ARMAZENAMENTO FINAL — Em função da legislação existente, da possibilidade de venda de plutónio e de urânio e dos encargos necessários para os recuperar, o reprocessamento do combustível pode não ser economicamente justificável. Neste caso, o combustível irradiado é armazenado, pelo menos durante alguns anos, até o mercado do plutónio estar bem estabelecido e os custos de reprocessamento tornarem a sua recuperação interessante. Os encargos com o armazenamento são devidos ao investimento a fazer em instalações apropriadas e aos encargos de exploração e manutenção dessas mesmas instalações, portanto de índole bastante diferente dos que temos estado a considerar até aqui, e, logicamente, devem ser incluídos no custo de produção, nas rubricas de investimento e de exploração

QUADRO III

CUSTOS BASE (dól./kg de U)

Designação	Metal natural	Óxido natural	Óxido enriquecido
Concentrado	17,42	17,42	20,80
Retinuação e conversão	6,22	5,62	2,53
Separação isotópica (custo unitário)	—	—	30,00
Transporte matéria-prima	0,14 (a)	0,14 (a)	1,25 (b)
Conversão do hexafluoreto	—	—	11,00
Sinterização e rectificação	—	6,86	12,00
Materiais auxiliares	4,80	14,88	24,00
Fabrico	8,00	26,40	34,00
Transporte elementos de combustível	1,07 (c)	1,42 (c)	2,90 (c)
Transporte elem. comb. irradiados	—	—	24,00
Reprocessamento (encargo diário)	—	—	22,00
Conversão nitratos em hexafluoreto	—	—	5,60
Conversão nitratos em plutónio	—	—	1,50 (d)
Transporte hexafluoreto e plutónio	—	—	0,40 (e)
Crédito hexafluoreto urânio	—	—	24,94
Crédito plutónio	—	—	7,40 (d)

(a) 0,1 dól./kg de U, encargos de transporte + 2/1000 do valor transportado.

(b) 0,60 dól./kg de U, encargos de expedição da USAEC + 0,37 dól./kg de U, encargos de transporte + 2/1000 do valor transportado.

(c) 0,7 dól./kg de U, encargos de transporte + 1 % do valor transportado.

(d) por grama de plutónio produzido.

(e) 0,3 dól./kg de U, encargos de recepção na USAEC + 0,1 dól./kg de U, encargos de transporte.

QUADRO IV

CUSTOS DE REFERÊNCIA
(1970-1975)

Designação	Metal natural		Óxido natural		Óxido enriquecido	
	\$/kg de U	cent/kWh	\$/kg de U	cent/kWh	\$/kg de U	cent/kWh
Concentrado	515\$30	1,079	515\$30	0,740	2208\$70	1,917
Refinação	183\$90	0,706	166\$20	0,239	268\$50	0,233
Separação	—	—	—	—	1548\$60	1,344
Transporte	4\$10	0,016	4\$10	0,006	37\$10	0,032
Conversão	—	—	—	—	319\$00	0,277
Sinterização	—	—	198\$90	0,286	348\$00	0,302
Materiais auxiliares	139\$20	0,534	431\$50	0,620	696\$00	0,604
Fabrico	232\$00	0,891	765\$60	1,100	986\$00	0,856
Transporte	31\$00	0,119	41\$20	0,059	84\$10	0,073
Sub-total	1105\$50	4,245	2122\$80	3,050	6496\$00	5,638
Transporte	—	—	—	—	680\$00	0,590
Reprocessamento	—	—	—	—	1268\$20	1,101
Conversão U	—	—	—	—	157\$20	0,136
Conversão Pu	—	—	—	—	254\$00	0,220
Transporte	—	—	—	—	11\$00	0,010
Crédito U	—	—	—	—	— 697\$40	— 0,605
Crédito Pu	—	—	—	—	— 1240\$90	— 1,077
Total	1105\$50	4,245	2122\$80	3,050	6928\$10	6,013

e manutenção. Salienta-se que o possível crédito a longo prazo não é considerado no cálculo do custo do combustível.

22. ENCARGOS DIVERSOS — Ligados com o combustível nuclear aparecem ainda outros encargos, como sejam os decorrentes da sua gestão e do carregamento e descarregamento do reactor, encargos que, como é óbvio, serão lançados na conta de encargos de exploração da central. No caso do óxido enriquecido fornecido pela USAEC, há que contar com encargos de expedição e recepção do hexafluoreto, para os quais há cotações oficiais e que consideraremos incluídos nos custos de transporte.

23. Depois desta breve descrição do conteúdo dos diferentes custos directos, resta-nos a sua incidência no custo do combustível. Para isso indicam-se no Quadro III os custos unitários de base considerados e que, juntamente com as características indicadas no Quadro II, permitem preencher o Quadro IV. Como é evidente, muitos factores condicionam os valores apresentados: época a que se referem as cotações, tipo de mercado existente, legislação aplicável, grau de garantia exigido pelo utilizador, etc. Procurou-se, contudo, tornar os valores apresentados significativos e comparáveis. A apresentação dos valores em escudos por quilograma de urânio (\$/kg de U) e em centavos por kWh (cent/kWh) representa uma simples conversão cambial das cotações originais, não devendo, portanto, ser-lhe atribuído qualquer significado nacional.

24. Nos dois casos de urânio natural apresentados não foi considerado o reprocessamento, admitindo-se que o combustível descarregado seria armazenado. No caso do óxido enriquecido e nas condições consideradas, a recuperação e venda do urânio residual e do plutónio produzido representam um agravamento do custo

do combustível (custos directos) de 6,65%. Se, contudo, o custo do transporte dos elementos de combustível irradiados fosse de 12 dólares/kg de U em vez dos 24 dólares/kg de U considerados e se o reprocessamento fosse realizado por lotes formados por duas descargas sucessivas, o custo total apresentaria um ganho de 3,38% em relação ao sub-total indicado no Quadro IV, havendo, porém, neste caso, de contar com um agravamento dos encargos financeiros.

25. Para tornar mais evidente o papel do custo do concentrado e dos materiais auxiliares, e a contribuição das indústrias transformadoras e dos serviços no custo do combustível nuclear (custos directos), resumem-se no Quadro seguinte os valores apresentados no Quadro IV, exprimindo-os em percentagem do valor total.

Designação	Natural		Enriquecido	
	Metal	Óxido	s/rep	c/rep
Concentrado	46,6	24,3	34,0	31,9
Materiais auxiliares	12,6	20,3	10,7	10,0
Fabrico	37,6	53,3	53,4	74,4
Transportes, Seguros	3,2	2,1	1,9	11,7
Créditos	—	—	—	— 28,0

Note-se ainda que tanto o concentrado como, e principalmente, os materiais auxiliares não são matérias primas brutas, mas pelo contrário produtos fabricados e com valor acrescentado elevado.

J. ROCHA CABRAL
Engenheiro Electrotécnico (I. S. T.)

BIBLIOGRAFIA

- [1] *Quelques aspects économiques des centrales nucléaires à uranium naturel* — J. GAUSSENS — 9/10/63.
- [2] *Economic fuel for Candu* — A. J. MOORADIAN — 20-27/10/63.
- [3] *Notes d'information* — CEA — 15/1/64.
- [4] *U. S. Industry's role in 1963* — E. B. TREMMEL — NE 1/64.
- [5] *Calcul des immobilisations financières des cycles de combustible* — J. GAUSSENS — 1963 — CEA n.º 2325.
- [6] *Nucleonics* 12/63.
- [7] *Atomics* 9-10/63.
- [8] *Caractéristiques économiques des centrales nucléaires et des cycles de combustible* — J. GAUSSENS — 2/63.
- [9] *Financing privately owned nuclear fuel inventories* — Atomic Industrial Forum — 2/63.
- [10] *The role of plutonium in the British nuclear power programme* — H. KRONBERGER — 2/63.
- [11] *Anatomie du coût du kilowatt-heure nucléaire* — J. GAUSSENS — 10/62.
- [12] *Guide to nuclear power cost evaluation. Fuel cycle costs* — TID-7025 (Vol. 4) — 15/3/62.
- [13] *Introduction to the methods of estimating nuclear power generating costs* — IAEA TRS n.º 5 — 1961.
- [14] *Economic potential for D₂O power reactors* — L. ISAKOFF — DP 570 — 2/61.
- [15] *Boiling water reactor study* — TID-8500 (Pt. 1) (Supplement) — 2/60.
- [16] *Comparaison des coûts des cycles de combustible à uranium naturel et à uranium enrichi. Conséquences du choix des méthodes de calculs* — J. ANDRIOT, J. GAUSSENS — 4/59.
- [17] *Le marché des matières nucléaires* — Comunicações às sessões VIA e VIB da Conferência de Stresa — 4/59.
- [18] *Guide to shipment of U235 enriched uranium materials* — H. F. HURNY — TID-7109 — 6/59.
- [19] *Fuel cycles in magnox reactors* — A. JOHNSON — 4-8/63.