



Neste número:
geoengenharia na Ásia
Central.

Com um prólogo de Richard
Cathcart, GEOGRAPHOS,
Burbank, California – USA.

Medicina Nuclear:
controle de qualidade
em evidência.

Engenharia
Portuária:
soluções para
o Brasil.

CALIBRE

Evolução Estelar:
uma abordagem
pedagógica.

Desde 2016

índice

ARTIGOS ORIGINAIS

TERMINAL DE USO PRIVADO PARA A CIDADE DE CAMETÁ - PA

Elisângela Fernandes Cerqueira, Fabiano Pereira Bonfim, Felipe Gomes Carvalho,
Marcos Vinícius Santos, Rosemberk Antônio Costa

1-10

STELLAR INTERIORS FROM LUMINOTHERMIC MODELING:

A Pedagogic Approach

Nilo Serpa

11-20

DES MÉMOIRES TURKESTANS:

La Terraformage du Bassin de la Mer d'Aral et la Guerre Silencieuse pour l'Eau

Nilo Serpa

21-36

ARTIGOS DE REVISÃO

CONTROLE DE QUALIDADE DO MEDIDOR DE ATIVIDADE:

Ativímetro em Serviço de Medicina Nuclear

Glécio Oliveira Valgas

37-44





Terminal de Uso Privado para a Cidade de Cametá - PA

Elisângela Fernandes Cerqueira, engenheira civil

BSB Engenharia Civil - Projetos e Obras, Brasília-DF, Brasil

Fabiano Pereira Bonfim, engenheiro civil

BSB Engenharia Civil - Projetos e Obras, Brasília-DF, Brasil

Felipe Gomes Carvalho, engenheiro civil

MZ Construtora, Brasília-DF, Brasil

Marcos Vinícius Santos, engenheiro civil

CONCRECON, Brasília-DF, Brasil

Rosemberk Antônio Costa, engenheiro civil

BSB Engenharia Civil - Projetos e Obras, Brasília-DF, Brasil

Recebido: 20 Março 2017 __ / Aceito: 02 Maio 2017 __ / Publicado: 16 Junho 2017 __.

Abstract: This study discusses the waterways in the Low Tocantins region, focusing on the commercialization of the *açaí*. In order to facilitate the transportation of this fruit and ensure quality of the product during the general logistics of transportation and storage, it was proposed the construction of a TUP (Brazilian abbreviation for Private Use Terminal), integrated with a Cultural Center, consisting of kiosks for commercialization of local handicrafts and living spaces for the valorization of regional culture. The terminal was designed to work during tidal level oscillations. Mathematical equations for load handling and structural design were presented for the pier. The implementation of this terminal aims to integrate Low Tocantins with other regions of the country, bringing social gains and incentives to the riverside culture.

Keywords: *açaí*, private use terminal, logistics, cultural center, integration.

1- Introdução

Hidrovia, por definição, é uma rota pré-determinada para o tráfego aquático utilizada para o transporte de cargas de tonelagem ou pessoas. Apesar de poucos recursos destinados à melhoria do desenvolvimento da infraestrutura desse modo de transporte, a hidrovia é

imprescindível para o incremento do Produto Interno Bruto (PIB), pois, segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística [6], estima-se que 75% do comércio internacional do Brasil se realiza por transporte aquaviário, o qual é considerado mais econômico e apresenta menor impacto ambiental se comparado aos transportes rodoviários e ferroviários. Assim, por questões sociais, econômicas e ambientais, necessita-se de políticas públicas que valorizem o sistema hidroviário brasileiro.

Autor correspondente: Elisângela Fernandes Cerqueira, discente em engenharia civil, áreas de pesquisa: portos, estruturas de contenção. E-mail: eliselis1903@gmail.com.

Segundo Tokarski [13], apesar da maior parte dos rios navegáveis se localizarem na Amazônia, por não existirem grandes pólos econômicos nesta região os trechos hidroviários mais importantes do ponto de vista econômico localizam-se no Sudeste e no Sul do país. Contudo, percebe-se a necessidade do desenvolvimento das bacias hidroviárias com os objetivos de promover o desenvolvimento social e econômico das regiões ribeirinhas, reduzir o custo de escoamento, otimizar a eficiência energética do transporte de carga e desenvolver a economia interna para que haja expansão de um sistema de transporte intermodal e integração entre todas as regiões brasileiras.

O Governo Federal, nos últimos anos, intensificou esforços a fim de viabilizar a redução das desigualdades regionais com a implementação da Política Nacional de Desenvolvimento Regional (PNDR), cujos principais objetivos são a redução das disparidades regionais, expansão dos potenciais de cada região brasileira, inclusão produtiva e integração econômica de regiões menos desenvolvidas com o restante do país, por meio de rotas de integração nacional. Sem dúvida, o PNDR contribuiria para a melhoria do nosso Índice de Desenvolvimento Humano, neste momento um dos piores do mundo [8]. Atualmente, segundo o Ministério da Integração [10], estão implantadas a Rota do Cordeiro – no semi-árido Nordestino –, a Rota da Fruta – na região Norte, Nordeste, e Sul –, a Rota do Peixe – na região Norte e Nordeste – e a Rota do Mel – na região Nordeste –, havendo propostas de projetos para outras rotas como a do Açaí, na região do Baixo Tocantins. Políticas públicas que favoreçam o desenvolvimento e integração das regiões com redução das desigualdades regionais são imprescindíveis para o desenvolvimento do país, pois, além de melhorarem o PIB, favorecem o intercâmbio sociocultural.

Na região do Baixo Tocantins encontra-se a bacia Tocantins-Araguaia, segunda maior do Brasil, que abrange os estados de Pará, Maranhão, Tocantins, Goiás, Mato Grosso e Distrito Federal. Segundo a Agência Nacional de Transportes Aquaviários [1, 2], essa bacia

apresenta as seguintes porcentagens destinadas aos tipos de navegação: 58,5% de longo curso, 9,3% de cabotagem e 32,2% de interiores, esta última tendo apresentado maior crescimento anual (12,86%). Semelhante aumento é justificado pela relevância nacional dessa bacia, que além de conter a usina de Tucuruí, faz a ligação entre estados da região Norte, Nordeste e Centro Oeste.

No trecho hidroviário denominado Baixo Tocantins (nordeste do Pará), no estuário do rio Tocantins-PA, localiza-se o maior pólo brasileiro de produção de açaí (*Euterpe Oleracea*), que apresenta exploração sustentável e garante emprego e renda às famílias da região. No Brasil, a comercialização deste fruto, a qual passa por diversos processos, desde os produtores até o consumidor final (Figura 1), apresenta rápido crescimento, conquistando novas fronteiras de mercado, o que aumenta a demanda de produção [11]. Embora a exploração do açaí tenha capacidade para desenvolver a economia regional, a logística e o armazenamento apontam características deficitárias que comprometem o valor econômico. A qualidade do açaí apresenta grande variação e requer cuidados para assegurar a qualidade de seus derivados, tais como o transporte com proteção contra chuva, armazenamento em locais refrigerados e cuidados com o manuseio e transferências.

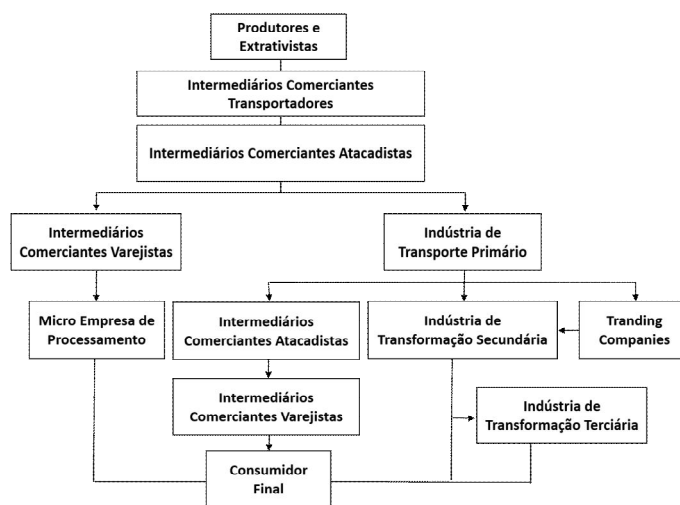


Figura 1 – Fluxograma indicando como ocorre o escoamento da produção de açaí na região do Baixo Tocantins. **Fonte:** Pagliarussi, 2010.

O escoamento do açaí, entretanto, não acompanhou a expansão da produção extrativista do fruto. A falta de controle de qualidade durante a logística do transporte interfere diretamente no preço do produto, afetando principalmente a economia da população local. Os principais municípios responsáveis pelo fornecimento deste fruto são Igarapé-Mirim, Cametá, Baião, Mocajuba e Limoeiro do Ajurú, os quais, juntos, chegam a produzir 450.000 toneladas da fruta por ano [3]. O escoamento da produção acontece em Cametá, por meio de barcos a motor que descarregam o produto em um ancoradouro com condições precárias. Com o objetivo de aprimorar esse escoamento, são necessárias melhorias nas condições de infraestrutura, que podem ser atingidas com a construção de um Terminal de Uso Privado (TUP) na região, regulamentado na Lei 12.815, de 5 de junho de 2013, que se refere a um empreendimento portuário destinado a movimentação de pessoas ou ao armazenamento de mercadorias, explorado por meio de autorização por 25 anos, prorrogável por igual período [4]. Neste tipo de sistema portuário, segundo Mesquita, o governo federal continua o responsável pela fiscalização aos atendimentos normativos e as empresas privadas são responsáveis pela manutenção e administração dos portos [9].

De acordo com o IBGE [6], o município de Cametá, localizado no baixo Tocantins, é composto, desde 2005, pelas seguintes cidades: Cametá, Arejão, Carapajó, Curuçambaba, Joanacoli, Juaba, Moiraba, Torres do Cupijó e Vila do Carmo de Tocantins. Apresenta uma população estimada de 132.515 pessoas (2016) e um Índice de Desenvolvimento Humano de 0,577, abaixo da média nacional brasileira que é de 0,755 [8]. A renda per capita domiciliar, razão entre o somatório das rendas individuais e o número de habitantes de uma moradia de Cametá, de acordo com o censo de 2010, é de R\$225,05, classificada entre os valores mais baixos do país [6]. Assim, com o objetivo de oferecer condições de vida mais adequadas aos moradores do baixo Tocantins e conseqüentemente elevar os níveis dos indicadores socioeconômicos da região, percebe-se no extrativismo

do açaí e do palmito um grande potencial para incrementar a economia de Cametá.

2- Materiais e Métodos

A construção de um TUP em Cametá, pólo de recebimento do açaí das ilhas do baixo Tocantins, com condições de infraestrutura adequadas de embarque e desembarque e armazenamento de produtos extraídos da região, elevaria a economia local, uma vez que as vendas poderiam ser realizadas diretamente para os atacadistas, os quais disporiam de uma estrutura portuária capaz de manter o açaí em melhores condições, evitando atravessadores, aumentando o turismo e também o número de empregos diretos e indiretos. Com que então, propõe-se a construção, em Cametá, de um TUP, instalação na qual a exploração portuária ocorre por meio de recursos privados. Semelhante atividade atrai investimentos, incrementa a concorrência e melhora a eficiência logística. Com esta instalação, o sistema portuário conseguirá se desenvolver, tendo em conta que a União não se mostra efetiva na gestão do modal em questão, tampouco exibe proficiência em lidar com a complexa rede hidroviária brasileira.

As instalações portuárias privadas são as grandes responsáveis pelo desenvolvimento econômico do setor, pois facilitam a movimentação interna e externa da produção nacional, desenvolvem questões sociais na região instalada e constituem importante gerador de empregos e renda. De acordo com a ANTAQ [1, 2], estão licenciadas atualmente 180 TUP no Brasil, os quais possibilitaram o escoamento de 656 milhões de toneladas de carga bruta em 2015, cerca de 65,1% de todo o produto escoado pelo Sistema Portuário Nacional. Porém, estes terminais na região do Baixo Tocantins somente estão implantados nas proximidades de Belém (Figura 2), fato que não favorece a integração com a região Centro-Oeste e prejudica o desenvolvimento da economia local. Fica, assim, evidente a importância deste tipo de construção por desenvolver a competitividade do mercado e gerar tributos aos locais instalados, podendo

adquirir representatividade superior no contexto de portos da União.

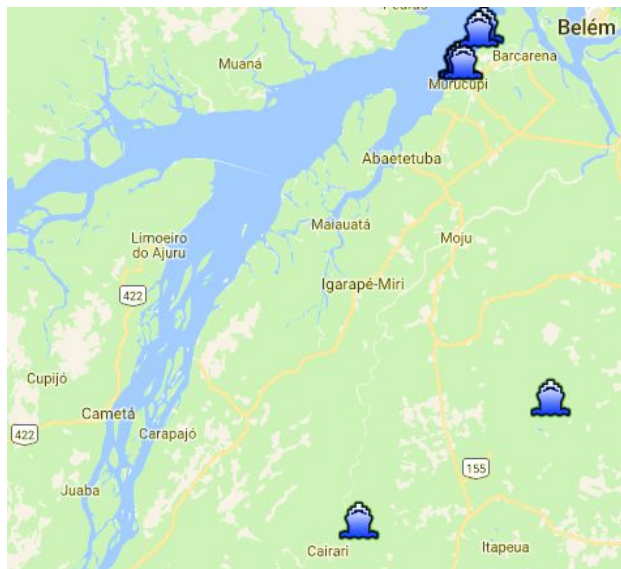
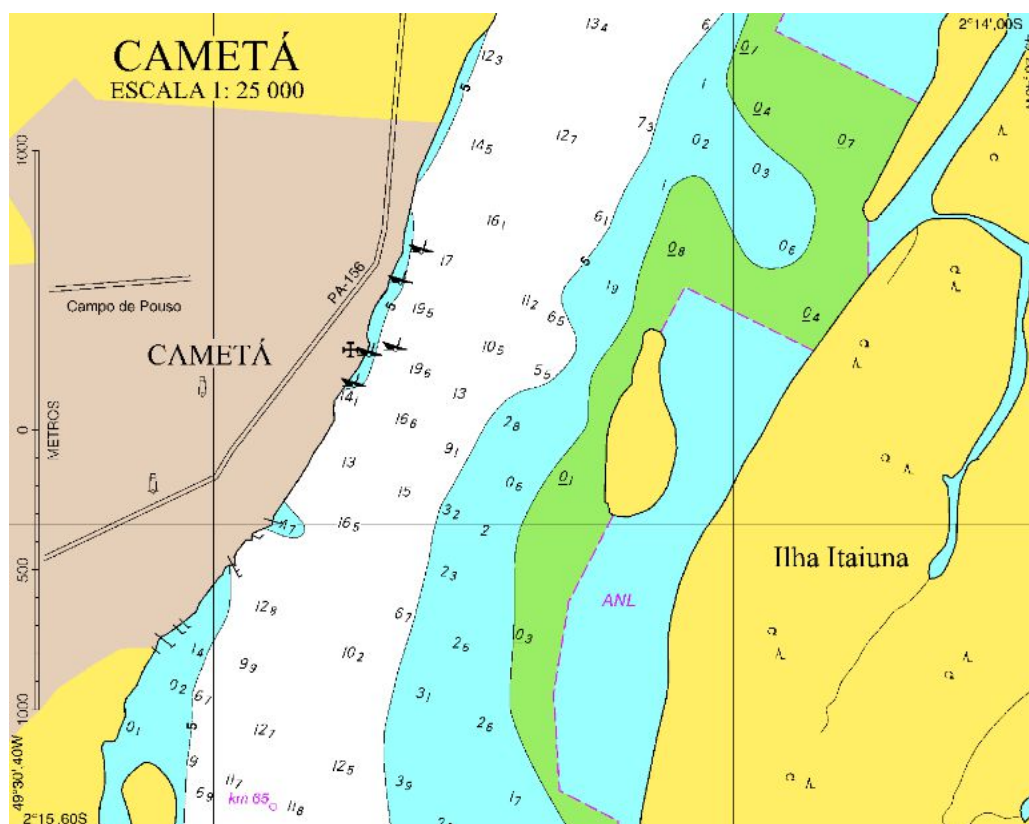


Figura 2 – Terminais de uso privado na região do baixo Tocantins. **Fonte:** ANTAQ, 2016.

Ao consultar a carta náutica (Figura 3), mapa hidrográfico que representa regiões costeiras, observa-se a existência de locais com diferentes profundidades, fato que inviabiliza a navegabilidade nesta região [7]. A utilização de dragagens em alguns pontos da bacia do rio Tocantins é viável para se obter uma maior profundidade do rio, tornando-o navegável por todo o percurso.

O termo dragagem é, segundo Fadda, o serviço de desassoreamento, alargamento, remoção ou escavação de material do fundo de rios, lagoas, mares, baías e canais de acesso a portos, por meio de equipamento denominado “draga”, a qual é, geralmente, uma embarcação ou plataforma flutuante equipada com mecanismos necessários para efetuar a remoção do solo assoreado, causado principalmente pela erosão, desmatamento e práticas agrícolas inadequadas [5].



Com auxílio de dragas de sucção e recalque, é possível executar a remoção de materiais sólidos do fundo de corpos d'água como o lodo e a areia. O material dragado pode ser sedimentado por meio de tecnologias como centrifugação ou tubos geotêxteis e transferido para local de despejo autorizado por órgãos competentes. Vale ressaltar que, independente da finalidade da dragagem, é necessária a obtenção de licença ambiental, para que os impactos ambientais referentes a essa prática sejam amenizados [5].

A movimentação das cargas, segundo Park *et al.*, é um indicador de desempenho que pode ser empregado em um TUP em relação a qualquer tipo de carga (como por exemplo o açaí) e tem a finalidade de expressar a vantagem competitiva de uma instalação portuária e atrair investimentos [12]. O desempenho da movimentação é o reflexo de um trabalho conjunto de operações tais como: eficiência e características dos meios de transporte aquáticos, espaço de atracação, funcionamento de equipamentos, emprego da mão-de-obra e armazenamento dos produtos. Equacionar esses fatores requer uma análise das especificidades de cada item que compõe a seguinte relação matemática:

$$Y = B \left(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m C_i \cdot V_j \cdot T_{ij} \right) D_k \cdot H_k \cdot O_l,$$

onde:

Y = Capacidade de movimentação;

B = Número de berços (locais destinados à atracação das embarcações);

C_i = Taxa de cada tipo de carga em relação ao total de carga do ancoradouro. Os principais tipos de carga são carga geral, graneis sólidos e graneis líquidos;

V_j = Tamanho do navio em relação ao berço;

T_{ij} = Capacidade de movimentação por hora para cada navio;

D_k = Dias de trabalhos anuais na instalação portuária;

H_k = Horas de trabalho por dia;

O_l = Taxa de ocupação do cais.

O planejamento portuário é indispensável para o funcionamento adequado do porto e do TUP, sendo a capacidade de movimentação a função determinante nas instalações portuárias.

O projeto do TUP está baseado na construção de:

- Um píer formado por duas rampas móveis de 50 metros de comprimento e 4 metros de largura, conectadas entre si, em uma extremidade, por plataforma de 33 metros de comprimento e 4 de largura, munida de um cilindro acoplado na parte inferior para facilitar a flutuação, e, na outra extremidade, conectada por uma articulação (rótula) em uma viga, o que permite a movimentação durante a oscilação da maré;
- Muro de arrimo, construído em concreto ciclópico com pedras da região, para contenção da água;
- Um centro cultural composto por 20 quiosques com 50 m^2 , destinados a artesanatos locais, praça de alimentação, administração e sanitários, com projeto arquitetônico que remete ao cacho de açaí, sendo os quiosques os frutos e as vias de acesso as ramificações do cacho;
- Estacionamento público e espaço cultural com área de 2.500 m^2 ;
- Galpão com 1.500 m^2 para armazenagem da produção de açaí e de palmito;
- Área verde destinada ao plantio de palmeiras de açaí, a fim de minimizar a degradação ambiental pela construção do TUP.

3- Resultados e Discussões

A fim de conter a entrada da água e a erosão do terreno em declive, sugere-se a construção de um muro de arrimo de pedra rachão e concreto, o qual apresente as seguintes características:

- Altura do muro (h) igual a 2,0m;
- Muro de concreto ciclópico, pedra rachão da própria região e diâmetro máximo de 300 mm,

cimento CP IV, areia grossa, brita 1 e brita 2. O peso específico adotado para o concreto (γ_c) é de $2,2 \text{ tf/m}^3$;

- Paramento interno com acabamento liso;
- Muro de arrimo com sobrecarga (q) de $0,3 \text{ tf/m}^2$, sem inclinação do terreno.

Devido ao solo regional apresentar características arenosas, adota-se o peso específico (γ_t) de $1,4 \text{ tf/m}^3$ e ângulo de atrito interno (φ) de 30° . A utilização do CPIV se deve a adição de pozolana em um percentual de 15% a 50%. Essa adição resulta em uma ampliação das características de impermeabilidade e durabilidade do concreto, ideal para obras expostas a ação de águas correntes. A resistência característica do concreto (f_{ck}) a ser utilizado é de $44,5 \text{ kgf/cm}^2$. Adota-se também, coeficiente de atrito (μ) concreto/solo de 0,5. A verificação da estabilidade do conjunto é feita pelo cálculo do empuxo por meio de:

- Coeficiente de Coulomb (k)

$$k = \tan\left(45 - \frac{\varphi}{2}\right) = 0,33$$

- Comprimento do topo do muro (b_0):

$$b_0 = 0,14 \cdot h = 28 \text{ cm}$$

- Comprimento da base do muro (b):

$$b = b_0 + \frac{h}{3} = 95 \text{ cm}; \text{ adota-se } 110 \text{ cm.}$$

- Empuxo de terra (E), com sobrecarga no terreno devida ao píer e ponto de aplicação do empuxo (y'):

$$h_0 = \frac{q}{\gamma_t} = 22 \text{ cm}$$

$$H = h + h_0 = 222 \text{ cm}$$

$$E = \frac{1}{2} k \cdot \gamma_t \cdot (H^2 - h^2) = 1,3 \text{ tf/m}$$

$$y' = \frac{h}{3} \cdot \left(\frac{2 \cdot h_0 + H}{h_0 + H} \right) + h_s = 123 \text{ cm}$$

- Carga do Muro (Gm) e ponto de aplicação (gm):

$$Gm = \frac{(b + b_0) \cdot h \cdot \gamma_c}{2} = 3,1 \text{ tf/m}$$

$$gm = b - \frac{b_0^2 + b_0 \cdot b + b^2}{3 \cdot (b + b_0)} = 39 \text{ cm}$$

- Carga da sapata (Gs) e ponto de aplicação (gs):

$$Gs = b \cdot h_s \cdot \gamma_c = 1,2 \text{ tf/m}$$

$$gs = \frac{b}{2} = 55 \text{ cm}$$

- Verificação contra escorregamento (ε_1):

$$= \mu \cdot \frac{N}{T} = 1,66; \text{ como } \varepsilon_1 \geq 1,5, \text{ o muro não está sujeito à ação de escorregamento.}$$

- Verificação contra rotação (ε_2):

$$M_1 = Gm \cdot gm + Gs \cdot gs = 2,87 \text{ tf} \cdot \text{m/m}$$

$$Me = E \cdot y' = 1,6 \text{ tf} \cdot \text{m/m}$$

$$= \frac{M_1}{Me} = 1,8; \text{ como } \varepsilon_2 \geq 1,5, \text{ o muro não está}$$

sujeito à ação de rotação (tombamento).

Com auxílio do programa estrutural *Eberick*, foram dimensionados dois pórticos (Figura 4), compostos por uma viga-parede, quatro pilares, sendo dois para cada píer, uma viga baldrame para a ligação entre os pilares, dois blocos de coroamento para fazer a transição das cargas do pilar para a fundação, e quatro tubulões que recebem toda a carga da estrutura, transmitindo-a para o solo.

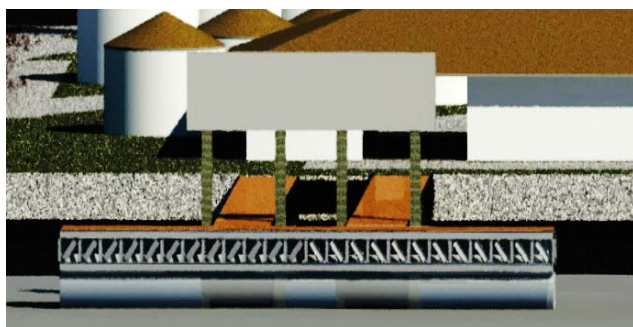


Figura 4 – Vista frontal do pórtico que sustenta a estrutura do pier.

Dados			Resultados					
Pilar Trecho	Apoio I e Io (cm)	Seção (cm)	As Inf (cm²)	As Sup (cm²)	Asw min (cm²)	Asw Pele (cm²)	Fissura (mm)	Flecha (cm)
1	100.00	70.00 x 100.00	4 ø 20.0		ø 6.3 c/ 18	2x9 ø 10.0	0.00	0.04
P1	70.00			4 ø 20.0 10.50			0.00	
2	410.00	70.00 x 100.00	4 ø 20.0		ø 6.3 c/ 18	2x9 ø 10.0	0.00	0.05
P2	70.00			4 ø 20.0 10.50			0.00	
3	330.00	70.00 x 100.00	4 ø 20.0		ø 6.3 c/ 18	2x9 ø 10.0	0.00	0.04
P3	70.00			4 ø 20.0 10.50			0.00	
4	420.00	70.00 x 100.00	4 ø 20.0		ø 6.3 c/ 18	2x9 ø 10.0	0.00	0.05
P4	70.00			4 ø 20.0 10.50			0.00	
5	100.00	70.00 x 100.00	4 ø 20.0		ø 6.3 c/ 18	2x9 ø 10.0	0.00	0.04

Quadro 1 – Resumo dos resultados da viga-parede.

Dados								Resultados		
Pilar	Seção (cm)	Nível Altura (cm)	Nd máx e Nd mín (tf)	MBd topo e MBd base (kgf.m)	MHd topo e MHd base	As b e As h% armad	Estribo Topo e	Esbeltez b		
P1	70.00	900	34.18	31156	1209	14.73 12 ø 12.5	ø 6.3 c/ 8	138.40		
	X		19.82	50732	340	14.73 12 ø 12.5		24.71		
	70.00				1.1 44 ø 12.5					
P2	70.00	900	38.85	31140	561	16.08 8 ø 16.0	ø 6.3 c/ 8	138.40		
	X		23.73	50772	197	16.08 8 ø 16.0		24.71		
	70.00				1.1 28 ø 16.0					
P3	70.00	900	39.10	31140	597	16.08 8 ø 16.0	ø 6.3 c/ 8	138.40		
	X		23.92	50775	203	16.08 8 ø 16.0		24.71		
	70.00				1.1 28 ø 16.0					
P4	70.00	900	34.35	31158	1248	14.73 12 ø 12.5	ø 6.3 c/ 8	138.40		
	X		19.97	50738	350	14.73 12 ø 12.5		24.71		
	70.00				1.1 44 ø 12.5					

Quadro 2 – Resumo dos resultados dos pilares.

Dados			Resultados					
Pilar Trecho	Apoio 1 e 1o (cm)	Seção (cm)	As Inf (cm²)	As Sup (cm²)	Asw min (cm²)	Asw Pele (cm²)	Fissura (mm)	Flecha (cm)
P1	70.00			4 ø 16.0 7.35			0.00	
1	410.00	70.00 x 100.00	4 ø 16.0 7.35		ø 5.0 c/ 11	2x7 ø 10.0	0.00	0.04
P2	70.00			4 ø 16.0 7.35			0.01	
2	330.00	70.00 x 100.00	4 ø 16.0 7.35		ø 5.0 c/ 11	2x7 ø 10.0	0.00	0.03
P3	70.00			4 ø 16.0 7.35			0.01	
3	420.00	70.00 x 100.00	4 ø 16.0 7.35		ø 5.0 c/ 11	2x7 ø 10.0	0.00	0.04
P4	70.00			4 ø 16.0 7.35			0.00	

Quadro 3 – Resumo dos resultados da viga-baldrame.

Modelo	Dimensões (cm)	Altura (cm)	Momento (kgf.m)	Armadura principal na direção X	
				Tensão (tf)	Armadura (cm²)
1	110x110	115	36245	33.09	11.07
2	350x110	120	139	-	2.21

Quadro 4 – Resumo dos resultados dos blocos de coroamento.

Tubulão	Dados					Resultados			
	Esforços		Carga			Dimensões (cm)		Armadura	
	MB e MH (kgf.m)	FB e FH (tf)	total (tf)	E Solo	Coessão (kgf/cm²)	Ângulo atrito	B e H	H0 e H1	As B inf e As B sup
B1	241.50 3318.42	0.05 7.83	33.83 34.74	1600.00 0.50	30	30	120.00 120.00	20.00 55.00	As H inf e As H sup 2 ø 5.0 8 ø 6.3
B2	121.29 3291.04	0.03 7.85	37.42 38.44	1600.00 0.50	30	30	125.00 125.00	20.00 60.00	2 ø 5.0 8 ø 6.3
B3	128.22 3289.56	0.03 7.85	37.62 38.63	1600.00 0.50	30	30	125.00 125.00	20.00 60.00	2 ø 5.0 8 ø 6.3
B4	248.35 3317.66	0.06 7.83	33.97 34.87	1600.00 0.50	30	30	120.00 120.00	20.00 55.00	2 ø 5.0 8 ø 6.3

Quadro 5 – Resumo dos resultados dos tubulões.

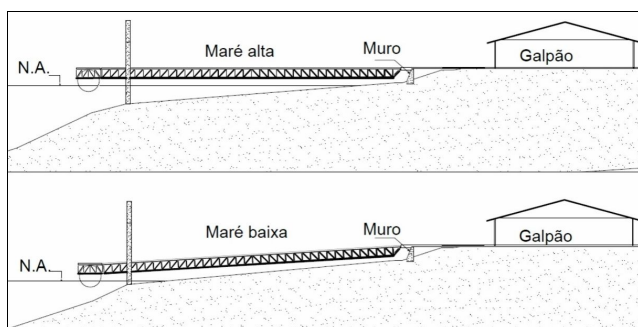


Figura 5 – Corte transversal do TUP.

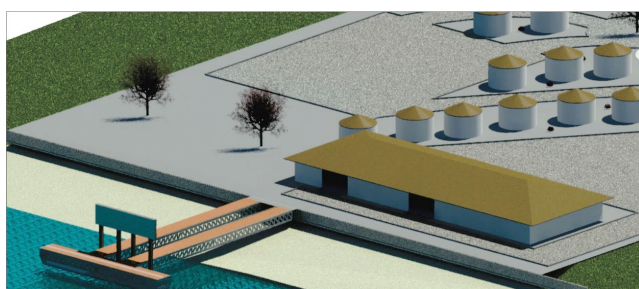


Figura 6 – Perspectiva da estrutura portuária à direita, com o pier e o centro cultural.

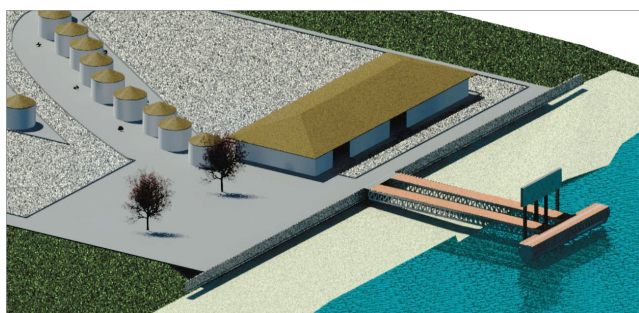


Figura 7 – Perspectiva da estrutura portuária à esquerda, com o pier e o centro cultural.

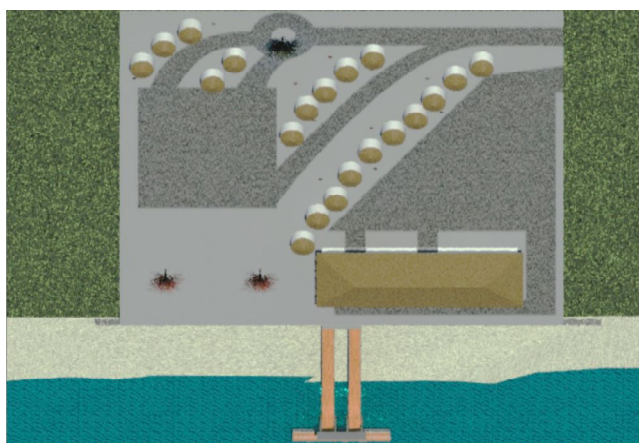


Figura 8– Vista superior da TUP e Centro Cultural.

4- Conclusão

Ao analisar as características regionais, pode-se concluir que, a proposta da criação de um porto impulsiona o desenvolvimento local, amplia a economia, contribui para o aumento da fonte de renda da população ribeirinha e melhora as condições sociais da população. O Terminal de Uso Privado do distrito de Cametá foi concebido de acordo com as características socioculturais locais. Por estar integrado a um centro cultural, baseado na implantação de uma estrutura urbanística que faz referência ao cacho de açaí, apresenta grande potencial para o desenvolvimento turístico. A concepção estrutural adotada aplica princípios tecnológicos compatíveis com as instalações portuárias mais modernas hoje existentes, sendo que o muro de arrimo calculado em pedra rachão da própria região minimiza custos, privilegiando o uso da matéria-prima local.

Apesar dos desafios ambientais inicialmente enfrentadas para a implantação deste projeto, tais como dragagem e área necessária para a construção de um porto, o transporte fluvial é um recurso com maior capacidade de condução de cargas e passageiros, resultando em um menor impacto ambiental quando comparado à implantação de rodovias e ferrovias. O projeto proposto, além de elevar o nível da economia local e melhorar a navegabilidade da região do Baixo Tocantins, resultará em maior interatividade no mercado interno brasileiro.

Referências

- [1] ANTAQ – Agência Nacional de Transportes Aquaviários. Anuário 2015. Disponível em: <http://www.antaq.gov.br/anuario2015/>. Acesso em: 26 nov. 2016.
- [2] _____ Localização das Instalações Portuárias Autorizadas. Disponível em: http://www.antaq.gov.br/Portal/Instalacoes_Portuarias.asp. Acesso em 25 nov. 2016.
- [3] Blecher B., Açaí Mobiliza no Pará uma Série de Atividades Econômicas e Culturais. Documentário, direção de produção de Maria Luíza Silveira. Cametá-PA: Globo Rural, 2016.

- [4] Brasil. Lei 12.815, de 05 de Junho de 2013. Dispõe sobre a exploração direta e indireta pela União de portos e instalações portuárias. Diário Oficial da União. Brasília, DF, 28 jun. 2013.
- [5] Fadda E. 2012. “Instrumentos Legais Aplicados à Dragagem no Brasil.” *Revista Direito Aduaneiro, Marítimo e Portuário* 6, 1-17.
- [6] IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Formação Administrativa do Município de Cametá 2016. Disponível em: <http://www.cidades.ibge.gov.br/painel/his-torico.php?codmun=150210>. Acesso em: nov. 2016.
- [7] Marinha do Brasil. Carta 4362 – Da Ilha de Jorocazinho a Mocajuba. Tocantins (2009).
- [8] Martins L., Brasil fica em 75º no Ranking do IDH, atrás do Sri Lanka 2015. Disponível em: <http://brasil.estadao.com.br/noticias/geral,brasil-fica-em-75-no-ranking-do-idh--atras-do-sri-lanka-10000004754>. Acesso em: nov.2016.
- [9] Mesquita P.. Terminais de Uso Privado. Disponível em: <http://www.portosdobrasil.gov.br/assuntos-1/investimentos/terminais-de-uso-privado>. Acesso em 26 nov. 2016.
- [10] Ministério da Integração. Rotas de Integração Nacional – Compreenda. 2014. Disponível em: <http://www.mi.gov.br/entenda-as-rotas>. Acesso em 26 nov.2016.
- [11] Pagliarussi, M. 2010. *A Cadeia Produtiva Agroindustrial do Açaí: Estudo da Cadeia e Proposta de Modelo Matemático*. São Carlos: USP, Curso de Engenharia de Produção.
- [12] Park Nam-Kyu, Yoon Dae-Gwun, Park Sang-Kook 2014. “Port Capacity Evaluation Formula for General Cargo.” *The Asian Journal of Shipping and Logistics* 30(2), 175-192.
- [13] Tokarski, A. 2007. *Hidroviás Brasileiras*. Maceió: ANTAQ.





Stellar Interiors from Luminothermic Modeling:

A Pedagogic Approach

Nilo Serpa, Ph.D., research engineer in cosmology and quantum gravity

GAUGE-F Scientific Researches, Brazil; Faculdades ICESP.

Received: 20 Nov 2016 __ / Accepted: 02 Apr 2017 __ / Published: 16 Jun 2017 __.

Abstract: The teaching of astronomy in Brazil has primacy for the quality and objectivity, both in the undergraduate and graduate schools, especially in the classrooms of the School of Astronomy at the Valongo Observatory, belonging to the Federal University of Rio de Janeiro. However, and this is a generalized fact in the process of teaching/learning at all levels, there is not much incentive in Brazil to develop the capacity of one freely mine a problem and propose an original solution. The requirements are very much about what is already known, without giving space and time to the fundamental questions underlying the current astrophysical and cosmological models. As a consequence, very little real contribution comes out from our offices and instruments. This pedagogical article is an attempt to show how to propose an original approach to teaching and to exercise freedom of thought in the search of the main elements for the construction of knowledge about the basics on stellar interiors, an issue far more theoretical than one can imagine at first. Also it summarizes aspects and results arising from simulations on polytropic models. The simulations emerged from what I called "luminothermic fitting". The study was developed on the comparison between the adaptive stellar interior model given by Novotny (1973) and the toy model constructed from a FORTRAN program, introducing initially the same parameters. I considered the abundances of hydrogen (X) and metals (Z) worth 0.70 and 0.02 respectively.

Key words: polytropic star, stellar interior, opacity, thermodynamic equilibrium, luminothermic fitting.

Nomenclature

G : gravitational constant

P : pressure

$M(r)$: global mass as a function of the stellar radius

Greek letters

$\rho(r)$: density as a function of the stellar radius

σ : Stefan-Boltzmann constant

1. Introduction

Doing well to characterize present model as a "toy" model, I remember that, although modern stellar evolution models contain much more physics details, the

Corresponding author: Nilo Sylvio Costa Serpa, Ph.D., Professor, research fields: quantum gravity, quantum computing, cosmology and thermal systems engineering. E-mail: nilo.serpa@icesp.edu.br.

empirical limits remain the same: nobody went inside a star to measure its physical properties; stars are tremendously turbulent bodies and unimaginably hot. Apart the emerging field of asteroseismology [9], enabling us to perform a more direct observational study of stellar interiors, the inner side of the stars are effectively unseen to external observers, so that all the information we receive from them originates in their atmospheres. Everything we really have is a consistent set of hypotheses and presuppositions based in great part on very simplistic propositions; such propositions were applied and treated in the classical literature ([3], [4], [11], [13]). Of course, there are milestone works on stellar structure elsewhere that deal with the subject in great depth ([1], [2], [5], [6], [7], [8], [9], [10], [12]). Thus, what I shall explain is a simple and heuristic mathematical model to undergraduate students in order to aim them to construct the first knowledge on stellar astrophysics. I strongly recommend to the students the textbook introduction on the basic elements of fundamental astronomy and astrophysics by Bohm-Vitense (1992) [3], mainly the first half of the book 1, explaining how stellar radii, luminosities, masses and temperatures are measured or deduced.

The study of stellar interiors has the aim to determine the internal variation of the main physical properties of the stars. To simplify this difficult task, we introduce some approximate representations to quantify the physics within these wonderful objects. Combining the general polytropic modeling with few additional assumptions, we can obtain beautiful and consistent results.

The concept of polytropic star refers to very simplified models about the internal variability of the main properties of the stars as we shall see ahead. Such models are represented by systems of equations that express the relevant physical processes related to those properties. The simplified character of these models allows one to obtain analytical or numerical solutions for the representative equations, solutions which describe the variations in question.

In stellar interiors it is supposed that 1) - conditions change slowly over many photon mean free paths and 2) - stellar matter is close to local thermodynamic equilibrium. These assumptions lead to a step-by-step smooth transition of state, becoming simple the integration of the transfer equation. Despite the fact that this is a job with a high degree of uncertainty, the determination of temperature is crucial in stellar physics, both to locate the star in the HR diagram and to support studies on abundances and gravity. So, once we consider the mass and chemical composition fixed, the challenge I took was to obtain from a certain FORTRAN program (named Interior2007, implemented at Valongo Observatory, 2007) a realistic model of stellar interior by the adjustment of the effective temperature, preserving the dimensions of the object and the surface density by the concomitant adjustment of luminosity. This kind of tuning was called luminothermic fit. This option seemed quite reasonable when you consider that in the chosen example, the error in the stellar radius remained on average below 5%. The distancing of the initial temperature was within two orders of magnitude, being quite understated. Also the decay of the radial luminosity remained over a gentle relaxation.

The idea of including changes in the program Interior2007 in order to make realistic models of stellar interiors by luminothermic adjustment, with no change in radius, mass or surface density, is perfectly feasible for simulations with low error in the radius and, at least in principle, for stars with masses not much larger than the Sun, that is, stars having surface temperatures of a few thousand degrees Kelvin. Although I have no rights over the distribution of the FORTRAN program used, I do not see difficult to build a similar code in any other language for the calculations discussed here, easily found in the literature mentioned at the end of this article.

It is noteworthy that the luminothermic fit does not intend in any way to exhaust the subject, just start the complex task of building feasible models.

2. Methodology

The prior existence of a temperature gradient in the star is the guaranty that the flow of energy in one direction overcomes the energy flow in the opposite direction, generating a resulting non-zero stream-oriented from the hottest regions to the cooler. In addition, among the three different mechanisms by which this flow of energy can be realized — radiation, conduction and convection —, radiation is by far the most important.

2.1 - The essential on polytropic approach

An extensive discussion on polytropic models was made in my doctoral thesis [14], from which I reproduce here a fragment. To understand the degree of simplification of the theory in focus, we should start from the premise of the hydrostatic equilibrium, according to which the force of gravity and the pressure across the layershell with radius r obey the stationary condition

$$\begin{cases} \frac{dM(r)}{dr} = 4\pi r^2 \rho(r) \\ \frac{dP}{dr} = -\frac{GM(r)\rho(r)}{r^2}, \end{cases} \quad (1)$$

from which we deduce, for a spherical star,

$$\frac{d}{dr} \left(\frac{dP}{dr} \frac{r^2}{\rho} \right) = -4\pi Gr^2 \rho. \quad (2)$$

In present explanation, P is the pressure, $\rho(r)$ is the density at radius r , $M(r)$ is the global mass at radius r , and G is the usual gravitational constant. From the second equation of the system (1),

$$\frac{r^2}{G\rho(r)} \frac{dP}{dr} = -M(r);$$

$$\begin{aligned} -\frac{dM(r)}{dr} &= \frac{r^2}{G\rho} \frac{d^2 P}{dr^2} + \frac{2r}{G\rho} \frac{dP}{dr} - \frac{r^2}{G\rho^2} \frac{d\rho}{dr} \frac{dP}{dr}; \\ \frac{r^2}{G\rho^2} \frac{d\rho}{dr} \frac{dP}{dr} - \frac{r^2}{G\rho} \frac{d^2 P}{dr^2} - \frac{2r}{G\rho} \frac{dP}{dr} &= 4\pi r^2 \rho(r); \\ \frac{r^2}{\rho^2} \frac{d\rho}{dr} \frac{dP}{dr} - \frac{r^2}{\rho} \frac{d^2 P}{dr^2} - \frac{2r}{\rho} \frac{dP}{dr} &= 4\pi Gr^2 \rho. \end{aligned}$$

But,

$$\begin{aligned} \frac{d}{dr} \left(\frac{dP}{dr} \frac{r^2}{\rho} \right) &= \frac{d^2 P}{dr^2} \frac{r^2}{\rho} + \frac{2r}{\rho} \frac{dP}{dr} - \frac{dP}{dr} \frac{r^2}{\rho^2} \frac{d\rho}{dr}; \\ \frac{d}{dr} \left(\frac{dP}{dr} \frac{r^2}{\rho} \right) &= -4\pi Gr^2 \rho. \end{aligned} \quad (3)$$

Following, since the equation of state that describes the polytropic star has the form $P = K\rho^{1+1/n}$, with n (the polytropic index) and K being constants throughout the star,

$$\begin{aligned} \frac{dP}{dr} &= \frac{n+1}{n} K \rho^{1/n} \frac{d\rho}{dr}; \\ \frac{d}{dr} \left(\frac{n+1}{n} K \rho^{1/n} \frac{d\rho}{dr} \frac{r^2}{\rho} \right) &= -4\pi Gr^2 \rho; \\ \frac{d}{dr} \left(r^2 \rho^{-1} \rho^{1/n} \frac{d\rho}{dr} \right) &= -\frac{n}{n+1} \frac{4\pi Gr^2 \rho}{K}. \end{aligned} \quad (4)$$

To establish the boundary conditions of the problem, it is interesting to adopt the following replacements:

$$r = ax, \quad \rho = by^n.$$

To the center of the star, $r \rightarrow 0$, $x \rightarrow 0$. In these circumstances, it is convenient that $y \rightarrow 1$, so that

$$\rho = \rho_c y^n \rightarrow \rho = \rho_c \quad (\text{at the center}).$$

$$\frac{1}{x^2} \frac{d}{dx} \left(x^2 \frac{dy}{dx} \right) = -\frac{4\pi G}{K} \rho_c^{\frac{n-1}{n}} \frac{y^n}{n+1} a^2.$$

Similarly, for the surface we have

$$r \rightarrow R, x \rightarrow x(R) = R/a,$$

$$\text{with } \rho \rightarrow 0 \quad (y \rightarrow 0).$$

These new variables must be substituted in equation

$$\frac{d}{dr} \left(r^2 \rho^{-1} \rho^{1/n} \frac{d\rho}{dr} \right) = -\frac{n}{n+1} \frac{4\pi G r^2 \rho}{K}, \text{ in such}$$

manner that

$$dr = a dx,$$

$$\frac{1}{a} = \frac{dx}{dr},$$

$$\frac{1}{a dx} = \frac{1}{dr},$$

and

$$\frac{d\rho}{dr} = \frac{d\rho}{dy} \frac{dy}{dr} = n \rho_c y^{n-1} \frac{dy}{dr} = n \rho_c y^{n-1} \frac{dy}{a dx},$$

we have

$$\frac{d}{a dx} \left(a^2 x^2 \rho^{\frac{1}{n-1}} n \rho_c y^{n-1} \frac{1}{a} \frac{dy}{dx} \right) = -\frac{n}{n+1} \frac{4\pi G r^2 \rho}{K};$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{a dx} \left(a^2 x^2 (\rho_c y^n)^{\frac{1}{n-1}} n \rho_c y^{n-1} \frac{1}{a} \frac{dy}{dx} \right) &= \\ &= -\frac{4\pi G}{K} \frac{1}{n+1} a^2 x^2 \rho_c y^n; \end{aligned}$$

$$\frac{d}{a^2 dx} \left(x^2 \rho_c^{\frac{1-n}{n}} \underbrace{y^{1-n} y^{n-1}}_1 \frac{dy}{dx} \right) = -\frac{4\pi G}{K} \frac{1}{n+1} x^2 y^n;$$

For formal convenience, it is necessary that

$$a^2 = \frac{(n+1)K}{4\pi G \rho_c^{\frac{n-1}{n}}},$$

which leads to $\frac{4\pi G}{K} \rho_c^{\frac{n-1}{n}} \frac{a^2}{n+1} = 1$. Therefore,

$$\frac{1}{x^2} \frac{d}{dx} \left(x^2 \frac{dy}{dx} \right) = -\frac{4\pi G}{K} \rho_c^{\frac{n-1}{n}} \frac{y^n}{n+1} a^2,$$

reduces to

$$\frac{1}{x^2} \frac{d}{dx} \left(x^2 \frac{dy}{dx} \right) = -y^n;$$

$$\frac{1}{x^2} 2x \frac{dy}{dx} + \frac{1}{x^2} x^2 \frac{d^2 y}{dx^2} + y^n = 0;$$

$$\frac{d^2 y}{dx^2} + \frac{2}{x} \frac{dy}{dx} + y^n = 0. \quad (5)$$

The solution of this last equation, called the Lane-Emden equation, determines the internal structure of the polytropic stars. Polytropic modeling of stars is closely related to predictions provided by Eddington's assumption that gas pressure and radiation (pushing everything outward the star), and gravity (pulling everything toward the center of the star) establish an internal stellar balance. Eddington's theory works with pressure, temperature and density, linked by the law of perfect gases. However, it is important to note that Lane-Emden equation is deduced without any considerations about the transport of energy in question because it assumes that this transport is implicitly determined by the polytropic equation itself.

2-2. The simulations

In general, all simulations performed were done by the same way. The initial step was to match the table of Novotny with the tables generated by the FORTRAN program, using as key-field the radius of the first table, obtaining by approximation the best correspondence between the registers and keeping the average error in radius $< 5\%$. The first generations of tables showed quantities without physical meaning, such as negative luminosities. Assuming the polytropic approach and the application of the luminothermic fitting, that is, the tuning of luminosity and effective temperature, the iterations have taken place until the complete eradication of inappropriate quantities. Thereafter, my work focused on the establishment of the combined values of L and T_{eff} , so that I got as better luminothermic approach to the Novotny modeling the hereunder scenario:

- 1) $M = 1M_{Sun}$;
- 2) $L = 0.38L_{Sun}$;
- 3) $R = 1.0763R_{Sun}$;
- 4) $T_{eff} = 3380^\circ\text{K}$;
- 5) $\rho_s = 0.002146$ (at the surface);
- 6) $X = 0.70$;
- 7) $Z = 0.02$.

The luminosity L of a star, that is, the rate of energy emitted per unit time at all frequencies and directions crossing a spherical surface, is related to the bolometric magnitude $\tilde{M}$ in terms of solar luminosity by the expression

$$\frac{L}{L_{Sun}} = 10^{-0.4(\tilde{M} - \tilde{M}_{Sun})}, \quad (6)$$

where $L_{Sun} = 3.83 \times 10^{33} \text{ erg} / \text{s}$.

The effective temperature is given by

$$T_{eff}^4 = \frac{\pi}{\sigma} \int B_\nu(T) d\nu,$$

where ν is the frequency and $B_\nu(T)$ is the Planck function according to

$$B_\nu(T) = \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{1}{e^{h\nu/kT} - 1},$$

with h being the Planck constant, c the velocity of light and $k = 1.38 \times 10^{-16} \text{ erg/K}$. The Stefan-Boltzmann constant is defined as

$$\sigma = 5.67 \times 10^{-5} \text{ erg cm}^{-2} \text{K}^{-4} \text{s}^{-1}.$$

The above scenario refers to a reddish star, colder, therefore, than the sun, but with the same mass occupying a volume a bit higher. Due to this small volume difference, it did not seem unreasonable the searching for a viable model without changing the weight-spatial dimensions of the Novotny model.

The interior modeling was extremely sensitive to luminothermic variations. A small change in effective temperature or luminosity was sufficient to cause physical inconsistencies. Thus, it was necessary to integrate the magnitudes involved repeatedly for fixed values of luminosity and effective temperature very close to each other, until the rescue of consistent scenarios. Additional comparative tests with the same basic results, however, not published here, were made for a similar luminothermic model, assuming $L = 0.578 L_{Sun}$ and $R = 1.021 R_{Sun}$ (Schwarzschild, 1965).

3. Results

Figures 1, 2 and 3 show qualitatively reasonable values for density, temperature and pressure by comparing the toy model with the Novotny model, highlighting the moderate discrepancy in the values close

to the center. Indeed, the betterment of the central discrepancy occurred with the reduction in surface luminosity concomitant to the reduction in effective temperature, although it is risky to say without more accurate investigations this continues to happen for cooler stars maintaining physical sense. A fact is that for a star somewhat weaker, with $L=0.28L_{Sun}$ and $T_{eff} = 2800^{\circ}\text{K}$, this trend of improvement in modeling the central region of stars seems to be confirmed in accordance with the obtained graphics (Figures 11 and 12).

Figure 4 shows a comparison between the temperature curves in both models, but with the inclusion of a logarithmic regression from the toy model. Note that the regression curve gives a reasonable approximation to the Novotny model mainly from the middle of the radius till the surface of the star, serving also as a possible theoretical basis for future implementations in FORTRAN program with respect to the refinement of the modeling of semi-solar stars. The program was modified to produce one more column in the final file containing the logarithmic adjustment to be applied to radial temperature from the toy model (Figure 5).

Figure 6 displays the luminosity curve of the Novotny model, showing semi-logistic shape. Notice that although a range of values is not properly adjusted by the FORTRAN program, the luminosity in toy model shows a similar way (Figure 7) and fits very well to a sixth order polynomial regression. Unlike the logarithmic regression, which was applied as a good approximation to many luminothemic variations in a range of effective temperatures from 2600°K to 6600°K , no exhaustive tests were done in this study on the polynomial regression of luminosity in other semi-solar stars.

Figure 8 fits gas pressure and radioactive pressure in the toy model, while Figure 9 shows that the electron scattering dominates as an opacity¹ factor only in a very

short fraction of the radius (0.1%), and was immediately supplanted by the bound-free transition and then by free-free transition at 8% of the radius.

Figure 10 shows the rates of energy generation over the temperature with a sensitive record of the viability of the CNO cycle from approximately $2 \times 10^7 \text{K}$, corresponding to a fraction of the radius of about 10% from the center. As might be expected, the proton-proton chain seems the more important rule valid for stars of mass less than or equal to the solar mass.

4. Conclusion

Despite the fact of the great complexity of stellar interiors, due to the high degree of interdependence of the variables in question, this article showed the possibility of simplifications in the initial study of stars with semi-solar dimensions, analyzing a hypothetical structure clearly plausible. Although qualitatively reasonable results have been found, I cannot guarantee that the program FORTRAN be able to properly emulate all the data of Novotny because of some functional differences found in the simulations produced. Better luminothemic approximations can be consummated with superior computational resources to allow parallel simulations to high processing speeds, even capable of performing real-time covariant analysis of the impact caused by small simultaneous changes in the values of each intervening variable. I suggest to those interested in astrophysics the experience with similar initiatives, though their academic environments may not be very enthusiastic for creative and independent research.

5. References

- [1] Benz, A. 2002. *Plasma Astrophysics: Kinetic Processes in Solar and Stellar Coronae*. Kluwer Academic Publishers, New York.

¹ Opacity, or transparence, is an important property of the stellar medium, determining the efficiency of the energy transport by

photons from the inner shells of the star. A good approach on opacity is given in reference [12].

- [2] Boer K. S. de, Seggewiss, W. 2008. *Stars and Stellar Evolution*. EDP Sciences, France.
- [3] Bohm-Vitense, E. 1992. *Introduction to Stellar Astrophysics*. Cambridge University Press, vols. 1, 2 and 3.
- [4] Chandrasekhar, S. 1938. *An Introduction to the Study of Stellar Structure*. The University of Chicago Press, Illinois, USA.
- [5] Collins, II, G. 2003. *The Fundamentals of Stellar Astrophysics*. Case Western Reserve University, Ohio, USA.
- [6] Guzik, J. 2010. "Recent Advances in Modeling Stellar Interiors", arXiv:1005.5406.
- [7] Hansen, C., Kawaler, S., Trimble, V. 2004. *Stellar Interiors: Physical Principles, Structure and Evolution*. Springer-Verlag, New York, USA.
- [8] Kippenhahn, R., Weigert, A. 1994. *Stellar Structure and Evolution*. Springer-Verlag, Berlin.
- [9] Leblanc, F. *An Introduction to Stellar Astrophysics*. John Wiley & Sons, Sussex, UK.
- [10] Maciel, W. 2016. *Introduction to Stellar Structure*. Springer International Publishing, Switzerland.
- [11] Novotny, E. 1973. *Introduction to Stellar Atmospheres and Interiors*. Oxford University Press, 2nd edition.
- [12] Rogers, F., Iglesias, C. 1994. "Astrophysical Opacity", *Science*, New Series, vol. 263, n° 5143, 50-55.
- [13] Schwarzschild, M. 1965. *Structure and Evolution of the Stars*. Dover, 2nd edition, New York.
- [14] Serpa, N., *Sur l'Entropie Contrôlée des Systèmes [..]*. Ph.D. Thesis, L'Université Libre des Sciences de L'Homme de Paris, 127p (2014).

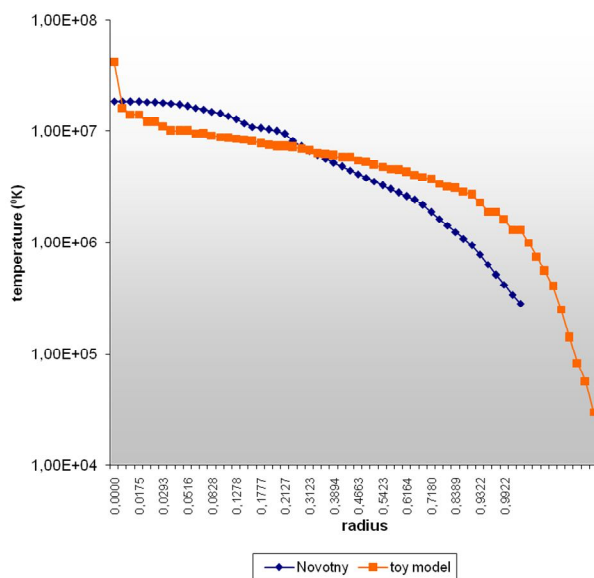


Figure 1- Temperature in Novotny and in the toy-model.

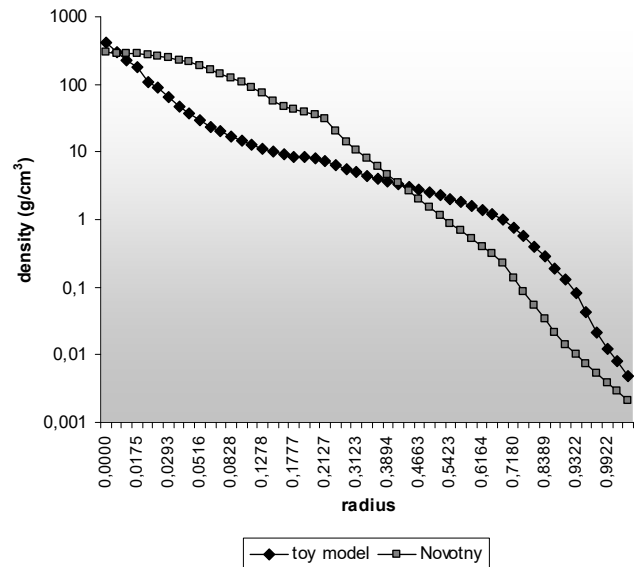


Figure 2 - Density in Novotny and in the toy-model.

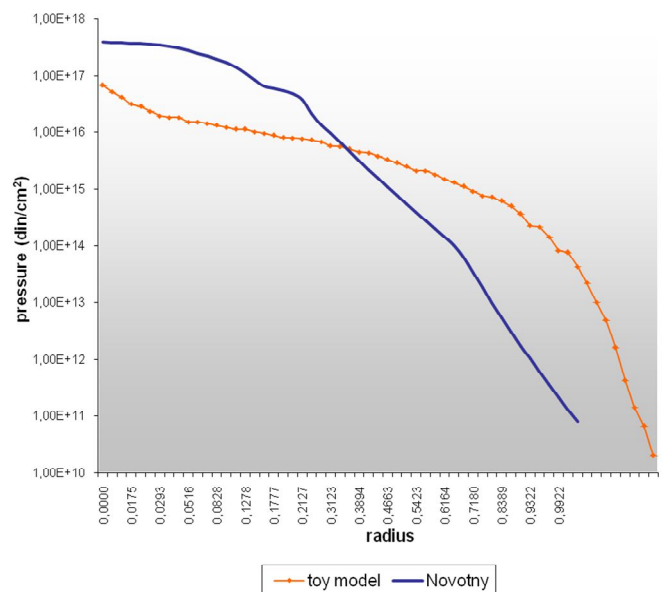


Figure 3 - Pressure in Novotny and in the toy-model.

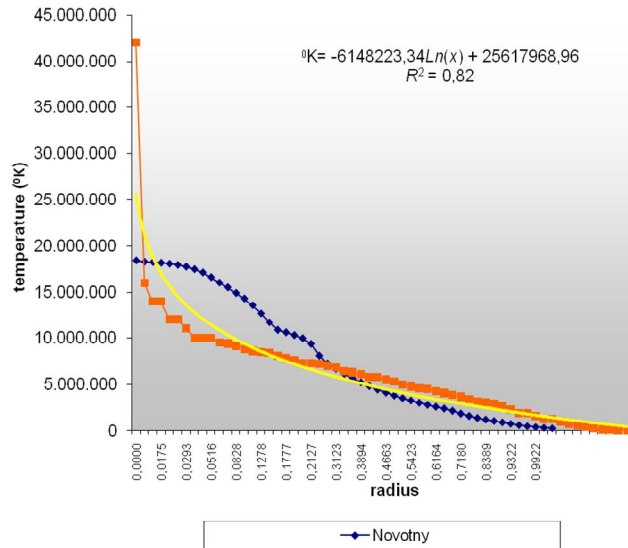


Figure 4 -Temperature in Novotny and in the toy-model with logarithmic regression from the latter.

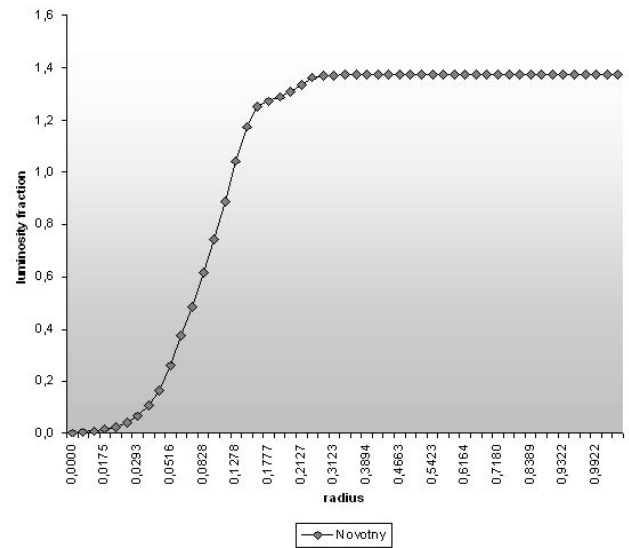


Figure 6 - Luminosity in Novotny.

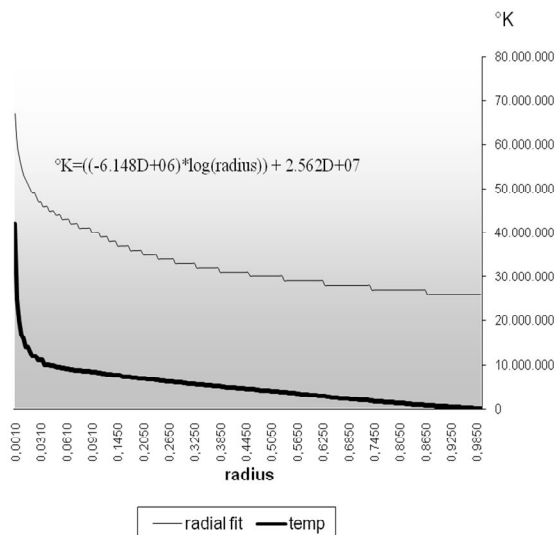


Figure 5 - Logarithmic radial fit for temperature accordingly the toy-model.

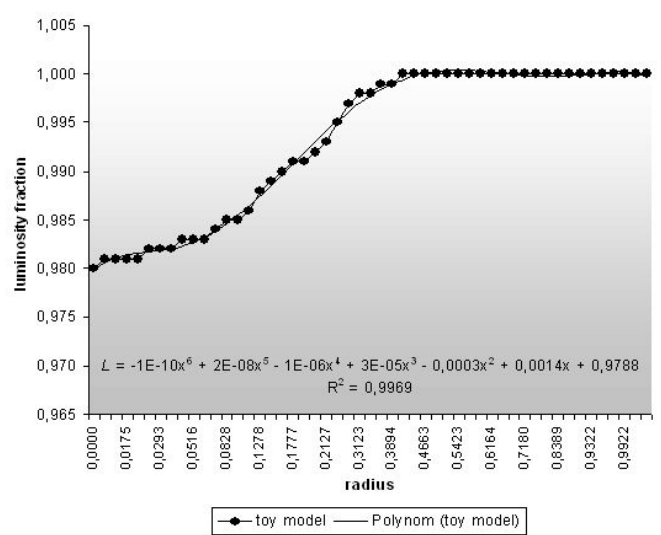


Figure 7 - Luminosity in the toy model with polynomial regression of 6th order.

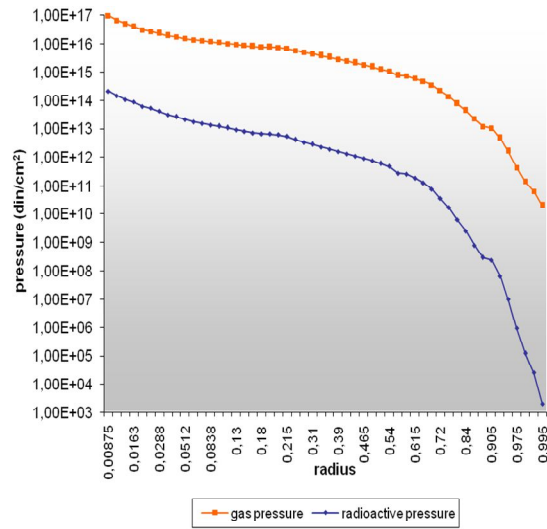


Figure 8 - Gas pressure and radioactive pressure in the toy model.

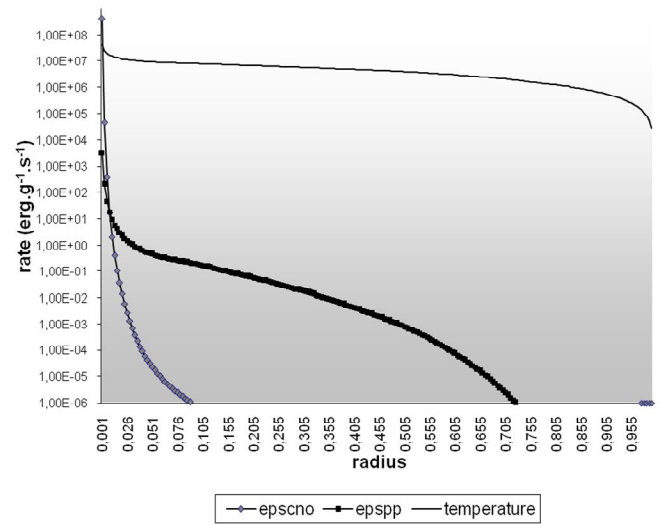


Figure 10 - Energy production in the toy model.

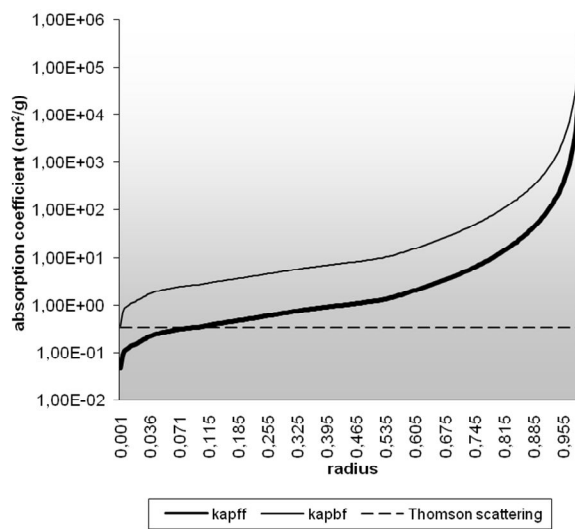


Figure 9 - Opacity in the toy model.

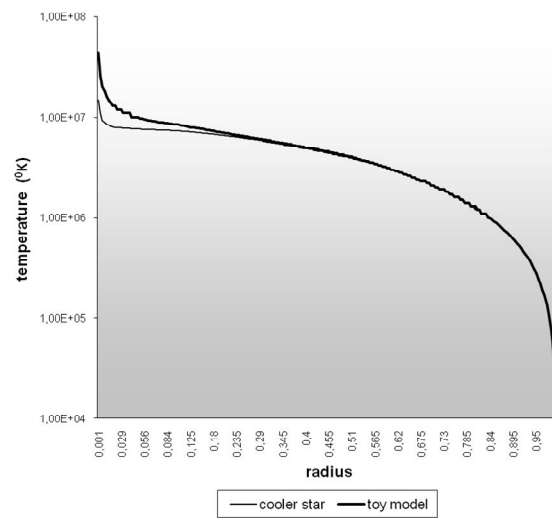


Figure 11 - Temperature in the model with $L=0.28L_{sun}$ and $T_{eff}=2800^{\circ}K$, and in the toy model.

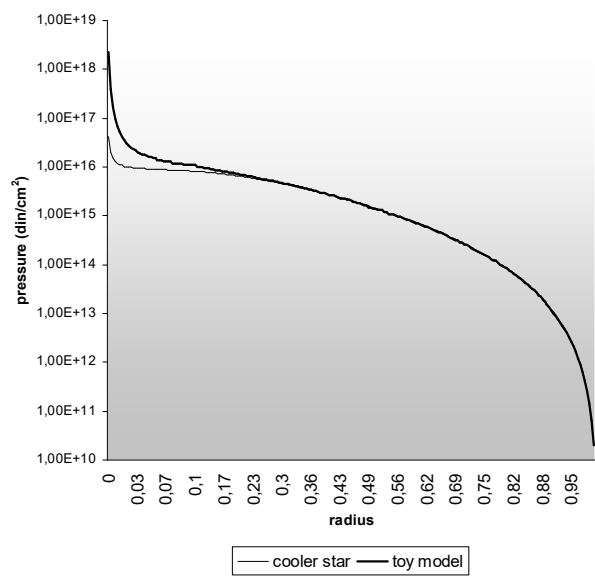


Figure 12 - Pressure in the model with $L=0.28L_{Sun}$ and $T_{eff}=2800^{\circ}K$, and in the toy model.





Des Mémoires Turkestans: la Terraformage du Bassin de la Mer d'Aral et la Guerre Silencieuse pour l'Eau

Nilo Sylvio Costa Serpa

GAUGE-F Scientific Researches, Brazil; Faculdades ICESP.

Received: 28 April 2017 ___ Accepted: 22 May 2017 ___ Published: 16 Jun 2017 ___.

Abstract: This article discusses the concept of terraforming applied to Earth itself, in particular to the Aral Sea basin. Historical and geological approaches, as well as personal travel notes, form the general storyline on which analyzes and proposals are presented. Environmental and geopolitical considerations on the situation of the freshwater resources in Central Asia are made based on the current local policies. Fundamental guidelines of terraforming under geoengineering are prescribed.

Key words: Aral Sea, terraforming, environment, freshwater.

Concept-clé

Terraformage: l'application de technologies sur un environnement inhospitalier pour le rendre habitable.

Symbologie

$\omega(q, t)$: l'intervention humaine à réduire les impacts environnementaux

$H(\omega)$: l'entropie produit par des activités anthropogéniques

$W[\omega(q, t)]$: l'énergie dissipée par l'intervention humaine

$g[\omega(q, t)]$: la densité de probabilité d'un $\omega(q, t)$

Prologue — Creation of an Anthropogenic post-Aralkum lake!

Half a century past, the Aral Sea was Earth's 4th largest lake by area; nowadays it barely exists and is certainly unworthy of the toponym "Aral Sea"—just one of the ~100 million lakes that cover about 2% of the our planet's sub-aerial landscape. Whereas Lake Chad¹ in northern Africa evaporated markedly due to a long-span of natural regional climate regime change, Earth's current "Aral Sea" is entirely man-made (excessive induced diversion of its feeding rivers to irrigate commercial crops such as cotton). There is, thus, a chance that humans may decide, and instigate an engineered trend reversal by Dr. Nilo S. C. Serpa's

Corresponding author: Nilo Sylvio Costa Serpa, Ph.D., professor, research fields: quantum gravity, quantum computing, cosmology and thermal systems engineering. E-mail: niloserpa@gmail.com.

¹ Okpara, U. et al. 2017. "Using a Novel Climate-Water Conflict Vulnerability Index to Capture Double Exposures in Lake Chad." *Regional Environmental Change* 17, 351-306.

“terraforming”. Since it is unlikely that irrigated farms will ever revert entirely to wildlands, thus increasing the volume of the natural river runoffs, it is more probable that freshwater ought to be imported via pipelines or canals from the Caspian Sea to the eye-offensive and unhealthy-for-humans anthropogenic desert region to enlarge, deepen as well as revivify a simulacrum of the Aral Sea as it was known fifty years ago! Bravo Dr. Serpa!

Richard Cathcart

21/05/2017

1. Introduction

Un nouveau désert a remplacé l'un des plus grands lacs du monde, la mer d'Aral. Ce phénomène tend à se répéter travers la planète, face à la mauvaise gestion environnementale que nous avons vu. En outre, les dernières décennies ont été marquées par des changements climatiques mondiaux, qui ont peut-être affecté la dessiccation de ce grand lac salé. Ce qui rend la mort de l'Aral si choquant sont la dévastation socio-économique causé et l'avenir ténébreux qui restait aux habitants de la région. Dans cet environnement vraiment fantomatique vivent encore des gens qui se cramponnent à leurs traditions et qui ont reçu la négation d'un avenir décent.

Je crois que l'humanité ne fait pas ce qu'il faut faire si elle ne veut pas le faire. Je voudrais commencer cet article avec un petit regard sur la vie quotidienne du peuple Karakalpak, avec la conviction que cette approche peu commune donnera au lecteur un contexte sérieux pour les idées discutées ci-dessus.



Les sables du Aralkum

I

Chaque matin, je pouvais voir Ephrael Bayrunov, avec sa toux chronique, balayer la poussière de sel toxique de la porte. Peu de temps après, sa femme battait le tapis de prière. Bashira Bayrunova avait un corps mince. Les yeux ouzbeks semblaient sourire quand le vent froid soufflait sur la face angulaire. La même rituel du matin faisaient leurs voisins, Fezza Omarin, un homme seul, et Rashid Azerbaev avec Tashmena Azerbaeva. Il était fin de l'automne.

II

La température fluctuait. Ce matin-là, en particulier, le vent de sel était glacée. Lorsque la poussière retombée, vers midi, un filet bleu pâle était visible à l'horizon, loin derrière les carcasses de vieux navires échoués sur les sables du Aralkum. Le filet bleu pâle était en fait tout ce qui restait de la côte de la mer d'Aral, ou *Orol dengiz* pour les ouzbeks. J'avais visité le rivage de la mer sur une plage de petites vagues, un lieu oublié qui certainement durerait peu (je me souvins du travail d'Elisée Reclus). Un chacone pour luth du Vieux Gaultier chantait à ma mémoire, pendant que je marchais près du rivage (quelle pensée réconfortante de savoir que mes luths fragiles étaient dans un endroit sûr, loin de ce chaos climatique!). Dans mes voyages, j'ai toujours choisi des musiques qui soulèvent l'esprit et apportent des émotions d'espoir, principalement en des contextes dépressifs. Ce n'est pas si facile, car une simple note musicale peut changer l'humeur à la tristesse. Mais Gaultier était un brillant compositeur baroque français, un géant de la musique pour luth, ainsi que Mouton ; si de tels géants voulussent composer tristement, ils le feraient dans un style génial, pas avec une simple note.

Il était terrible de penser comment il aurait été magnifique la plage primitive, actuellement si défigurée. Je me souviens qu'il y avait une belle fille, avec de longs cheveux noirs, et un enfant, les genoux des deux dans l'eau insalubre. Il y avait aussi une camionnette rouge garée à quelques mètres derrière (je ne sais pas quoi que ce soit sur les marques des voitures, mais celle-ci semblait être de fabrication russe). C'était une scène irréaliste, comme un rêve sur un rubis dans la poussière (toujours le grand Neil Young!). Je ai su plus tard que le nom de la jeune était Durdona² Zelmanova, avec son petit frère Alexey Zelmanov. Je ne verrai jamais à nouveau la jeune fille, « la belle de jour », ni la mer.

III

Lorsque je suis retourné au village, j'ai réalisé mon passage au cauchemar de la réalité, seulement atténué par l'amitié de mes hôtes. Dernièrement, ceux voisins se sont consacrés à fabriquer des tapis en laine de chameau. Omarim était un pêcheur au moment où les familles russes arrivaient avec leurs enfants pour jouer à la plage. De l'homme robuste et bon enfant du passé, ne restait plus que un vieux triste, meurtri par l'arthrite. Parfois, avec des mains presque rigides, il était difficile pour lui de passer les pages du Coran. Mais, même ainsi, il faisait le travail moins détaillé des tapisseries.

Il y avait dix jours de ma présence dans cette steppe mélancolique, et bientôt je retournerais à Paris. Comme l'eau de la région est très contaminée, deux tiers de mes bagages consistaient en eau. Je l'avais déjà consommé près de la moitié, et mes amis géologues viendraient me trouver seulement dans deux jours. Mais, en voyant mon hôte me servir un déjeuner si spécial, il était impossible pour moi ne pas offrir ma bonne eau. Bien que je ne parlasse pas couramment la langue ouzbek, je comprenais les phrases, et, d'un peu de patience de mes auditeurs, je répondais avec une bonne prononciation.

« Cela fait longtemps que je ne boivent pas l'eau pure! », a déclaré Omarin à son ton grave et rauque. « *Salomatlik tilayman!* » (Je vous souhaite la santé), j'ai dit en mon ouzbek hésitant. Nous avons déjeuné une *kabob* de hareng merveilleux. Le hareng est venu d'un marché du poisson en Aralsk (je me avaient apporté le hareng salé) et était devenu une délicatesse rare.

IV

La nuit était tombée sur le désert. Il n'y avait pas beaucoup à faire le soir, de sorte que nous avons décidé d'aller au lit. Le vent poussiéreux avait cessé et le temps était agréable à l'intérieur de la modeste maison. Couché, je pouvais voir la figure du beau dutar que Omarim gardé accroché au mur. Luths sont profondément liés aux cultures d'Asie centrale. Une fois, au Turkménistan, j'ai vu un homme jouant un dutar en bois mûrier, l'un des primitives primes du luth européen moderne. Je me suis rappelé les raisons qui me avaient conduit à ce monde tout hostile et accueillant; la curiosité de l'enfance lointaine toujours vivante dans mon esprit, la soif de comprendre et de dire quelque chose d'utile. Je me rappelais d'un passage de Valéry: « Un jeune homme, curieux de mille choses, ne doit-il pas, après tout, ressembler assez bien à un homme de la Renaissance ? ». Et en effet, en tant que physicien théorique et philosophe de la science, beaucoup de choses ont été dans mon domaine d'intérêt. Cependant, je ne voulais pas que mes hôtes me considérassent comme un simple curieux sensationnaliste. Mon objectif était de recueillir des informations pour construire ma thèse de terraformer la Terre elle-même, en donnant priorité au bassin de l'Aral. La recherche n'a pas été motivé par des intérêts académiques, mais par des idéaux humanitaires qui pourraient être réalisées dans un réseau international regroupant différents branches de recherche, sur divers aspects scientifiques.

² Durdona signifie « perle » en ouzbek.

V

J'ai toujours gardé une attitude créative avec la réalité. Il n'a pas été pour rien que Bachelard et Valéry faisaient partie de mes lectures de routine plus poétiques et philosophiques, ainsi que Reclus en géographie. Mais Valéry a apporté une idée inquiétante: « Tout savoir ne vaut que pour être la description ou la recette d'un pouvoir vérifiable. Dès lors tout métaphysique et même une théorie de la connaissance, quelles qu'elles soient, se trouvent brutalement séparées et éloignées de ce qui est tenu, plus ou moins consciemment, par tous, pour seul savoir réel,— *exigible en or* ». De fait, un pouvoir vient d'un certain savoir. Mais le savoir métaphysique de la pensée théorique, des abstractions infinitésimales, des énergies qui sont convertis les uns dans les autres au cœur d'une thermodynamique inévitable, est aussi le fondement d'un pouvoir supérieur et libérateur intime; la frivolité de l'homme n'a pas d'importance; le cœur brûle dans une flamme bleue, mais la raison atténue le feu avec la brise fraîche d'une logique ineffable. Tel est l'objectif ultime de la philosophie: perfectionner nos idées pour équilibrer la raison et le désir. Ainsi, le pouvoir monstrueux qui fait disparaître la mer ne provenait pas d'un savoir véritable; il est venu d'un vide sombre, où se trouve la négation du monde. Car, le savoir véritable conduit à ce qui est mieux chez les hommes. La doctrine de la domination, si bien élucidé par Hitler dans son exclamation « Quelle veine, pour les hommes qui ont le pouvoir, que les personnes ne pensent pas! », est restée par les gouvernements d'après-guerre, et à ce jour, bien noté au Brésil dès le début du XXI^e siècle.

Au nom d'un faux savoir, hommes de mauvais caractère ont imposé leur volonté aux gens crédules. Et puis, les hommes égoïstes ont décidé sur ce qui était important pour ses carrières politiques. Comme l'a dit Sagan, « Si l'action nécessaire pour améliorer la situation pourrait être incluse dans les programmes de deux, quatre ou six ans, les politiques donneraient plus de

soutien, car alors les avantages politiques pourraient apparaître dans les prochaines élections ». Le monde a souffert avant cette égocentrisme.

VI

Voici un exemple de l'héritage de la civilisation. Berceau de chevaliers fauconniers fantastiques, passage obligatoire des commerçants exotiques, patrie des grands tapissiers, maintenant fouettée par les vents de sel, le Turkestan suit son destin pleine d'incertitudes. En dépit de toutes les souffrances, mes hôtes étaient toujours en essayant de sourire. Non sans raison, ces personnes avaient adopté une vision pessimiste sur le présent et l'avenir. Bayrunov n'a pas été une exception ; quand je lui ai demandé comment je pouvais arriver à Muynak il a répondu: « Pas la peine; en ce lieu il n'y a que la mort ». Beaucoup avaient quitté le village et ont rencontré la mort avec l'épidémie de typhus, à 200 kilomètres au sud. Tashmena, une jeune femme Kazakh, voudrait aller à Aralsk, mais Rashid ne l'a pas fait; pour lui, il était très difficile de quitter la terre de son grand-père. De la même manière pensait Bayrunov, qui, comme je l'ai dit, était un esceptique sur l'avenir de la région d'Aral. Une fois, les journalistes qui visitaient les sables d'Aralkum lui ont demandé s'il y avait une solution pour la région; il a répondu: « Si tous les journalistes qui y viennent apportassent un verre d'eau, l'Aral eût été déjà rempli ». À sa manière, le poète ouzbek Mukhammed Salikh également se lamentait de cette réalité en disant que « Vous ne pouvez pas remplir l'Aral avec des larmes ».

VII

Mes camarades géologues de Kazan, Anitta Polanova e Tulakan Balka, étaient arrivés dans une Lada bleu. Omarim a offert une orge chaude à tous; il parlait des vieux temps de pêche, et comme je connaissais déjà les histoires, je suis allé vérifier mes bagages. Omarim était

un érudit. Il connaissait bien la géologie du Aral, mais croyait naïvement en un retour de la mer, sans doute un paradoxe religieux en raison de son origine musulmane. "Peut-on espérer des jours meilleurs?", il m'a demandé avec un léger sourire. Bien évidemment je n'avais aucune réponse; je me suis contenté de retourner le sourire.

VIII

Le vent froid de sel fouettait le balcon de l'ancien tapissier. Bayrunova fit signe avec son habituel sourire d'oeil. Rashid et Tashmena serrèrent les yeux contre la poussière en agitant les mains. *As-Salamu Alaikum!*, a dit Rashid. *Wa Alaikum As'Salaam-Wu!*, je lui ai répondu. J'ai étendu la main à Ephraël et aux autres, qui me sourirent. Dire adieu n'a jamais été mon point fort, de sorte que j'ai essayé d'être si peu émotif que possible. Mais, j'échoué. Yeux larmoyants, je l'ai fait la salutation musulman à mes nouveaux amis, avant que je disparusse dans la poussière.

*I haven't seen your shores
And touched your surface.
You're still on the maps, as though
You're the last drop on a face...
When my son asks me to tell
Him about your waves,
Should I say you had to swell
Cotton fields tho' it was unsafe?
I cannot even believe
You were large and so deep...
But today you gonna leave
Only sands and rusty ships.*

Абай Құнанбайұлы
(Abai Kunanbaev)



Mon récit décrit brièvement ce qui reste d'une existence remplie de mystères et de légendes. L'histoire de la mer d'Aral ne peut être compté séparément de l'histoire de l'Asie centrale. Cela découle du fait que cette

véritable oasis, sous conditions météorologiques si extrêmes, a accueilli des nomades et a provoqué de nombreuses à devenir sédentaires au cours de temps immémoriaux. Cette mer intérieure a connu l'opulence et la dévastation bien avant l'époque des tsars. Car, l'Aral a constitué la base de l'aurore de nombreuses royaumes du Turkestan.

Un peu de géographie et mésaventures

Le Turkestan est une vaste région de l'Asie centrale comprise entre la mer Caspienne, à l'ouest, et le désert de Gobi, à l'est, étant divisée par des montagnes Tian e le Pamir en Turkestan occidental et Turkestan oriental. La partie occidentale est l'ex-Turkestan soviétique et comprend le Turkménistan, l'Ouzbékistan, le sud du Kazakhstan et le Kirghizistan. Bien qu'il fait également référence à un Turkestan afghan, la partie orientale correspond à l'ancien Dzungarie au nord-ouest de la Chine et à le bassin du Tarin justeau sud. Il est une région d'une grande richesse historique ; après avoir passé par des transformations géophysiques à travers les âges, il a assisté à des invasions, la destruction et la reconstruction civilisatrice.

L'un des sites d'intérêt géographique de cette région éloignée est un grand lac d'eau salée réminiscente des mouvements géologiques qui ont transformé la configuration continentale de la Terre au fil du temps, connu comme «la mer d'Aral ». Ce lac a servi d'oasis au milieu du désert dès le début de la civilisation jusqu'aux années 40 du dernier siècle, quand il a été visité par des hordes de touristes en quête de ses plages calmes et a été la base d'une puissante industrie de la pêche. Mais Staline, un homme entièrement insensible, a fait la guerre à son propre peuple de plusieurs façons; l'une était la destruction du bassin de la mer d'Aral par un projet mégalomane de production de coton. En continuant les délires de Staline, Khrouchtchev a approuvé une irrigation monstrueuse, d'un primitivisme incroyable. Canaux ont été ouverts sans cimentation appropriée,

permettant ainsi l'infiltration d'énormes quantités d'eau gaspillée. Khrouchtchev n'a pas hésité quant à l'avenir des habitants de la région, affirmant, comme d'habitude entre les leaders populistes, que le développement de la culture du coton apporterait la prospérité et l'emploi pour tous. Les résultats d'un tel discours étaient la maladie, la mort et la destruction, sur le fond sinistre d'un paysage plein de désespoir, l'héritage d'une dictature impérialiste telle que le capitalisme lui-même.

Beaucoup a été dit au sujet de la catastrophe écologique provoqué par l'extinction de la mer d'Aral. Des auteurs tels que Kadukin & Klinge (1991), Bos (1995), Glantz (2004), Krivonogov *et al.* (2010), Kostianoy & Kosarev (2010), Badescu & Cathcart (2011), White (2013), Zmijewski & Becker (2014), Micklin (2014), Roy *et al.* (2014), Izhitskiy *et al.* (2016), Opp *et al.* (2017), pour ne citer que quelques-uns, ont exposé l'holocauste environnemental sous différents angles allant de l'analyse hydro-climatologique, en passant par les impacts directs sur le biote Turkestan, et à venir aux résultats sociaux et économiques tragiques qui ont détruit des millions de vies. Ainsi, mon but n'est pas répéter ce qui a déjà été largement explorée, mais réunir un ensemble d'informations diverses qui constituent le cadre de ma discussion sur des questions environnementales et éco-systémiques déterminés par l'apparition d'un désert appelé « Aralkum », ainsi que de l'avenir de la région et de l'eau de notre planète. Une grande partie des déclarations résultent de mes notes prises au cours de mes voyages.

2 Dès l'aube de la civilisation à la destruction totale

Le déclin des corps lacustres est une réalité, pour ainsi dire, mondiale. Le lac Tchad, par exemple, avait une réduction superficielle d'environ 95% entre les années 60 et le début des années 2000, en raison de la réduction des précipitations et d'une augmentation insoutenable de l'irrigation (Lasserre & Descroix, 2005). Aussi le lac Lop Nor en Chine a été transformé en désert

après une irrigation intense (Lasserre & Descroix, 2005).

En ce qui concerne le bassin de la mer d'Aral, les études archéologiques de l'irrigation et du détournement du Amou-Daria³ pendant l'âge du bronze (3000-4000 AP) ont montré que l'irrigation le long de l'Oxus a commencé à environ 3900 AP, avec la période d'activité la plus élevée entre 2400 AP et 1600 AP. On peut dire qu'à cette période commence un cycle de fluctuations anthropogéniques du niveau de la mer d'Aral, parfois aussi associés au changement climatique. Néanmoins, à la fin de cette époque, il y avait un âge où l'irrigation dans le delta du Amou-Daria s'est probablement arrêtée avec l'invasion des Huns vers le Ve siècle (après 1600 AP). Cela pourrait expliquer une augmentation significative du niveau des eaux de la mer d'Aral (Sorrel *et al.*, 2007). Par conséquent, les changements climatiques et la dévastation des systèmes d'irrigation par les Huns ont, une fois de plus, changé l'hydrologie de la mer d'Aral.

A partir du VIe siècle, les Turcs sont installés dans la région entre l'Amou-Daria et le Syr-Daria, les quelques-uns en pleine urbanisation, d'autres en gardant leurs habitudes nomades. Dans le cas du Syr-Daria, l'activité d'irrigation a commencé beaucoup plus tard (900 AP). Cette période comprend l'arrivée des Qarakhanides sur les bords du Amou-Daria, avec la destruction des Samanides, pour lesquels l'agriculture était une activité importante. Les Qarakhanides, l'une des cultures qui ont dominé la région, régnèrent du Xe siècle au début du XIIIe et constituèrent la première grande dynastie turque islamisée ; ils ont contribué à islamiser et à turciser tout l'Asie centrale, mais furent vaincus par Gengis-Khan autour de 1212. D'autre part, les

³Le Amou-Daria a été appelé en grec *Pamir* ou *Oxus*. Le nom par lequel nous le connaissons aujourd'hui, Amou-Daria (ou Daria), pourrait venir de l'ancienne ville de *Amul* au Turkménistan, maintenant connu sous le nom *Türkmenabat*, et le mot persan rivière, *Darya*, donc *Amu-Darya* serait la rivière Amul, se référant à l'âge où l'Amou-Daria coulait à travers ce pays, le Turkménistan.

Seldjoukides, qui ont été dérivées de la confédération turque Oghuzen occupant les steppes au sud et à l'ouest du lac Balkach, sont restés entre 1038 et 1198 dans la riche région proche de l'endroit où le Syr-Daria déverse ses eaux dans la mer d'Aral, et les villes dans ce lieu sont depuis lors florissantes. Quoi qu'il en soit, l'arrivée des Mongols a apporté des conséquences dévastatrices pour l'agriculture en Asie centrale.

Conformément à plusieurs recherches menées au cours des dernières décennies, l'eau de la rivière qui s'écoule vers la mer d'Aral est apparue du Pléistocène tardif, lorsque le Syr-Daria a commencé à affluer dans la partie sud-est de la dépression d'Aral à travers le canal de Zhana-Daria. L'Amou-Daria jetait dans le lac Khorezmien (la mer d'Aral) à cette époque, et, une fois que le lac a été rempli, il s'est tourné vers l'ouest et s'est déplacé dans la dépression de Sarykamys. Au moment où le niveau de l'eau montait à 58 mètres au-dessus du niveau de la mer, l'eau a commencé à traverser le canal d'Uzboy dans la mer Caspienne (Kostianoy & Kosarev, 2010). A partir de ces faits, il semble qu'au cours des siècles, l'Oxus avait son cours changé, parfois à la mer Caspienne, parfois à la mer d'Aral. Déjà en 1873, Tissandier et Reclus ont remarqué l'étrangeté de ne pas avoir enregistrement géographique de la mer d'Aral dans les temps anciens, quand on sait que la Bactriane et la Sogdiane étaient bien connus des Grecs (Tissandier, 1873 ; Reclus, 1873). Aussi Marco Polo, dans ses notes, « ne fait aucune mention de cette mer intérieure » (Tissandier, 1873). Compte tenu de ces observations, l'auteur, avec une certaine clairvoyance, conclut que « Il est probable qu'elle (la mer d'Aral) était desséchée à ces époques parce que l'Oxus se jetait dans la Caspienne depuis quelques siècles. D'après ces faits, il faudrait considérer l'Aral comme une nappe d'eau intermittente qui aurait plusieurs fois été desséchée dans le cours de la période historique, et qui ne tarderait pas à se dessécher encore si les Russes rendent à l'Amou-Daria le lit dans le sein duquel il a déjà roulé ses eaux » (Tissandier, 1873). On parle même que Gengis-Khan aurait modifié le cours

de l'Oxus pour inonder la ville de Urgench et la prendre à ses défenseurs. Pour donner juste une autre référence, Reclus a publié un travail sur la mer d'Aral dans lequel il montre que ce lac ne tarderait pas à *cesser d'exister*, par évaporation, en cas de l'Amou-Daria ne remplaçant pas constamment les eaux qui étaient volatilisés jour après jour (Reclus, 1873).

En résumé, plusieurs chercheurs ont souligné des changements climatiques et un certain nombre d'interventions anthropogéniques liées aux mouvements de populations nomades de l'Asie centrale qui interféraient de temps en temps avec le niveau des eaux du Aral en raison des conflits entre clans sédentaires et nomades (en effet, avec les guerres, l'agriculture est moins prospère et plusieurs clans sédentaires sont retournés au nomadisme ; les systèmes d'irrigation ont ainsi été abandonnés par les ravages de la guerre et reconstitués plus tard, lorsque des nouveaux clans sont devenus sédentaires). Cependant, aucune intervention anthropogénique enregistrée se compare à l'action soviétique du vingtième siècle vers le haut de la production de coton, une action qui pourrait être décrit comme irresponsable, allant même contre quelques-uns des principes de préservation de la nature déjà insinué par Engels (de toute évidence, on ne peut pas imaginer que Khrouchtchev a lu Engels).

Mais la disparition de la mer, nous savons trop, n'a pas eu lieu de manière isolée. Le séchage rapide des deltas de l'Amou-Daria et de le Syr-Daria a causé, entre 1960 et 1980, une réduction effrayante de le miroir de l'eau totale constituée par les formations lacustres à proximité. Dans la région du delta de l'Amou-Daria, par exemple, on estime que, au cours de cette période, la réduction de la surface occupée par les lacs a été d'environ 41.000 km² (Chub, 2000). Ajouté à cela, la pollution croissante de l'eau par des herbicides, des pesticides et des engrais ont eu des conséquences néfastes pour la santé de la population. Les rapports des autorités sanitaires signalent la prolifération de gerbilles

transmetteurs de leptospirosis dans les communautés qui entourent l'ancien bord de la mer d'Aral. Les vents se propagent sur des kilomètres de sable contaminé (Fig. 1). La concentration de substances toxiques dans les aliments conduit à des maladies digestives et rénales. Le scénario de misère est impressionnant et la mortalité infantile a augmenté absurdement. On trouve en effet un pourcentage élevé de personnes touchées par la faim. En 60 ans, une région opulente est allée à la misère totale, avec la maladie et la mort en toutes les directions. On dit qu'il y a là des dépôts de pétrole, et, par conséquent, le Gouvernement ouzbek n'a aucun intérêt à restaurer la mer. Je me demande quel plus grand malheur pourrait encore être configuré pour la région et son peuple qu'une industrie pétrolière dans un désert contaminé. Probablement, nous allons écouter à nouveau les bêtises populistes.

La mer d'Aral, qui fut autrefois un lac terminal, était entrée dans une déficit hydrique, avec une perte d'eau par évaporation supérieur au volume d'eau captée du système Amou-Daria / Syr-Daria. Aujourd'hui, la partie sud n'existe plus. Seule la petite mer d'Aral maintient un niveau d'eau constant. La Grande Mer, comme on l'appelait la portion ouzbek après la récession des eaux, est condamnée ou pour toujours réduite. Étant donné que ni le Syr-Daria ou bien l'Amou-Daria atteignent l'Aral d'Ouest, cette partie sera bientôt fragmentée de façon permanente en des fosses de boue sans vie, tout comme il est arrivé à la partie moins profonde de l'Est. L'eau a disparu et a laissé des graves problèmes de santé publique. Bien qu'il soit une situation désespérée, il semble qu'il n'y a aucun intérêt à la formulation d'une solution définitive. Mais nous allons voir ce que la nature elle-même pourrait signaler de l'histoire géologique du bassin de l'Aral.



3 Principes de terraformage appliqués

Le bassin de la mer d'Aral est situé dans une vaste dépression tectonique. La protohistoire centrasiatique remonte à près de 10000 ans dans un passé gelé. Lorsque le climat est devenu plus chaud et plus humide autour de 9000 AP, les glaciers du Pamir et du Tien Shan ont commencé à décongeler. Cette période s'appelle la phase Lavlakian et a été marquée par une grande décharge du Amou-Daria. Progressivement, après la déglaciation, l'eau coulait librement de la mer d'Aral jusqu'à la dépression qui forme le lac Sarykamish, puis dans le canal Uzboy grâce à l'érosion du terrain en formation. Ce canal de 750 km de long rejoint le lac Sarykamish et la mer Caspienne. Bien que le lac Sarykamish est aujourd'hui extrêmement contaminé, contenant des niveaux élevés de pesticides, d'herbicides et de métaux lourds, des études géologiques montrent qu'il y avait une connexion relativement récente entre la mer Caspienne et la mer d'Aral, alors que, inspiré par ces faits géologiques, on pourrait penser à un grand investissement des nations vers une ingénierie environnementale inverse pour la construction d'un canal ou aqueduc pour diriger l'eau de la mer Caspienne à la mer d'Aral, en contournant le lac Sarykamish (je l'avais déjà fait une étude sur cette possibilité dans mon livre « *Reversões Geopolíticas: Geografia, Física e Filosofia na Sociedade Globalizada* », 2002). Certes, il faudrait des contributions d'eau douce pour rééquilibrer la salinité du système. Pas de nouveau, mais cette idée n'a jamais été pris au sérieux par les autorités gouvernementales, probablement par pure négligence de la situation. Les faits sont que la distance n'est pas grande (Fig. 2) et que géologiquement la connexion a déjà eu lieu.

Il ne serait pas exagéré de dire que terraformage deviendra l'un des sujets les plus importants de la géoingénierie au cours de siècles. Car, comme nous le verrons, il est un domaine interdisciplinaire qui comprend la géographie, la physique, la climatologie, l'ingénierie de l'environnement, la logistique et d'autres. Comme ce domaine d'étude est encore en cours de

construction, il se concentrera principalement sur le bassin de l'Aral, la plus grande catastrophe systémique que nous connaissons.



Fig. 1 - Tempête de poussière soufflant au nord-est sur la mer d'Aral, 28 mai 2008 (courtoisie de la NASA).

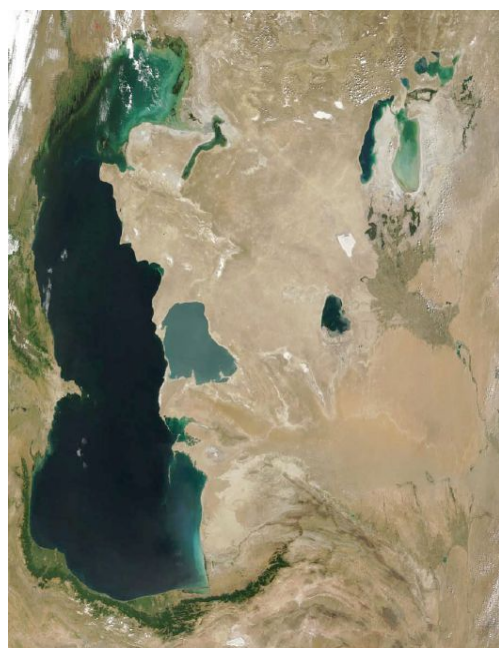


Fig. 2 - L'image ci-dessus montre la proximité de la mer d'Aral, à droite, et de la mer Caspienne, à gauche, 10 juin 2006 (courtoisie de la NASA).

Les limites écologiques de la catastrophe sont en mouvement. La poussière contaminée envahit les villages et les maisons. Les aliments et les animaux empoisonnés sont dispersés très rapidement. Face aux avancées technologiques dont nous disposons aujourd'hui dans tous les domaines, les taux de morbidité et de mortalité sont inacceptables, comparativement à l'âge moyen. Il est alors urgent de prendre des mesures appropriées. La meilleure source d'eau de mer est la mer Caspienne, située à environ 600 km à l'ouest du désert d'Aralkum. La voie du aqueduc est proposée pour relier la mer Caspienne et les régions septentrionales de la mer d'Aral, en raison du soulagement à faible altitude dans cette région. Dans la Fig. 3, Badescu et Cathcart ont même montré un schéma de tracé du aqueduc (Badescu & Cathcart, 2011). Ces auteurs démontrent clairement la faisabilité de cette option.

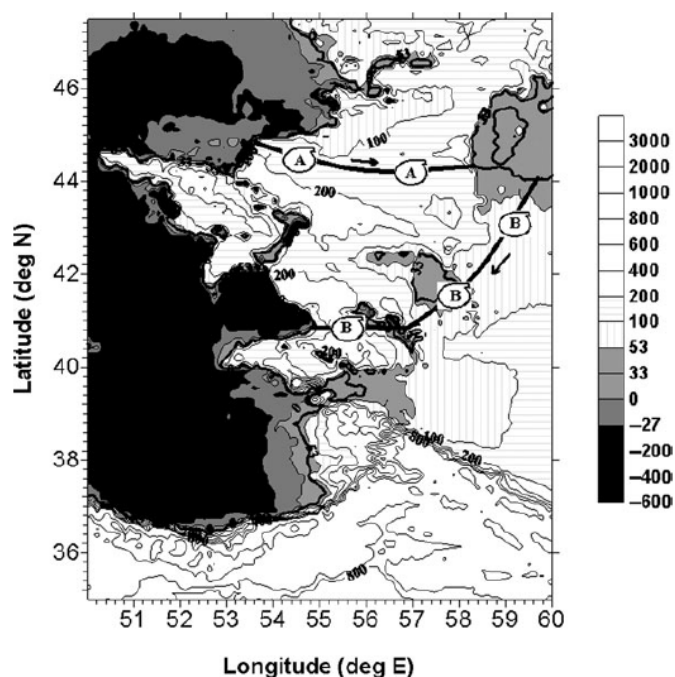


Fig. 3 - Routes pour les *pipelines* reliant la mer d'Aral et la mer Caspienne avec l'altimétrie montrée (courtoisie de Cathcart et Badescu, 2014).

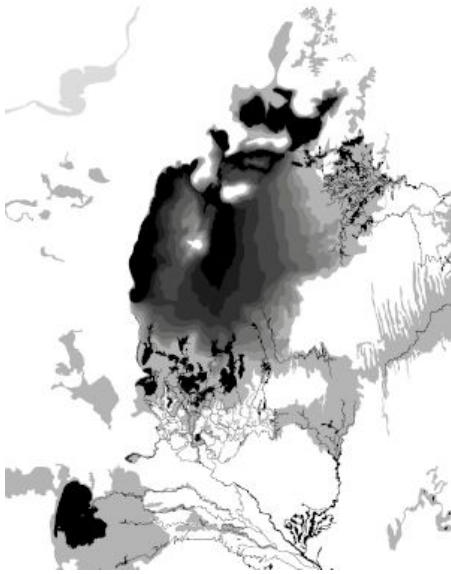


Fig. 4 - Le retrait de la mer d'Aral selon la dépression tectonique, de son niveau d'origine au niveau de 2008 (adapté de Christina Haas, 2014).

Entropie et contrôle de l'environnement

Dans ma thèse de doctorat, je l'avais fait une approche théorique de l'entropie de l'environnement produit par des activités anthropogéniques (Serpa, 2014). Cette approche est essentielle pour l'adoption de procédures de terraformage dans des environnements dégradés, étant donné qu'une telle terraformage est en effet un véritable recyclage environnemental. Je vais faire une transcription adaptée au contexte actuel, montrant l'importance de la problématique.

Du point de vue de l'ingénierie de l'environnement et de la production, une approche généralisée extrêmement utile à la compréhension de la question des déséquilibres de l'écosystème est qu'il est basé sur le concept d'entropie. En termes analytiques, l'entropie définit le degré de dégradation ou de désordre d'un système. Maintenant, si l'entropie établit le degré de dégradation d'un système, l'optimisation d'un processus d'intervention humaine peut être comprise comme un effort pour minimiser l'entropie maximale qui caractérise la propension universelle des systèmes à des états de

dégradation croissante. Mathématiquement, l'intervention humaine dans un espace de phase peut s'écrire $\omega(q,t)$ où q est la coordonnée généralisée et t le temps. La coordonnée q représente l'état dans lequel le système est dans l'espace de phase. Ainsi, selon Saridis (Saridis, 1988, 1995), nous avons

$$H(u) = - \int g[\omega(q,t)] \ln \{g[\omega(q,t)]\} dq, \quad (1)$$

où, dans le cadre de le bassin de la mer d'Aral, par exemple, $H(u)$ est l'entropie produit par des activités anthropogéniques et $\omega(q,t)$ l'intervention humaine pour contrôler et organiser les activités du site de manière à réduire les impacts environnementaux des émissions, des changements technologiques des cours d'eau, et des processus irréversibles de construction et de dégradation sur l'environnement en général. La fonction $g[\omega(q,t)]$ mesure la densité de probabilité pour le choix d'un $\omega(q,t)$ particulier. Le caractère probabiliste renvoie à l'incertitude intrinsèque à l'issue d'une intervention donnée. La seconde loi de la thermodynamique permet la détermination de la fonction qui maximise l'entropie, c'est à dire, l'établissement des conditions

$$\frac{\partial H}{\partial g} = 0; \frac{\partial^2 H}{\partial g^2} < 0, \quad (2)$$

où on obtient

$$g[\omega(q,t)] = \exp \{-\lambda - \varepsilon W[\omega(q,t)]\} \text{ et } H[\omega(q,t)] = \lambda + \varepsilon F\{W[\omega(q,t)]\},$$

à coefficients constants λ et ε , avec $W[\omega(q,t)]$ étant le travail équivalent à l'énergie dissipée par l'intervention humaine et $F\{W[\omega(q,t)]\}$ une certaine fonction. De toute évidence, la minimisation de $H[\omega(q,t)]$ correspond à une intervention optimale $\varpi(q,t)$ décrite par les coordonnées

dans l'espace de phase, telles que l'entropie minimale correspond au travail minimum, ou

$$H[\varpi(q,t)] \cong \text{Min}\{W[\omega(q,t)]\}. \quad (3)$$

Les coefficients constants sont caractéristiques de chaque système et représentent des ancres qui deviennent par un contrôle efficace sur les opérations.

À la vue de l'efficacité, nous pouvons établir par un processus de recyclage de l'environnement, à un moment donné t , l'expression

$$\eta_t \leq \frac{1}{\varphi} \left(1 - \frac{M_{II}}{M_I} \right), \quad (4)$$

où M_{II} est la quantité totale de matière dans la forme dégradée résultante de l'action humaine, M_I est la quantité de matière qui entre dans le site sous forme de matériaux de reconstruction, et φ le coefficient d'irréversibilité qui reflète la quantité de processus irréversibles qui se produisent sur le site. Le plus φ proche de 1, le moins sera le montant des processus irréversibles, et donc le moins sera le taux d'entropie due aux opérations constructives.

En bref, le défi pour les entreprises et les professionnels de la santé, la construction et l'industrie en général dans les décennies à venir est d'atténuer la contradiction entre le succès de l'humanité en tant qu'espèce et le coût élevé de ce succès en termes de ressources naturelles.

Stratégies à envisager

Je comprends que, en raison d'une liste très longue des crimes contre l'environnement, la planète Terre a besoin de passer par un important processus de terraformage, un concept qui est devenu populaire à

partir de la science-fiction et gagne actuellement faisabilité dans notre vie quotidienne. Ici, je voudrais retranscrire un extrait de Glantz, qui ne serait pas mieux écrit:

« Just about anywhere one live, people are constantly bombarded with bad news about the environment. Some of that news is about environmental problems of a global nature (e.g., global warming, ozone depletion) and some of it is about problems at the local level. Some of these problems have long lead times before their adverse consequences become apparent, while for others adverse consequences can develop over relatively shorter time frames (e.g., tropical deforestation). The list of environment-related problems around the globe is quite long and, unfortunately, is still growing: air pollution, acid rain, global warming, ozone depletion, deforestation, desertification, droughts, famines, water quality, and the accumulation of nuclear, toxic, and solid waste. Each is the result of long-term, low-grade, and slow on set cumulative processes. Each is a creeping environmental problem » (Glantz, 2004).

Ma thèse centrale est que nous devrions terraformer la terre elle-même, c'est à dire, toutes les zones endommagées. Bien sur, terraformer se traduit par l'application de technologies sur un environnement inhospitalier pour induire la dynamique géophysique et biologique qui caractérise l'orbe terrestre. Donc, pour terraformer nous n'avons pas besoin de laisser la planète; oui, nous avons besoin de terraformer pièces de la planète, avant que nous devons le faire sur toute la planète. Ainsi, terraformer un autre monde semble un rêve lointain et irréaliste aujourd'hui. Cependant, terraformer la Terre elle-même, ou des parties de la Terre, non seulement il semble faisable, mais aussi un besoin urgent.

En fait, pour moi toujours semblé plus logique d'investir en terraformer la Terre que d'investir dans des projets exotiques dehors de notre planète. Ceci est la

seule maison que nous avons et nous devons la préserver à l'extrême. Récupérer la mer d'Aral est sans aucun doute un énorme défi (la rétraction de la mer entre 1960 et 2008 peut être vu dans la Fig. 4) — même si ce sujet est devenue monnaie courante dans les médias —, mais il ne sera pas été aussi grande que la mise en œuvre de la culture du coton à tout prix. Il n'est pas une question d'économie, mais de santé et, surtout, une question de humanité. Ainsi, le retour de l'eau à la mer est le moyen le plus naturel de retourner l'humidité de la région, pour réduire la salinité de l'environnement et les tempêtes de poussière empoisonnée. Certainement, je ne veux pas que le coton ne soit plus cultivé, ce qui représenterait un effondrement économique des républiques d'Asie centrale ex-soviétique. Cependant, les progrès du génie génétique offrent des perspectives pour une meilleure utilisation d'espèces de coton qui nécessitent moins d'eau, et, donc, plus tolérants à la sécheresse (la recherche a consisté à introduire le gène DREB 2A dans les plantules de coton pour induire une tolérance à la sécheresse). Tout d'abord, ce n'est pas un transfert permanent des eaux de la mer Caspienne, mais une combinaison de stratégies d'ingénierie environnemental, des techniques saisonnières et pérennes. Si nous donnons à la nature une chance, elle se reconstitue ; il est ce qu'on devrait faire.

Je l'ai vu demander si récupérer la mer d'Aral en vaudrait la peine. Cette question est aussi vide de sens que de se demander si en vaudrait la peine de récupérer la population de rhinocéros pygmées de l'Indonésie. Après tout, que ferions-nous sans nos espèces sauvages? La vie est précieuse et notre monde est un joyau rare, maintenant brouillé et rainuré. Ressusciter la mer d'Aral est d'abord un acte de foi dans les meilleures intentions de la race humaine et aussi une démonstration de la façon dont les milliards peuvent être dépensés par des raisons les plus dignes.

Bien sûr, comme nous ne traitons que des régions sur la planète Terre, le processus est beaucoup plus simple

car nous reconstruirons certaines parties d'un écosystème, en laissant à la nature elle-même le travail au rééquilibrage de l'environnement. Notre terraformage est encore dans la limite de faisabilité. En ce qui concerne le bassin d'Aral, je voudrais topifier les points principaux à considérer. Une fois que Badescu et Cathcart (2011) ont lancés des recherches de grande ampleur à propos de la restauration hydrologique de la mer et de la stabilisation naturelle du niveau de fluide, je vais me concentrer sur les aspects spécifiques de la géoingénierie comme je la vois.

1) Il faut suppléer l'eau à la mer d'Aral à partir d'une source proche d'une manière saisonnière, et cette source doit être surveillée afin que tous les risques à l'environnement soient immédiatement détectés. La source la plus probable est la mer Caspienne, par la proximité (Fig. 2) et par le volume d'eau.

2) La captation de l'eau de la mer caspienne, par un canal ou aqueduc, est une stratégie combinée à une grande révision du réseau d'irrigation du coton, afin de restaurer une partie de l'afflux d'eau douce de l'Oxus. Une telle révision doit impliquer de nombreuses oeuvres pour retracer plusieurs chenaux et reconstruire leurs lits.

3) De grands investissements doivent être destinés au génie génétique, afin d'améliorer certaines propriétés des espèces de coton, telles que la résistance à l'absence d'eau, la résistance à l'attaque des fléaux, ce dernier réduisant drastiquement l'utilisation de pesticides et d'herbicides.

4) Il est important de se rappeler que le miroir d'eau de la mer d'Aral en pleine condition est soumis à un haut niveau d'évaporation, et il faut considérer que la culture du coton est une réalité permanente. Il est donc nécessaire de surveiller les niveaux d'eau pour contrôler l'afflux d'eau de la mer Caspienne chaque fois qu'il est nécessaire d'équilibrer les flux de l'Amu-Daria. En conditions normales, l'analyse des fluctuations du niveau

de la mer d'Aral prendrait en compte le débit de l'eau vers le canal Uzboy. L'équation du bilan hydrologique annuel de la mer serait la suivante si elle ne laisse que les composants principaux:

$$F(h) \frac{dh}{dt} = Q_{\uparrow} + Q_{\downarrow} + (X - E)F - Q_{\nearrow}, \quad (5)$$

où

h — le niveau d'eau dans la mer;

F — l'aire de l'aire d'eau de la mer au niveau donné;

t — temps;

$Q_{\nearrow}$ — écoulement de l'eau sur le Uzboy ;

$Q_{\uparrow}$ et $Q_{\downarrow}$ — entrées annuelles superficielles et souterraines vers la mer;

X et E — couches annuelles de précipitations atmosphériques sur la surface de la mer et évaporation de celle-ci.

Il est certain que cette équation ne s'applique pas maintenant, car il n'y a plus la mer.

5) Le travail de surveillance basé sur l'équation (5), après le remplissage de la dépression d'Aral, doit être combiné avec les observations de l'albédo. L'albédo est une caractéristique environnementale d'un grand intérêt pour l'ingénierie de terraformage en raison de son influence directe dans la dynamique de l'atmosphère. Une étude très intéressante des années 90 a démontré que l'irrigation à grande échelle dans la région de la mer d'Aral a entraîné une augmentation des valeurs intégrales du bilan radiatif et du transfert de son énergie vers l'atmosphère sous forme de chaleur latente (Kadukin and Klinge, 1991). Le bilan radiatif dépend des ratios de sa dépense énergétique pour l'évaporation totale et

l'échange turbulent de chaleur entre la surface du sol et l'atmosphère, et sur le flux de chaleur dans le sol selon

$$\Gamma_{\varphi\omega\tau} = \xi_{\varphi} + \xi_{\omega} + \xi_{\tau}, \quad (6)$$

où

ξ_{φ} = flux de chaleur lié aux transformations de phase, c'est-à-dire, l'évaporation et la condensation;

ξ_{ω} = flux turbulent de chaleur entre la Terre et l'atmosphère;

ξ_{τ} = flux de chaleur dépensé pour le sol, le chauffage et le refroidissement.

En effet, le rôle principal dans la partie de sortie du bilan thermique est joué par ξ_{φ} et ξ_{ω} . Par conséquent, avant 1960, le bilan radiatif moyen dans la région était

$$\Gamma_{\varphi\omega\tau} = \xi_{\varphi} + \xi_{\omega} = 9.6 + 14.6 = 24.2 \text{ Mj/m}^2/\text{yr},$$

contre

$$\Gamma_{\varphi\omega\tau} = \xi_{\varphi} + \xi_{\omega} = 16.8 + 14.6 = 31.5 \text{ Mj/m}^2/\text{yr}$$

en 1985 (Kadukin and Klinge, 1991). Ainsi, dans la région à l'étude, le bilan thermique fortement changé au détriment du flux de chaleur lié à l'évaporation. A une valeur donnée de $\Gamma_{\varphi\omega\tau}$, les composants ξ_{φ} et ξ_{ω} sont les principaux régulateurs du régime thermique entre la surface de la mer et les couches d'air adjacentes. C'est pourquoi nous devons réguler l'afflux d'eau douce et d'eau salée pour compenser le taux d'évaporation causé par la culture du coton.

6) Les tâches de terraformage comprennent de grandes mouvements de terres lorsque le sol est recouvert de matériaux toxiques. Ainsi, le voisinage des anciennes marges de la mer doit être remanié avec des terres fraîches, afin de rétablir les conditions sanitaires de la région. Cependant, il faut une hygiène compatible avec

la mobilité actuelle des sables. Sur le transport du montant de sable et de la poussière à long terme pendant les tempêtes, Issanova *et al.* ont présenté un modèle où la quantité transportée peut être calculée avec la formule

$$\tilde{Q} = \Delta\tau_0 Q_{z1} + \sum_{i=1}^n Q_{zi} \Delta t + \Delta\tau_k Q_{zn}, \quad (7)$$

où

$\Delta\tau_0$ = l'intervalle de temps à partir du moment où la tempête a commencé à la prochaine et première heure d'observation ;

Q_{zi} = la quantité totale de sable dans une couche superficielle de l'atmosphère dans la i -ème heure de mesures ;

Q_{z1} = le montant total à une première intervalle de temps ;

Q_{zn} = le montant total à l'intervalle final du temps.

Q_{z1} et Q_{zn} sont calculés par la vitesse du vent dans la première et la dernière mesure standard lors d'une tempête. Δt est l'intervalle de temps entre les observations météorologiques standard égales à 3 h ou 10800 s, $\Delta\tau_k$ est l'intervalle de temps entre la dernière heure standard où la tempête était toujours observée et sa terminaison (Issanova *et al.*, 2015). Cette équation permet d'établir des paramètres de mobilité de la poussière contaminée, afin qu'ils font une idée de la réduction totale de poussière après la manipulation du sol et après le remplissage de la mer.

7) L'idée d'entropie contrôlée résumée par l'équation (4) et exposée plus en détail dans la section précédente est un outil fondamental pour la gestion du processus de terraformage. Sans un tel outil, le processus dans son ensemble peut générer plus de dommages à l'environnement.

La guerre du XXI^e siècle

Mais il y a un problème moral beaucoup plus grave. Quand ils ont construit le barrage qui a permis la récupération partielle de la petite mer du Nord, nul n'était décidé contre l'interruption complète du flux d'eau du Syr-Daria au grand Aral. Comment était-ce possible? Qui a le droit de décider qui aura accès à l'eau?

L'un des trois piliers-clés pour répondre aux demandes d'une population croissante est l'eau (les deux autres sont la nourriture et l'énergie). L'eau, la nourriture et l'énergie sont inextricablement liées dans le même corps systémique. En ce qui concerne l'eau, près de 4000 kilomètres cubes d'eau douce sont consommés chaque année dans le monde. Plus d'un tiers de la population mondiale vit sans assainissement adéquat (Clarke & King, 2005). Selon les Nations Unies, en regardant le Turkestan, la population de l'Asie centrale passera à plus de 90 millions à la fin de ce siècle. Une augmentation de cette ampleur nécessite des stratégies robustes de gestion à développer et lancer le plus tôt possible. En soulignant combien il est difficile de parvenir à un scénario d'équité avec des avantages pour tous dans le domaine de l'eau et de l'énergie, les tensions entre les pays d'Asie centrale sur l'utilisation de l'eau ont augmenté ces derniers temps (Lasserre & Descroix, 2005). Malgré les récentes publications sur la gestion des ressources d'eau dans le bassin d'Amou-Daria, nul ne a abordé la possibilité d'un retour partiel de la mer du Sud comme un moyen de rééquilibrer les conditions environnementales, à partir d'une restructuration de l'irrigation en raison de la diminution des précipitations, et d'une source à proximité de captage des eaux. Le remplacement du mode d'irrigation médiéval soviétique pourrait apporter un excédent d'avantages environnementaux en Ouzbékistan plus d'avantages dans la qualité de vie, en réduisant considérablement les dépenses de santé. D'autre part, le retour partiel de la mer réduirait considérablement la salinité de la région. Comme je l'ai fait clair, c'est un effort international.

Une véritable guerre de l'eau a commencé à être menée au XX^e siècle, d'abord par la cupidité d'un gouvernement socialiste faux (le communisme « derrière les portes fermées »), et maintenant dans le monde entier pour la domination des sources d'eau potable. En particulier, en Asie centrale, le problème devrait s'aggraver dans la mesure où les Syr-Daria et l'Amou-Daria ont leurs sources dans les hauts plateaux du Pamir, dont les limites comprennent le Tadjikistan, l'Afghanistan, le Pakistan, le Kirghizistan et la Chine. Ces pays souhaitent certainement de maintenir leurs droits à l'eau glaciaire, ce qui apportera dans un avenir proche plus de problèmes pour les pays qui composent le bassin de la mer d'Aral rivières ci-dessous. De plus, la raison de l'intérêt des États-Unis d'Amérique à maintenir le Pakistan comme un allié est, à ce que je crois, est précisément l'accès au Pamir que ce pays offre, un intérêt mal camouflé par une alliance contre le terrorisme.

En résumé, je pense que les nations riches ont tendance à mettre en place des politiques d'exclusion, à décider qui doit ou non accéder aux ressources naturelles. La cupidité, l'intolérance et l'inégalité alimentent la haine, en se éloignant de plus en plus de l'amour qui est sage. À mes yeux, la coopération est le secret de la survie de l'humanité dans la planète.

5 Conclusion

Cet article a présenté une théorie introductive de la terraformage à appliquer initialement au bassin de la mer d'Aral. On a présenté des arguments paleohistoriques de la faisabilité géologique d'un recouvrement partiel de la dépression d'Aral, ce qui nous a permis de penser à des moyens artificiels de reconstruction de cet environnement. Les caractéristiques socio-culturelles de la région ont été apportés à la discussion à partir des notes de l'auteur. Il a été analysé les conflits géopolitiques causés par la « guerre froide » pour les ressources d'eau douce, en particulier en Asie centrale. Il est attendu que ce travail peut apporter motivation pour

les nouveaux chercheurs en géoingénierie qui participent aux programmes de coopération internationale.

6 Remerciements

Je voudrais remercier à R. Cathcart et V. Badescu pour le grand soutien à ce travail, tout particulièrement pour l'échange d'informations.

Références

- [1] Badescu, V., and Cathcart, R. 2011. "Aral Sea Partial Restoration. I. A Caspian Water Importation Macroproject." *Int. J. Environment and Waste Management* 7 (1; 2).
- [2] Bos, M. (Ed.) 1995. "The Inter-Relationship between Irrigation, Drainage and the Environment in the Aral Sea Basin." In *Proceedings of the NATO Advanced Research Workshop on Drainage and Development in Arid Zones*, NATO ASI Series 2: Environment, Vol. 22.
- [3] Chub, V. 2000. *Climate Change and its Influence on Natural Resource Potential of the Republic of Uzbekistan*. Glavgidromet, Tashkent, 252p.
- [4] Clarke, R., and King, J. 2005. *O Atlas da Água*. Publifolha, São Paulo.
- [5] Glantz, M. 2004. *Creeping Environmental Problems and Sustainable Development in the Aral Sea Basin*. Cambridge University Press, Cape Town.
- [6] Haas, C., *The Aral Sea*. Ph.D. Thesis, EPFL, 74p (2014).
- [7] Issanova, G., Abuduwalli, J., Galayeva, O., Semenov, O., Bazarbayeva, T. 2015. "Aeolian Transportation of Sand and Dust in the Aral Sea Region." *Int. J. Environ. Sci. Technol* 12, 3213–3224.
- [8] Izhitskiy, A., Zavialov, P., Sapozhnikov, P., Kirillin, G., Grossart, H., Kalinina, O., Zalota, A., Goncharenko, I., and Kurbanliyazov, A. 2016. "Present State of the Aral Sea: Diverging Physical and Biological Characteristics of the Residual Basins." *Scientific Reports* 6:23906.
- [9] Kadukin, A., and Klinge, R. 1991. "The Water Balance of the Caspian Sea and Aral Sea." In *Hydrology of Natural and Manmade Lakes, Proceeding of the Vienna Symposium*, IAHS Publ. no. 206.
- [10] Kostianoy, A., Kosarev, A. (Eds.) 2010. *The Aral Sea Environment*. Springer-Verlag, Berlin, 335p.
- [11] Krivonogov, S., Kuzmin, Y., Burr, G. 2010. "Environmental Changes in the Aral Sea Region (Central Asia): Initial Results of a Radiocarbon-Based Study." *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B* 268, 1080–1083.

- [12] Lasserre, F., and Descroix, L. 2005. *Eaux et territoires: Tensions, Coopérations et Géopolitique de l'Eau*. Presses de L'Université du Québec, Québec.
- [13] Micklin, P. (Chief Editor), Aladin, N. (Associate Editor), and Plotnikov, I. (Associate Editor) 2014. *The Aral Sea: The Devastation and Partial Rehabilitation of a Great Lake*. Springer, Heidelberg.
- [14] Opp, C., Groll, M., Aslanov, I., Lotz, T., Vereshagina, N. 2017. "Aeolian Dust Deposition in the Southern Aral Sea Region (Uzbekistan): Ground-Based Monitoring Results from the LUCA Project." *Quaternary International* 429 (2017) 86–99.
- [15] Reclus, E. 1873. "Note Relative a l'Histoire de la Mer d'Aral. " *Bulletin de la Société de Géographie* 6, 113–118.
- [16] Roy, S., Smith, M., Morris, L., Orlovsky, N., Khalilov, A. 2014. "Impact of the Desiccation of the Aral Sea on Summertime Surface Air Temperatures." *Journal of Arid Environments* 110, 79–85.
- [17] Saridis, G. 1988. "Entropy formulation of optimal and adaptive control." *IEEE Transactions on Automatic Control* 33, 713–721.
- [18] Saridis, G. 1995. *Stochastic Processes, Estimation and Control: The Entropy Approach*. John Wiley & Sons, New Jersey.
- [19] Serpa, N. 2002. *Reversões Geopolíticas: Geografia, Física e Filosofia na Sociedade Globalizada*. Papel&Virtual, Rio de Janeiro.
- [20] Serpa, N., *Sur l'Entropie Contrôlée des Systèmes* [...]. Ph.D. Thesis, L'Université Libre des Sciences de L'Homme de Paris, 127p (2014).
- [21] Sorrel, P., Popescu, S.-M., Klotz, S., Suc, J.-P., Oberhänsli, H. 2007. "Climate Variability in the Aral Sea Basin (Central Asia) During the Late Holocene Based on Vegetation Changes." *Quaternary Research* 67, 357–370.
- [22] Tissandier, G. 1873. "Expéditions Scientifiques de Khiva l'Amou-Daria et la Mer d'Aral." *La Nature - Revue des Sciences* 1-26, 378–380.
- [23] Zmijewski, K., and Becker, R. 2014. "Estimating the Effects of Anthropogenic Modification on Water Balance in the Aral Sea Watershed Using GRACE: 2003 – 12." *Earth Interactions* 18(3), 1–16.
- [24] White, K. 2013. "Nature-Society Linkages in the Aral Sea Region." *Journal of Eurasian Studies* 4, 18–33.



Controle de Qualidade do Medidor de Atividade

Ativímetro em Serviço de Medicina Nuclear (artigo de revisão)

Gleicio Oliveira Valgas

CTCON, Brasil; Faculdades ICESP.

Received: 28 April 2017 ____ Accepted: 22 May 2017 ____ Published: 16 Jun 2017 ____.

Abstract: In this work, we present a description of the tests of quality control of the activity measurer - activometer used in Nuclear Medicine Service - NMS. A bibliographic survey was carried out to describe the main tests, their objectives, periodicity and the norms that regulate such tests. The work aims to bring an academic contribution to users or stakeholders, contributing to a better understanding of the importance of quality control in a nuclear medicine service.

Key words: nuclear medicine, quality control, activometer.

Conceito-chave

Ativímetro: aparelho utilizado para verificar a atividade de um determinado radiofármaco.

Simbologia

$A(t)$: atividade da amostra

N_A : número de Avogadro

$n(t)$: número de átomos existentes numa amostra

1. Introdução

A medicina nuclear é uma especialidade da área médica que utiliza radioisótopos emissores de radiações alfa (α), beta (β), gama (γ) e raios X, por meio da captura

eletrônica. São técnicas indolores para formação de imagens, fisiologia e para fins terapêuticos. As aplicações de radiofármacos nos pacientes são efetuadas nas formas de impulsão venosa, arterial e inalação. A quantidade e o tipo de radioisótopos administrados aos pacientes deve ser medida e documentada, sendo as áreas de trabalho monitoradas para manter a segurança tanto da equipe de trabalho quanto dos pacientes.

Para o paciente ser submetido a estudo de diagnóstico ou tratamento terapêutico, a prescrição médica de medicina nuclear tem que ser feita por um médico nuclear sob a forma de ordem escrita, datada e assinada, anteriormente à administração do radiofármaco (Tharall, 2003; RDC – 38, 2008; Moraes, 2007; CNEN – Comissão Nacional de Energia Nuclear 3.05, 2013). A responsabilidade técnica pela preparação e administração de radiofármacos é atribuída a profissionais com formação superior na área da saúde, com registro no respectivo conselho de classe, de acordo com competências profissionais definidas na legislação

Autor correspondente: Gleicio Oliveira Valgas, Professor, áreas de pesquisa: física nuclear, eletromagnetismo, tecnologia química e biológica e imagens médicas. E-mail: gleiciokn@gmail.com.

vigente (CNEN – Comissão Nacional de Energia Nuclear 3.05, 2013).

São utilizados detectores de radiações, tais como a câmara de cintilações, a qual faz a conversão de radiação ionizante em corrente elétrica; esta, por sua vez, segue ao sistema computacional, e, por uma transformada de Fourier, promove a formação de imagens ou estado funcional dos órgãos. As imagens em medicina nuclear são obtidas de dentro para fora do corpo do paciente, uma vez que os radiofármacos emitem as radiações e estas são oriundas do interior do paciente indo ao encontro das fotomultiplicadoras (Tharall, 2003; RDC – 38, 2008). Os testes de controle de qualidade no medidor de atividade são de suma importância, pois são estes testes que vão garantir o bom funcionamento do aparelho, e, portanto, confiabilidade em todo serviço de medicina nuclear.

Esse artigo tem por objetivo descrever os testes de controle de qualidade no ativímetro, medidor de atividade exigido pela Comissão Nacional de Energia Nuclear (doravante, CNEN).

2. Breve histórico sobre a medicina nuclear

“Em 1895, o pesquisador alemão Wilhelm Conrad Roentgen descobriu os raios X, cujas propriedades despertaram o interesse da classe médica” (Mazzilli *et al.* 2002). Roentgen notou que os raios X atravessavam os corpos humanos e outros, além de permitirem visualizar características anatômicas do interior de nosso corpo (Mazzilli *et al.* 2002).

Em 1886 veio a descoberta da radioatividade natural por Henri Becquerel. A medicina nuclear iniciou-se, então, no século XX. Os primeiros pesquisadores foram: Marie Curie (1867 - 1934), Pierre Curie (1895 - 1906) e George Hevesy (1885 - 1966). Em 1934, George Hevesy fez o primeiro radiotraçador com chumbo, e Irene Curie

e Frédéric Curie (1897 - 1956) obtiveram o fósforo-32, que é radioativo (Nascimento, 1996).

3. A equipe de trabalho na medicina nuclear: serviços e instrumentos

O grupo de profissionais que trabalham no serviço de medicina nuclear (doravante, SMN) deve incluir pelo menos um médico qualificado em medicina nuclear e um supervisor de radioproteção (doravante, SPR), que deve ter nível superior e certificação pela CNEN, de acordo com a Norma 7.01 de 2016. Além destes, um ou mais técnicos de nível superior ou médio, qualificados para exercer suas funções conforme a norma NE 3.05 de 2013 da CNEN, e profissionais de enfermagem para aplicação dos radiofármacos. O médico que for qualificado em medicina nuclear e que seja concomitantemente SPR pode acumular as duas funções, desde que haja compatibilidade de horários.

Serviço qualificado

Para obter um bom funcionamento do aparelho, o SMN tem que integrar profissionais de manutenção qualificados e treinados para manipular os aparelhos. Caso um aparelho não esteja funcionando como deveria, será necessário verificar se todos os controles foram corretamente configurados. Se o problema não for resolvido, talvez seja melhor a intervenção do serviço de manutenção.

Instrumentos de medição da radiação e equipamentos de diagnóstico

O SMN deve estar equipado com, no mínimo, os seguintes acessórios e materiais (CNEN - 3.05, 2013):

1. Equipamentos de proteção individual (doravante, EPI) e equipamentos de proteção coletiva (doravante, EPC), tais como: luvas descartáveis, jalecos de manga longa,

transportadores blindados de frasco e seringa, pinças com dimensões adequadas ao tipo de manipulação e blindagem para manipulação, transporte e armazenamento de fontes radioativas e rejeitos.

2. Fontes radioativas de referência, seladas e com atividade mínima de 3,7 MBq, específicas para uso em controle de qualidade dos instrumentos de medição de radiação, nas geometrias e energias compatíveis com as práticas autorizadas, sendo as mais utilizadas: Cobalto-57, Bário-133 e Césio-137.
3. Monitor de taxa de dose (principal e reserva) com resolução de escala suficiente para a prática autorizada.
4. Monitor de contaminação de superfície (principal e reserva) com resolução de escala suficiente para a prática autorizada.
5. Medidor de atividade compatível com as energias e características específicas encontradas nas práticas autorizadas, e com resolução de escala suficiente para os valores das atividades de rotina.

As fontes radioativas de referência são de uso exclusivo do SMN e não poderão ser compartilhadas sob nenhuma circunstância com outros SMN. Outras fontes radioativas seladas de referência podem ser utilizadas, desde que sejam específicas para uso em controle de qualidade dos instrumentos de medição de radiação, nas geometrias e energias compatíveis com as práticas autorizadas. É vedado o uso de medidor de atividade com detector do tipo Geiger-Müller, devendo ser obrigatoriamente um contador de dose.

Os medidores de taxa de exposição, de dose equivalente e dose absorvida podem ser utilizados como medidores de taxa de dose, desde que suas medidas sejam adequadamente convertidas. Os monitores de taxa de dose e de contaminação de superfície, principal e reserva, devem ser calibrados, em datas distintas, a cada

dois anos, e sempre que os instrumentos sofrerem reparos ou apresentarem suspeita de funcionamento irregular, por laboratório acreditado pelo órgão competente em metrologia para realizar os ensaios de calibração, assim como devidamente autorizado pela CNEN.

3. Atividade da amostra

A atividade da amostra é mensurada em Ci ou Bq, as equações abaixo demonstram como calcula a atividade radioativa.

A taxa de mudanças dos átomos instáveis em um determinado instante é denominada de Atividade. Assim, chamando de $n(t)$ o número de átomos existentes numa amostra, no instante t , a atividade $A(t)$, será expressa por:

$$A(t) = \frac{dn(t)}{dt} = -\lambda n(t) \quad (1)$$

Integrando a equação diferencial e chamando de n_0 o número de átomos radioativos existentes na amostra no instante $t = 0$, segue

$$n(t) = n_0 e^{-\lambda t}$$

A atividade da amostra pode ser obtida pela expressão:

$$A(t) = -\lambda n(t) = -\lambda n_0 e^{-\lambda t}$$

A atividade da amostra no instante zero, A_0 , é expressa por:

$$A_0 = -\lambda n_0$$

e, portanto:

$$A(t) = A_0 e^{-\lambda t}.$$

O número inicial n_0 de átomos de massa atômica A numa amostra de massa m (em g) é obtido pela expressão:

$$n_0 = m N_A / A,$$

onde $N_A = \text{número de Avogadro} = 6,02 \cdot 10^{23}$ átomos em A gramas do radionuclídeo.

4. Contador de Atividade Ativímetro (Curiômetro)

O curiômetro é simplesmente uma câmara de ionização tipo poço, na qual o radiofármaco é introduzido para que seja mensurada sua atividade em Becquerel - **Bq** ou Curie - **Ci**. Geralmente usa-se o gás argônio (a câmara é selada com uma pressão de 20atm). Isso faz com que ocorra ionização quando a câmara é irradiada, o que gera carga elétrica. No curiômetro as cargas são atraídas pelos eletrodos, pois há polaridade negativa. Portanto, o eletrômetro transformará a ionização em carga elétrica (Costa, 1999; Martins, 2010) conforme a Figura 1.

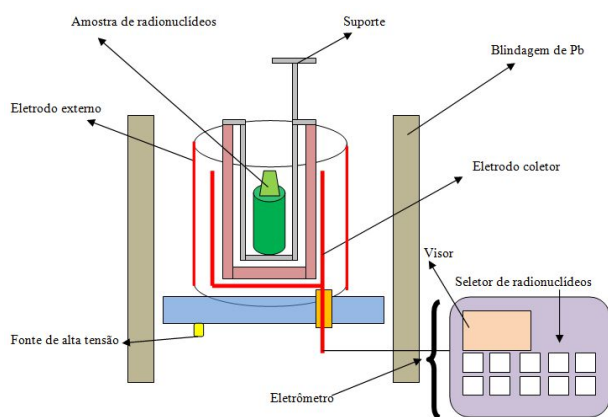


Figura 1. Esquema simplificado de um ativímetro.

Isto ocorre devido às condições geométricas serem as mesmas; as respostas devem ser lineares e as mesmas proporcionalidades entre a atividade e as ionizações devem ser observadas. Para os diferentes tipos de radionuclídeos sempre deve ser selecionado no seletor de

radionuclídeo, no qual será mensurado (Costa, 1999; Martins, 2010).

A radioproteção é feita com uma camada de chumbo em volta da câmara de ionização com uma espessura razoável para suportar a pressão do gás emanado, fazendo com que a radiação de fundo seja controlada, uma vez que o curiômetro sempre estará na sala de radiofarmácia, dentro da qual a taxa de exposição é alta (Costa, 1999; Martins, 2010; Mazzilli, 2002).

Segundo Martins (2010), o aparelho tem outros componentes, tais como: uma fonte de tensão estabilizada para proporcionar a polarização adequada a câmara; um eletrômetro adequado para a medida das correntes de ionização baixas; um circuito eletrônico para processamento e apresentação dos dados; dispositivos para a colocação de fontes radioativas em recipientes de diversos tamanhos e formas; interface para seleção de opções e introdução de dados.

5. Controle de Qualidade em Medicina Nuclear

Para obter um desempenho seguro dos equipamentos de serviço de medicina nuclear, além de imagens de cintilografia com qualidade para diagnóstico, é exigida uma série de testes de controle. O conjunto de testes de segurança e desempenho é realizado periodicamente, a fim de avaliar se os instrumentos de medição da radiação ou equipamentos de diagnóstico continuam atendendo aos requisitos das resoluções da CNEN e as demais normas nacionais e internacionais, bem como aos valores de referência estabelecidos durante os testes de aceitação. Abaixo segue uma tabela com os testes que são obrigatórios aqui no Brasil para os aparelhos de medição de atividade (CNEN – 3.05, 2013).

No ativímetro existem os testes principais de repetitividade, calibrador, exatidão, precisão, linearidade

e geometria (CNEN – 3.05, 2013). A regularidade nas leituras deve ser observada todos os dias para garantir a efetividade do aparelho. O Cs-137, com tempo de meia vida longo, é medido no calibrador de dose. A leitura não pode variar em mais de 10 % do valor registrado no teste de exatidão inicial, que foi corrigido na fonte padrão de Césio-137. As leituras de cada ajuste são predefinidas e são executadas diariamente (Powsner, 2006, p.136; CNEN – 3.05, 2013).

Teste de repetitividade

Esse teste consiste em verificar a constância na resposta do equipamento para diferentes fontes de referência, como o Ba-133, o Co-57 e o Cs-137, devendo as medidas estar dentro de um intervalo de $\pm 5\%$ (cinco por cento). Devem ser realizados todos os dias antes do início das atividades.

No sistema do contador de dose está gravada a data de calibração da fonte de referência e o dia em que ela foi inserida na memória do seu sistema, a qual, por sua vez, registra a atividade da fonte por meio de cálculos de decaimento radioativo executados automaticamente. Quando se coloca a fonte no aparelho ele faz a leitura e compara o decaimento, verificando o nível de confiança do sistema para obter a aceitação final (Farrelly Pessoa, E., et al., 1978; Biral, 2002; CNEN – 3.05, 2013, Tauhata, 2014; UFRGS, 2014).

Testes de calibrador: ajuste zero, radiação de fundo ou background, e alta voltagem

O primeiro é simples; verifica e ajusta o ponto “zero” do aparelho calibrador de dose (alguns equipamentos não oferecem esta função). Deve ser realizado diariamente antes do início das atividades (CNEN – 3.05, 2013).

O segundo verifica a radiação de fundo, pois as medidas precisam estar dentro de um intervalo de $\pm 20\%$.

Pelo fato de o contador de dose estar localizado na radiofarmácia, este teste pode não ser confiável (CNEN – 3.05, 2013).

O último consiste em verificar a tensão de entrada, quando disponível, no calibrador de dose, devendo as medidas estar dentro de um intervalo de $\pm 1\%$. Este teste verifica a capacidade do calibrador perceber suas limitações em relação à corrente elétrica e à voltagem máxima. É realizado diariamente antes do início das atividades (CNEN – 3.05, 2013).

Todos estes testes devem ser realizados diariamente, de acordo com as práticas estabelecidas internacionalmente (*Laboratoire National Henri Becquerel* – LNHB; *National Physical Laboratory* – NPL; *Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas* – CIEMAT).

Exatidão

A exatidão é uma medida das leituras do calibrador de dose, em comparação com padrões aceitáveis. Duas fontes com tempo de meia vida longo, por exemplo, o Césio-137 ($T_{1/2} = 30$ anos) e o Cobalto-57 ($T_{1/2} = 270$ dias) são medidos várias vezes e as médias das leituras são comparadas com os valores emitidos pelo *National Institute of Standards and Technology*. Se a leitura obtiver mais de 10% de erro, o calibrador de dose não deverá ser utilizado. A verificação da exatidão deve ser feita na instalação anualmente e após reparos, ou quando for movido para outra posição dentro da clínica (Powsner, 2006, p.136).

É um teste de suma importância, pois verifica a exatidão nas medidas de um calibrador de dose através da utilização de fontes de referência como Co-57, Ba-133 e Cs-137, devendo as medidas estar dentro de um intervalo de $\pm 10\%$. É realizado semestralmente antes do início das atividades (CNEN – 3.05, 2013), de acordo com a equação

$$exatidão = 100 \times \frac{Am - C}{C},$$

pela qual se deve calcular, para cada fonte, a diferença percentual entre a média das atividades (Am) registradas e a atividade da fonte padrão de referência (C) com suas atividades corrigidas pelo decaimento (CNEN – 3.05, 2013).

Precisão

No teste de precisão se utiliza uma fonte de Co-57, Ba-133 ou Cs-137; é realizado semestralmente, sendo que o desvio não pode ultrapassar 5%, apresentando 95% de confiabilidade. Mede a dispersão dos valores medidos em torno do valor estabelecido conforme a expressão

$$precisão = 100 \times \frac{Ai - Am}{Am},$$

pela qual se deve calcular, para cada fonte, a diferença percentual entre a medida da atividade individual (Ai) e a média das medidas (Am) (CNEN – 3.05, 2013).

Linearidade

Este teste verifica a linearidade das medidas de um calibrador de dose por meio da utilização de uma fonte de meia vida curta, devendo as medidas estar dentro de um intervalo de $\pm 10\%$. É realizado anualmente, podendo utilizar uma fonte de uso da própria clínica/hospital, como o ^{99m}Tc , cujo tempo de meia vida é muito curto, permitido assim uma variação de 10% para mais ou para menos.

Na linearidade usam-se as doses mais elevadas das que são administradas nos pacientes. Um método para verificar a linearidade é medir o máximo de atividade que a clínica utilizará, como 7,4 GBq (200 mCi) de ^{99m}Tc , e repetir o teste em intervalos de tempo de 6, 24, 30, 48, e 96 horas (Powsner, 2006, p.136).

Uma técnica mais rápida para medir a dose é repetir a sua medida protegida dentro de chapas (luvas) de chumbo de diferentes espessuras. A espessura da chapa é usada individualmente e na combinação que reproduz a eficácia durante o declínio da atividade do ^{99m}Tc ao longo de 96 horas, como visto na Figura 2. As chapas devem ser examinadas com cuidado antes do uso; não renderão leituras exatas se houver alguma trinca, rachadura etc.. (Powsner, 2006, p.136).

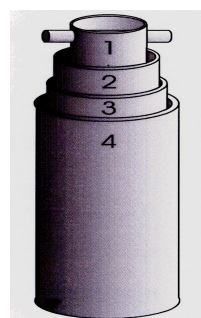


Figura 2. Luvas de teste de linearidade (Powsner, 2006).

A linearidade inicial deve ser feita anualmente na clínica quando mudar o aparelho de lugar dentro da mesma. A atividade aparente de uma dose irá variar com o volume e a forma do recipiente e a posição da dose dentro da câmara (Powsner, 2006, p.136).

Teste de Geometria

Verifica se os fatores de calibração do equipamento para recipientes e volumes diferentes daqueles usados nos testes usuais estão corretos. Toma-se uma amostra para ser testada, colocando-se um diluente, que pode ser água, para uma pequena quantidade de atividade como no exemplo na Figura 3. Simultaneamente, uma amostra pode ser medida em outro recipiente para ensaio (seringas, frascos, etc.), isto é, usado em laboratório. As medidas da dose não devem variar por mais de 10% (Powsner, 2006, p.137).



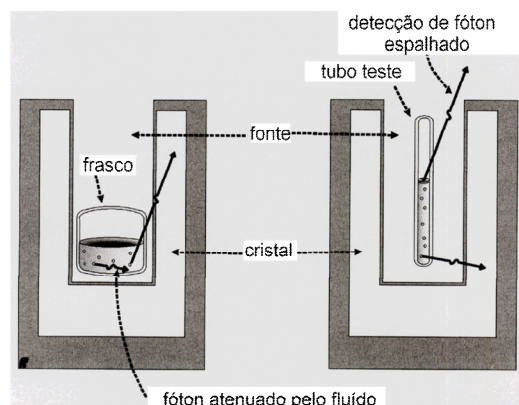


Figura 3. Amostra da variação geométrica (Powsner, 2006).

Os testes recomendados pelos órgãos internacionais são um pouco divergentes dos testes sugeridos pela CNEN, (Aguado, 2004). Segue abaixo um quadro demonstrativo, o qual pode ser comparado com a Tabela 1 da CNEN, *in fine*.

Teste	Linearidade	Exatidão	Precisão	Geometria
IEA	Trimestral	Trimestral	Trimestral	NE
PL	Anual	Anual	Anual	NE
NHB	Diário	Diário	Anual	NE
CR	Diário	Diário	Anual	Na instalação
NSI	Diário	Diário	Anual	Na instalação
NE: não especificado				

6. Considerações Finais

Este trabalho de revisão descreveu os principais procedimentos de controle de qualidade dos ativímetros. Com base em pesquisas bibliográficas no período compreendido entre agosto de 2016 e março de 2017, concluiu-se que há uma série de testes e procedimentos para que o controle de qualidade esteja dentro dos padrões aceitáveis.

Sem controle de qualidade, o serviço de medicina nuclear seria inviável, e colocaria trabalhadores e pacientes em risco de irradiação e contaminação

desnecessárias. Os aparelhos não teriam a mesma eficácia para imagens, fisiologia e terapia de acordo com os requisitos mínimos necessários.

Percebe-se que os testes recomendados aqui no Brasil pela Comissão Nacional de Energia Nuclear – CNEN diferem das recomendações oriundas das comissões internacionais AIEA, LNHb, CAPINTEC, LNHb, CIEMAT. Concluiu-se que os testes exigidos pela CNEN são mais rigorosos e abrangentes do que os testes internacionais, muito embora isto não signifique que as políticas nacionais sejam aplicadas com total rigor.

Espera-se que as informações aqui expostas possam contribuir para a comunidade acadêmica, de modo a que se configure melhor entendimento quanto à importância do controle de qualidade em medicina nuclear.

7. Agradecimentos

O autor agradece à equipe de revisão da Revista CALIBRE.

8. Referências

- [1] Aguado, M.; Garcia, A. Control de Calidad de Activímetros. *Rev Esp Med Nucl* 23, 2004.
- [2] Biral, A. Radiações Ionizantes para Médicos, Físicos e Leigos. Florianópolis: Editora Insular, 2002.
- [3] BRASIL. COMISSÃO Nacional de Energia Nuclear - CNEN. Norma de Requisitos de Radioproteção e Segurança para Serviços de Medicina Nuclear – NE-3.05, CNEN, 2013.
- [4] Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas – CIEMAT. Protocolo para la Calibración y el Uso de Activímetros, Madrid, 2003.
- [5] Costa, A.; Caldas, L. Intercomparison and Calibration of Dose Calibrators Used in Nuclear Medicine Facilities. *Radiol Bras* 36, 2003.
- [6] Farrelly Pessoa, E., *et al.* Introdução à Física Nuclear. São Paulo: Editora Universidade de São Paulo, 1978.
- [7] International Atomic Energy Agency - IAEA. Quality Control Atlas for Scintillation Camera Systems, Vienna, 2003.

- [8] Laboratoire National Henri Becquerel – LNHB. Guide d'Utilisation et de Controle de Qualité des Activimètres. Société Française de Radiopharmacie, Paris, 2006.
- [9] Martins, E. W. Estudos e Determinação de Fatores de Influência das Dimensões dos Frascos de Radiofármacos Utilizados no IPEN para calibração de Ativímetros. São Paulo: IPEN, 2010.
- [10] Mazzilli, B., *et al.* Noções Básicas de Proteção Radiológica. Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, 2002.
- [11] Moraes, A. Manual de Medicina Nuclear. São Paulo: Editora Atheneu, 2007.
- [12] National Physical Laboratory – NPL. Radionuclide Calibrator User's Manual. Ramsey, New Jersey, 1997.
- [13] Powsner, R.; Powsner, E. Essential Nuclear Medicine Physics: Quality Control. New York, 2006.
- [14] Tauhata, L. et al. Radioproteção e Dosimetria – Fundamentos. Instituto de Radioproteção e Dosimetria IRD/CNEN, 2014.
- [15] Tharall, J. Medicina Nuclear. São Paulo: Editora Guanabara Koogan, 2003.
- [16] Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS e CNEN Comissão Nacional de Medicina Nuclear. Princípios Básicos de Segurança e Proteção Radiológica, 4ª ed, 2014.

Testes de Controle de Qualidade do Medidor de Atividade extraído da Norma 3.05 da CNEN, 2013.			
Periodicidade	Teste		Objetivo
Repetitividade	A	D	Verificar a constância na resposta do equipamento para diferentes fontes de referência, devendo as medidas estar dentro de um intervalo de $\pm 5\%$ (cinco por cento).
Ajuste zero	A	D	Verificar e ajustar o “zero” do calibrador de dose, se o equipamento dispuser dessa função.
Radiação de fundo	A	D	Verificar a radiação de fundo devendo as medidas estar dentro de um intervalo de $\pm 20\%$ (vinte por cento).
Alta voltagem	A	D	Verificar a tensão de entrada, quando disponível, no calibrador de dose, devendo as medidas estar dentro de um intervalo de $\pm 1\%$ (um por cento).
Exatidão	A	S	Verificar a exatidão nas medidas de um calibrador de dose através da utilização das fontes de referência, devendo as medidas estar dentro de um intervalo de $\pm 10\%$ (dez por cento).
Precisão	A	S	Verificar a precisão nas medidas de um calibrador de dose através da utilização das fontes de referência, devendo as medidas estar dentro de um intervalo de $\pm 5\%$ (cinco por cento).
Linearidade	A	An	Verificar a linearidade nas medidas de um calibrador de dose através da utilização de uma fonte de meia vida curta, devendo as medidas estar dentro de um intervalo de $\pm 10\%$ (dez por cento).
Teste de geometria	A	Na	Verificar se os fatores de calibração do equipamento para recipientes e volumes diferentes daqueles usados nos testes usuais estão corretos.
A = Aceitação, ou após serviços de manutenção ou correção, ou quando os valores estiverem fora do intervalo de tolerância com relação ao valor de referência. D = Diário. S = Semestral. An = Anual.			

Tabela 1 - Testes de controle de qualidade do medidor de atividade extraído da Norma 3.05 da CNEN, 2013.