



I-028 – AVALIAÇÃO CONCEITUAL DOS CUSTOS DE IMPLANTAÇÃO E OPERAÇÃO PARA PLANTAS DE DESSALINIZAÇÃO EM DIVERSAS ESCALAS

André Lermontov⁽¹⁾

Engenheiro Químico pela Escola de Química da UFRJ. Mestre em Processos Químicos e Bioquímicos da Escola de Química da UFRJ. Doutor em Processos Químicos e Bioquímicos da Escola de Química da UFRJ. Superintendente de Pesquisa e Tecnologia do Grupo Águas do Brasil S/A com mais de 20 anos de experiência em saneamento ambiental, tratamento de água e efluentes.

Rodrigo Alves dos Santos Pereira

Mestre em Processos Químicos e Bioquímicos na Escola de Química da UFRJ. Engenheiro Ambiental pela Escola de Engenharia da UFF. Especialista de Pesquisa e Tecnologia do Grupo Águas do Brasil S/A.

Endereço⁽¹⁾: Rua Marquês do Paraná 110 - Centro - Niterói - RJ - CEP: 24030-211 - Brasil - Tel: +55 (21) 2729-9200 - e-mail: andre.lermontov@grupoaguasdobrasil.com.br

RESUMO

A osmose reversa para a dessalinização de água do mar vem sendo utilizada em diversos países ao redor do mundo, com milhares de plantas em operação. A operação de uma planta de osmose inversa implica na utilização de diversas etapas como captação, filtração em peneiras, coagulação, floculação, filtração em membranas de micro ou ultrafiltração, filtração em cartuchos, tratamento e neutralização e descarte de correntes de produtos de limpeza, além do descarte de corrente concentrada em sais dissolvidos.

Este estudo simulou a viabilidade técnica econômica da implantação de uma estação de tratamento de água pela tecnologia de dessalinização com vazões variadas entre 500 e 5.000 L/s (1.800 e 18.000 m³/h) com fins de abastecimento urbano. São apresentados os custos de capital (CAPEX) e custos de operação (OPEX), assim como o custo por metro cúbico produzido de água com base no custo de operação. Neste estudo foram adotadas várias premissas que nortearam a composição dos custos, sendo as mais importantes a cotação do dólar em R\$ 3,50 Reais e o preço da energia elétrica em 0,55 R\$/kWh.

PALAVRAS-CHAVE: Dessalinização, Custos, Orçamento.

INTRODUÇÃO

Muitas estações de tratamento de água brasileiras encontram-se ou trabalhando acima de sua capacidade ou produzindo água com qualidade insatisfatória. Procurando suprir a demanda sempre crescente de água, mantendo sua qualidade, defronta-se com a escassez de recursos. A partir de tal constatação, faz-se necessário estudar as inúmeras outras possibilidades de se obter água em quantidade mantendo a qualidade e custos baixos.

PANORAMA GERAL

A maior fonte, quase inesgotável, de água são os oceanos. A principal desvantagem, no entanto, é sua alta salinidade. Segundo a Organização Mundial de Saúde (OMS) o limite admissível de salinidade na água potável é de 500 mg/L. O CONAMA 357 de 2005 complementado pelo CONAMA 430 de 2011 enquadra as águas doces às quais tem salinidade entre 0 e 0,5 ‰, águas salobras, com salinidade superior a 0,5 ‰ e inferior a 30 ‰ e águas salinas, com salinidade igual ou superior a 30 ‰.

A salinidade de água do mar está na faixa de 35.000 a 45.000 mg/L. Dessalinizar, em geral, é remover o sal da água do mar ou de água contendo sais dissolvidos, até atingir concentrações aceitáveis para os usos específicos.

Um dos processos de dessalinizar a água é através da utilização de membranas de Osmose Inversa (OI). Existem outros que não serão abordados neste artigo. Este processo já data do século 17 quando marinheiros japoneses destilavam água do mar em suas embarcações para produzir água potável. A primeira planta



Industrial, foi construída na ilha de Malta em 1881, mas somente na década de 60 do século XX que a tecnologia usando Osmose Reversa se iniciou. Hoje já conta com mais de 14.000 plantas de dessalinização ao redor do mundo, correspondendo a uma capacidade superior a 93 milhões de metros cúbicos por dia.

TECNOLOGIAS PARA DESSALINIZAÇÃO

Basicamente, existem 3 rotas para dessalinizar a água, sendo eles processos que usam calor e destilação, processos de troca iônica e processos de filtração. A filtração das águas salgadas em placas de membranas é denominada de Osmose Reversa.

A Osmose Reversa (RO) ocorre quando se aplica na solução uma pressão de valor maior que o de sua pressão osmótica. Neste caso, para se restabelecer o equilíbrio, o solvente difunde no sentido da solução mais concentrada para a menos concentrada. Inverte-se assim o sentido do escoamento do solvente que ocorreria na osmose, daí a denominação de Osmose Inversa (OI), ou como comercialmente é mais conhecida, Osmose Reversa (OR). O nome Osmose Inversa foi adotado lembrando-se que no processo, o fluxo permeado é no sentido inverso do fluxo permeado em condições de osmose natural.

Na dessalinização de água do mar (concentração de NaCl em torno de 3,5%) é necessário aplicar uma pressão superior a 30 bar, já que pressões inferiores não produzirão fluxo de permeado (água dessalinizada).

A QUALIDADE DA ÁGUA

A água obtida em terra difere substancialmente da água do mar pela quantidade relativa de sais encontrados nas mesmas. Água de rio pode ter até 1.500 mg/L de salinidade, a salinidade da água salobra apresenta uma faixa de 3.000 a 10.000 mg/L, enquanto que a salinidade da água do mar varia de 10.000 mg/L (como no caso do mar Báltico) até 45.000 mg/L (como no Golfo Árabe). A baixa salinidade pode ser resultado da presença de foz de rios, bem como devido à abundância da precipitação de chuvas. A salinidade elevada pode ser resultado de altas temperaturas que promovem a evaporação.

ESTRUTURA DE UMA PLANTA DE DESSALINIZAÇÃO

Uma planta de dessalinização utilizando OR tipicamente apresenta os seguintes constituintes: a) captação; b) pré-tratamento; c) bombas de transferência; d) bombas de alta pressão; e) sistema de Osmose Reversa; f) sistema para recuperação de energia; e g) pós-tratamento. A Figura 1 mostra os principais componentes de uma planta de dessalinização.

O tipo de captação da água é fundamental para o projeto e dimensionamento das etapas de pré-tratamento. Dependendo da capacidade da planta podem ser utilizados dois tipos de captação: por bombeamento direto do mar (open-ocean intake) ou através de poços instalados na proximidade do litoral (beach well).

Durante a produção de água dessalinizada há a produção concomitante de uma corrente com elevado teor de sais, denominada corrente do concentrado. Devido à pressão osmótica ser muito elevada, o descarte desta corrente pode afetar a vida aquática. Quando não há possibilidade de diluição, ou seja, não há uma planta de geração de energia associada, recomenda-se não descartar no fundo do mar, pois a mistura é mais lenta. Para melhorar a mistura pode-se utilizar dispersores ou emissários submarinos com difusores.

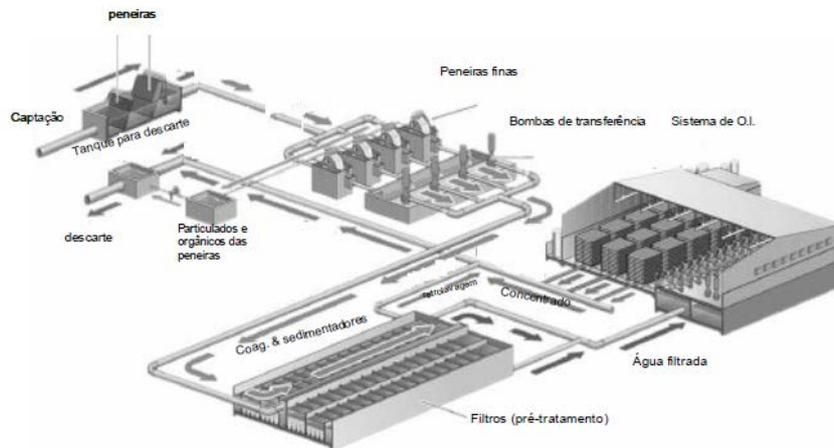


Figura 1 – Esquemático típico de uma ETA de dessalinização

A Figura 2 mostra um organograma das etapas e principais variáveis a serem consideradas num projeto de uma planta de dessalinização.



Figura 2 – Organograma de variáveis e fatores

METODOLOGIA ORÇAMENTÁRIA

A Tabela 1 exemplifica as principais metodologias orçamentárias. A metodologia conceitual tem como base um comparativo e estimativa do projeto com fatores de escala. Esta metodologia é utilizada como propósito de planejamento e tem um resultado esperado de baixa precisão, mas dando uma ordem de grandeza. Outras metodologias devem ser empregadas no decorrer do projeto a fim de cada vez mais precisar o orçamento do projeto desejado. Este artigo foi todo desenvolvido com a metodologia conceitual, onde estimaremos os custos

usando fatores de escala de plantas semelhantes cadastradas em diversos bancos de dados internacionais de plantas de dessalinização e estimativas de rateio de despesas das mesmas bases cadastrais.

TABELA 1 – Metodologias de estimação orçamentárias

Tipo de Estimativa	Base de Custo	Propósito	Precisão Esperada
Conceitual	<ul style="list-style-type: none"> • Projetos Semelhantes • Fatores de escala 	<ul style="list-style-type: none"> • Planejamento 	Baixa
Preliminar	<ul style="list-style-type: none"> • Projeto Preliminar • Modelos de Custo 	<ul style="list-style-type: none"> • Seleção de Tecnologia & Equipamentos 	Média Baixa
Orçamentário	<ul style="list-style-type: none"> • Projeto Avançado • Orçamentos Preliminares 	<ul style="list-style-type: none"> • Autorização do Projeto • Orçamento 	Média Alta
Detalhado	<ul style="list-style-type: none"> • Projeto Detalhado Final • Orçamentos Finais 	<ul style="list-style-type: none"> • Implantação Final • Gerenciamento de Projeto 	Alta

SIMULAÇÃO DE UM SISTEMA DE OSMOSE INVERSA

Para o dimensionamento de um sistema de osmose reversa podem ser utilizados diversos softwares computacionais, como por exemplo o ROSA da Dow, o Toray DS da Toray, o Winflows da GE entre outros disponíveis on-line. Para propósitos deste trabalho foi utilizada o software ROSA da DOW com as condições apresentadas na Figura 3, para várias capacidades de produção de água dessalinizada: 500 a 5.000 L/s (43.200 a 432.000 m³/dia). Considerou-se que a água de alimentação do sistema de Osmose Rnversa apresente SDI menor que 3, que a temperatura e pH de operação sejam mantidas em torno de 25°C e 8,0, respectivamente. A composição da água do mar, com 3,5% de sólidos totais dissolvidos foi estimada com base nos levantamentos realizados em laboratórios para águas costeiras do estado do Rio de Janeiro. A recuperação da água de alimentação foi mantida em 40% para representar uma estimativa mais conservadora. A membrana selecionada para a simulação foi de fabricação da Dow/Filmtec com código SW30HR-380.

A Tabela 2 apresenta os principais detalhes obtidos na simulação do sistema de OR. A eficiência de recuperação de energia foi estimada em 90%, o que correspondeu a uma energia específica requerida de 2,54 kWh/m³ de água dessalinizada.

Esta simulação foi realizada para todas as capacidades em análise, ou seja, de 500 a 5.000 L/s, variando em intervalos de 500 L/s. A Tabela 3 apresenta os valores de área de membrana para todas as capacidades avaliadas. Os valores de pressão, vazão de alimentação por vaso de pressão e recuperação foram mantidos. A qualidade do permeado, conseqüentemente, também ficou inalterada.

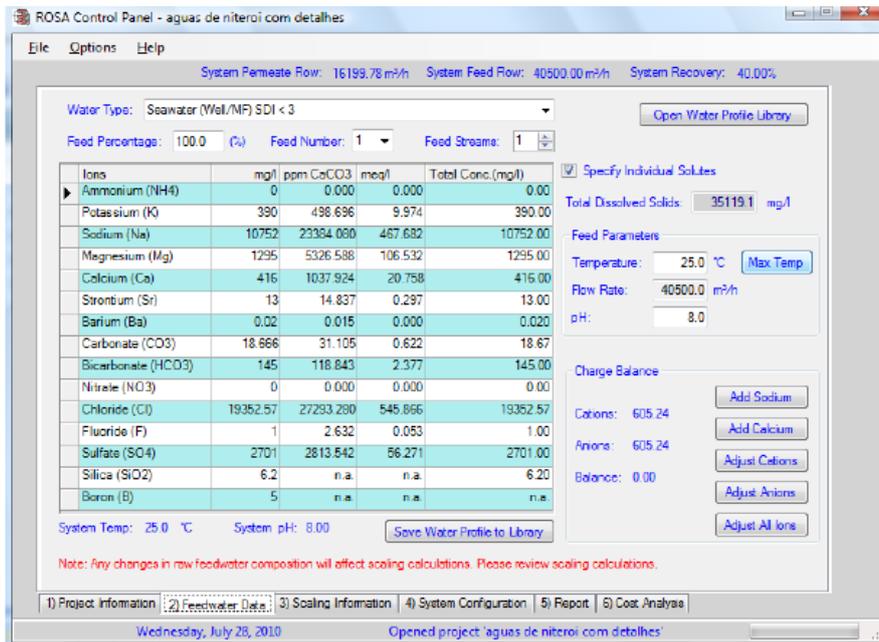


Figura 3 - Dados para simulação do sistema de Osmose Inversa para a vazão de permeado correspondente a 4.500 L/s.

TABELA 2 - Detalhes do sistema de O.I. para a vazão de permeado de 4.500 L/s

Vazão de alimentação	40.500	m³/h
Pressão de alimentação	57,7	bar
Vazão de permeado	16.200	m³/h
	4.500	L/s
Vazão de concentrado	24.300	m³/h
Pressão do concentrado	55,5	bar
Numero de módulos	28.350	
Área de membrana	1.000.811,7	m²
Número de vasos de pressão	4.050	
Pressão osmótica - alimentação	24,79	bar
Pressão osmótica - concentrado	42,18	bar
Diferença de pressão média	23,09	bar
Potência requerida	81.166,8	kW
Energia específica bruta	5,01	kWh/m³
Eficiência de recuperação de energia	0,9	
Energia específica requerida	2,41	kWh/m³

Tabela 4 - Comparação das demandas de área de membrana e potência total para as diferentes capacidades avaliadas

Capacidade (L/s)	Número de módulos	Vasos de pressão
500	3.150	450
1.000	6.300	900
1.500	9.450	1350
2.000	12.600	1800
2.500	15.750	2250
3.000	18.900	2700
3.500	22.050	3150
4.000	25.200	3600
4.500	28.350	4050
5.000	31.500	4500

CUSTOS DO SISTEMA DE OSMOSE INVERSA

Os custos para implementação podem ser divididos em custos de construção (investimento) e custos de operação e manutenção. Os custos relativos à construção incluem custos diretos e indiretos, sendo que os indiretos são estimados com base nos custos diretos.

Entre os custos diretos são relacionados: terreno, captação, equipamentos de osmose inversa e membranas, instrumentação e controles, unidades de pré e pós tratamentos, sistemas para limpeza química, tanques de armazenamento, geradores, transformadores, bombas, tubulação, válvulas, instalação elétrica, construção civil, além de facilidades para descarte da corrente de concentrado e de limpeza.

O investimento indireto representa o montante gasto em atividades não relacionadas diretamente com o material e a mão-de-obra das instalações gerais, como por exemplo, engenharia e supervisão, uso de patentes, serviços, etc. Este compreende 25% do investimento direto.

O investimento direto se divide em ISBL (“inside battery limits”) e OSBL (“outside battery limits”). O ISBL inclui os equipamentos, válvulas, tubulações e instrumentação que participam diretamente do processo. Este é estimado somando-se os valores de custo de aquisição de todos os equipamentos principais e multiplicando-se pelo fator de Lang (fl). Este fator leva em consideração a aquisição de outros itens auxiliares aos equipamentos (tubulações, etc.). O fator de Lang usualmente empregado em avaliações de processos químicos é cerca de 4,5. O investimento OSBL inclui unidades auxiliares necessárias para a operação do processo. O investimento OSBL pode ser considerado como sendo 45% dos custos ISBL.

O investimento de giro compreende o montante de capital necessário para operar a planta, podendo ser estimado em 15% do investimento total. O investimento de partida é o montante de capital necessário para iniciar a operação, correspondendo a 8% do investimento fixo. Os custos de operação e manutenção são divididos em fixos e variáveis.

Os custos fixos incluem amortização (5 a 10% do custo de capital total) e seguro (0,5% do custo de capital total). Os custos variáveis incluem pessoal, energia, produtos químicos e manutenção. O principal custo de manutenção é a reposição dos módulos de permeação, que são estimados em até 20% ao ano. Os demais custos de manutenção podem ser estimados em torno de 2% do custo de capital total.

Para a estimativa dos custos, inicialmente, foram calculados os custos para um trem do sistema de osmose inversa. Os principais materiais envolvidos em um trem são: módulos, vasos de pressão, válvulas e tubulações. As bombas, filtros cartucho e trocadores de pressão são avaliados posteriormente. Os valores relativos aos módulos e vasos de pressão foram obtidos a partir de consulta a literatura e a página de fornecedores na Internet, estando expressos em dólares americanos. Esses valores foram convertidos utilizando a taxa de câmbio de 1 US\$ = 3,50 R\$ e uma taxa de nacionalização de 80%, estando apresentados na Tabela 5. A Tabela 6 apresenta os custos dos vasos e módulos em função da capacidade da planta de dessalinização.

TABELA 5 - Custos unitários dos vasos de pressão e módulos instalados no sistema de O.I.

Item	Custo instalado (US\$)	Custo no país (R\$)
Módulos (SW40HR)	520,00	3.276,00

TABELA 6 - Custos totais das membranas para diversos sistemas de OR

Capacidade (L/s)	Número de módulos	Custo total das membranas (R\$)
500	3.150	10.319.400,00
1.000	6.300	20.638.800,00
1.500	9.450	30.958.200,00
2.000	12.600	41.277.600,00
3.000	18.900	61.916.400,00
4.000	25.200	82.555.200,00
5.000	31.500	103.194.000,00

A estimativa dos demais componentes foi realizada com base em valores proporcionais relatados na literatura e obtidos na base DesalData.com, como pode ser observado na Tabela 7 e composição da Figura 4 extraída diretamente do sítio. A Tabela 10 apresenta os valores de cada item, admitindo que a proporcionalidade observada se mantenha na faixa de capacidades de produção investigadas.

TABELA 7 - Contribuição dos diversos componentes no custo de investimento total em uma planta de dessalinização (Fonte: DesalData.com)

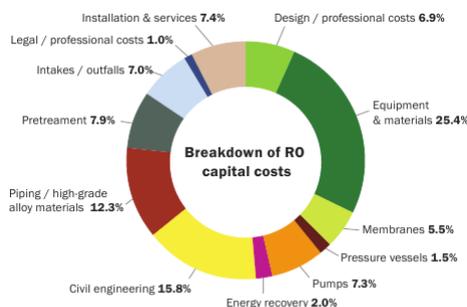
Item	Capacidade (L/s)	% do Custo
Membranas		5,9%
Bombas		7,9%
Captação / Emisário & Rejeito		6,8%
Construção Civil		16,1%
Custos de Desenvolvimento e Projeto		6,8%
Equipamentos e Materias		25,5%
Instalação e Serviços Diversos		7,6%
Jurídico e Custos Ambientais		1,0%
Pré-tratamento (MF/UF)		7,2%
Recuperação de Energia		1,5%
Tubulações, Conexões e Válvulas		12,3%

Para estimar o custo de investimento nacionalizado de diversos componentes da planta de dessalinização foram adotadas diferentes porcentagens sobre os valores destes componentes.

A área requerida para a construção da planta de Osmose Reversa, incluindo as etapas de pré-tratamento, adequação do permeado e descarte, foi estimada com base em estudo realizado pelo Departamento do Interior do EUA, representado na Tabela 8. Os valores confirmam que cerca de 40 a 60% da área é utilizada pelo sistema de OR.

TABELA 8 - Relação entre capacidade da planta de dessalinização e área de construção requerida.

L/s	m ² necessários
10	800 - 1.600
50	2.000 - 32.000
100	6.100 - 8.100
250	10.100 - 14.200
500	18.200 - 24.300
1000	26.300 - 34.400
2500	36.400 - 48.600
3500	45.200 - 60.000



Source: GWI DesalData

Figura 4 – Divisão do investimento (gráfico original em inglês, fonte: desaldata.com)

A demanda de área para uma planta de dessalinização, em função da capacidade requerida é apresentada na Tabela 9 dos custos estimados. O valor de R\$ 400,00 por m² foi utilizado para a estimativa do custo do terreno.

TABELA 9 - Custos de Investimento dos diversos componentes em uma planta de dessalinização

Vazão (l/s)	500,00	1.000,00	1.500,00	2.000,00	3.000,00	4.000,00	5.000,00	l/s
Vazão (m ³ /h)	1.800,00	3.600,00	5.400,00	7.200,00	10.800,00	14.400,00	18.000,00	m ³ /h
Produção anual (m ³ /ano)	15.768.000,00	31.536.000,00	47.304.000,00	63.072.000,00	94.608.000,00	126.144.000,00	157.680.000,00	m ³ /ano
Área requerida	20.000	28.000	35.000	40.000	50.000	60.000	70.000	m ²
Valor terreno	400,00	400,00	400,00	400,00	400,00	400,00	400,00	R\$/m ²
Custo Total Terreno	8.000.000,00	11.200.000,00	14.000.000,00	16.000.000,00	20.000.000,00	24.000.000,00	28.000.000,00	R\$
CAPEX Terreno	8.000.000,00	11.200.000,00	14.000.000,00	16.000.000,00	20.000.000,00	24.000.000,00	28.000.000,00	R\$

A Tabela 10 insere os valores das membranas calculadas na Tabela 6 e através de um processo de pró rata (Tabela 7) distribui o restante dos custos nas outras faculdades. Os valores foram a seguir comparados com investimentos realizados em plantas similares encontrado na literatura com pequeno desvio de valores no arredondamento. A literatura informa que o fator de escala para plantas maiores tende a reduzir o valor de investimentos comparativamente com plantas menores.

TABELA 10 – CAPEX das plantas de diversos tamanhos

Vazão (l/s)	500,00	1.000,00	1.500,00	2.000,00	3.000,00	4.000,00	5.000,00	l/s
Membranas	10.319.400,00	20.638.800,00	30.958.200,00	41.277.600,00	61.916.400,00	82.555.200,00	103.194.000,00	R\$
Bombas	13.817.501,69	27.635.003,39	41.452.505,08	55.270.006,78	82.905.010,17	110.540.013,56	138.175.016,95	R\$
Captação / Emisário & Rejeito	11.893.545,76	23.787.091,53	35.680.637,29	47.574.183,05	71.361.274,58	95.148.366,10	118.935.457,63	R\$
Construção Civil	28.159.718,64	56.319.437,29	84.479.155,93	112.638.874,58	168.958.311,86	225.277.749,15	281.597.186,44	R\$
Custos de Desenvolvimento e Projeto	11.893.545,76	23.787.091,53	35.680.637,29	47.574.183,05	71.361.274,58	95.148.366,10	118.935.457,63	R\$
Equipamentos e Materiais	44.600.796,61	89.201.593,22	133.802.389,83	178.403.186,44	267.604.779,66	356.806.372,88	446.007.966,10	R\$
Instalação e Serviços Diversos	13.292.786,44	26.585.572,88	39.878.359,32	53.171.145,76	79.756.718,64	106.342.291,53	132.927.864,41	R\$
Jurídico e Custos Ambientais	1.749.050,85	3.498.101,69	5.247.152,54	6.996.203,39	10.494.305,08	13.992.406,78	17.490.508,47	R\$
Pré-tratamento (MF/UF)	12.593.166,10	25.186.332,20	37.779.498,31	50.372.664,41	75.558.996,61	100.745.328,81	125.931.661,02	R\$
Recuperação de Energia	2.623.576,27	5.247.152,54	7.870.728,81	10.494.305,08	15.741.457,63	20.988.610,17	26.235.762,71	R\$
Tubulações, Conexões e Válvulas	21.513.325,42	43.026.650,85	64.539.976,27	86.053.301,69	129.079.952,54	172.106.603,39	215.133.254,24	R\$
Vasos de Pressão	2.448.671,19	4.897.342,37	7.346.013,56	9.794.684,75	14.692.027,12	19.589.369,49	24.486.711,86	R\$
TOTAL	174.905.084,75	349.810.169,49	524.715.254,24	699.620.338,98	1.049.430.508,47	1.399.240.677,97	1.749.050.847,46	R\$
CAPEX Planta Dessal	174.905.084,75	349.810.169,49	524.715.254,24	699.620.338,98	1.049.430.508,47	1.399.240.677,97	1.749.050.847,46	R\$

CUSTOS OPERACIONAIS E DE MANUTENÇÃO (O&M)

O consumo de energia, principalmente, devido ao bombeamento e pressurização da solução de alimentação e a reposição de membranas apresentam boa parte dos custos operacionais.

O custo relacionado com a demanda de energia da unidade, em função da capacidade de produção de água desmineralizada, é apresentado na Tabela 11. Para esta estimativa, os valores calculados para o sistema de O.I. (2,54 kWh/m³) foram utilizados. Considerou-se que a demanda de energia no sistema de osmose corresponde a 66% de toda a energia consumida na planta, equivalente a 3,91 kWh/m³. Desta forma, utilizado o custo da energia em R\$ 0,55/kWh, pode-se estimar o custo total da energia. Considerou-se 365 dias e 24 horas por dia.

TABELA 11 - Custo da Energia em função da capacidade da planta de dessalinização

Capacidade (L/s)	Potencia total (kWh/ano)	Custo total com energia (R\$/ano)
500	61.616.492,31	33.889.070,77
1000	123.232.984,62	67.778.141,54
1500	184.849.476,92	101.667.212,31
2000	246.465.969,23	135.556.283,08
3000	369.698.953,85	203.334.424,62
4000	492.931.938,46	271.112.566,15
5000	616.164.923,08	338.890.707,69

A vida útil de uma membrana de osmose reversa é considerada como 5 anos, entretanto com a utilização do pré-tratamento por micro ou ultrafiltração, pode-se considerar 7 anos com uma estimativa adequada. Este tempo de utilização da membrana implica em uma reposição anual de cerca de 15% da membrana instalada.

Há a necessidade de reposição das membranas de micro ou ultrafiltração, cujo tempo de vida deve ser mantido em 5 anos, ou seja, 20% de reposição anual. O custo das membranas de MF/UF esta em torno de 40% do valor do equipamento de pré-tratamento, e a reposição será 9% deste valor.

A Tabela 12 mostra a relação entre os diferentes itens que compõem os custos operacionais (O&M). Os percentuais foram normalizados, pois somente os custos relacionados com o consumo de energia chegam a 50% dos custos de O&M totais.

Como se pode observar, os custos relacionados a produtos químicos, manutenção e outras despesas praticamente equivalem a metade dos custos operacionais, excluindo o custo da energia. Desta forma, nesta avaliação preliminar, adotou-se como critério que estes custos sejam equivalentes aos custos de reposição de membrana e pessoal.

TABELA 12 - Relação entre os custos operacionais e de manutenção observados na planta de Ashkelon/Israel.

Componente do custo O&M	Contribuição no custo total (%)	
	Askelon/Israel	Espanha
Produtos químicos	22 – 25	27 – 30
Reposição de membranas	19 – 24	15 – 18
Manutenção	23 – 33	15 – 23
Pessoal	16 – 25	30 – 40
Outros custos	05 – 08	01 – 02

Voutchkof (2011) distribui os principais custos operacionais de uma planta de dessalinização em poucas rubricas gerais de maior importância. Estas encontram-se relacionadas na Tabela 13.

TABELA 13 – Principal distribuição dos custos de O&M

TOTAL OPEX	
Custo Variável	72,9%
1. Energia	50,1%
2. Produtos Químicos	7,8%
3. Troca de Membranas	9,4%
4. Descarte	5,6%
Custo Fixo	27,1%
1. Recursos Humanos	8,1%
2. Manutenção	8,9%
3. Análise de Qualidade	3,2%
4. Opex indireto	6,9%
TOTAL	100,0%

A Tabela 14 relaciona então a distribuição de todos os custos envolvidos nos projetos com as capacidades diferentes estudadas. Similarmente ao CAPEX o valor da energia é inserido e os outros custos distribuídos conforme suas percentagens.

TABELA 14 – Relação completa dos custos

Vazão (l/s)	500,00	1.000,00	1.500,00	2.000,00	3.000,00	4.000,00	5.000,00	l/s
Vazão (m³/h)	1.800,00	3.600,00	5.400,00	7.200,00	10.800,00	14.400,00	18.000,00	m³/h
Produção anual (m³/ano)	15.768.000,00	31.536.000,00	47.304.000,00	63.072.000,00	94.608.000,00	126.144.000,00	157.680.000,00	m³/ano
Custo Variável								
1. Energia	33.889.070,77	67.778.141,54	101.667.212,31	135.556.283,08	203.334.424,62	271.112.566,15	338.890.707,69	R\$/ano
2. Produtos Químicos	5.711.320,67	11.422.641,34	17.133.962,01	22.845.282,68	34.267.924,02	45.690.565,37	57.113.206,71	R\$/ano
3. Troca de Membranas	6.882.873,63	13.765.747,26	20.648.620,89	27.531.494,51	41.297.241,77	55.062.989,03	68.828.736,29	R\$/ano
4. Descarte	4.100.435,35	8.200.870,71	12.301.306,06	16.401.741,41	24.602.612,12	32.803.482,83	41.004.353,53	R\$/ano
Custo Fixo								
1. Recursos Humanos	5.930.986,85	11.861.973,70	17.792.960,55	23.723.947,40	35.585.921,10	47.447.894,80	59.309.868,50	R\$/ano
2. Manutenção	6.516.763,33	13.033.526,66	19.550.289,99	26.067.053,32	39.100.579,98	52.134.106,63	65.167.633,29	R\$/ano
3. Análise de Qualidade	2.343.105,92	4.686.211,83	7.029.317,75	9.372.423,66	14.058.635,50	18.744.847,33	23.431.059,16	R\$/ano
4. Opex indireto	5.052.322,13	10.104.644,26	15.156.966,40	20.209.288,53	30.313.932,79	40.418.577,05	50.523.221,32	R\$/ano
TOTAL OPEX	70.426.878,65	140.853.757,30	211.280.635,95	281.707.514,60	422.561.271,90	563.415.029,20	704.268.786,49	R\$/ano

Os custos operacionais foram simulados para uma mesma condição operacional. Entretanto os mesmos podem sofrer grande variação em função de diversos fatores que afetam a planta. Alguns destes são enumerados a seguir.

- Temperatura e Salinidade da Água;
- Qualidade da Água Bruta/Tratada;
- Custo unitário de mão-de-obra, construção e licenciamento;
- Custo de Capital;
- Custo da Energia;
- Captação / Rejeitos;
- Fornecedores;
- Cronograma de implantação;
- Riscos.

A influência destes fatores, para mais ou para menos, não serão discutidos neste artigo e variam de projeto para projeto.

Para a determinação de um preço de produção da água deve-se ao final de toda a modelagem pegar-se o valor do investimento e amortiza-lo ao longo de um período, neste caso 20 anos. Após a amortização ao longo de 20 anos e dividindo por todo o volume produzido, partindo-se da premissa que a planta operou 24h por dia ao longo de 365 dias e 20 anos, chegou-se a um valor de CAPEX de 0,58 R\$/m³/20anos para a planta da 500 L/s, 0,57 para as plantas de entre 1.000 e 3.000 L/s e 0,56 para as plantas de 4.000 e 5.000 L/s.

O custo operacional da produção anual foi calculado em R\$ 4,47. Nestas condições, na média, encontramos um custo da água produzida de R\$ 5,05/m³

Esta média é bastante próxima a uma média mundial de diversas plantas de grande porte conforme observa-se na Figura 5.

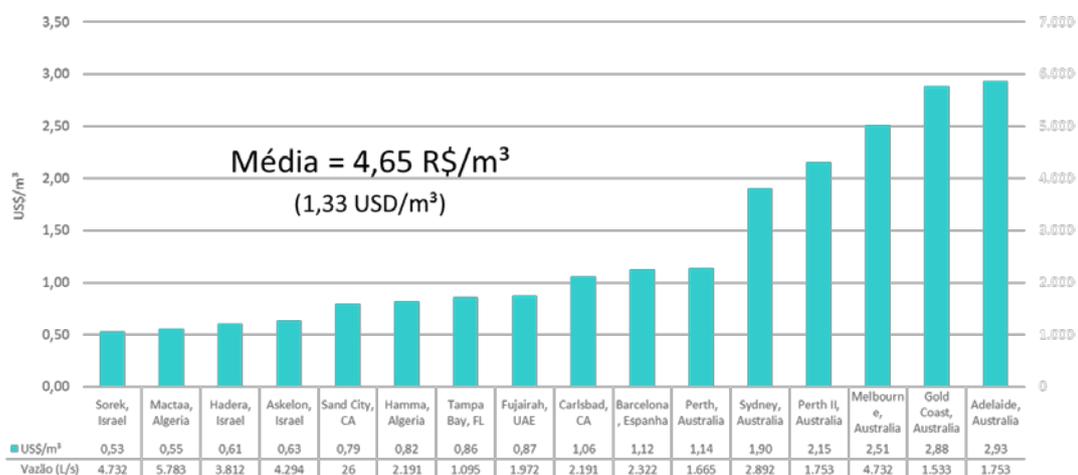


Figura 5 – Média do custo de produção da água dessalinizada ao redor do mundo

CONCLUSÃO

A dessalinização de água do mar por osmose reversa cresceu rapidamente ao longo dos últimos anos tornando-se uma das principais e mais consolidadas tecnologias neste segmento ao redor do mundo. A tecnologia de membranas evoluiu permitindo aumentos significativos de produção e redução de custos.

O estudo ilustra de forma satisfatória, com base em diversas premissas, a composição dos custos de capital (CAPEX) e custos de operação (OPEX), finalizando com um preço aproximado do custo total do m³ produzido para plantas de diversos tamanhos.



Para o cálculo do custo final da água produzida deve-se levar em consideração todo um fluxo de caixa, incluindo algumas variáveis como amortização, TIR, VPL e impostos diversos, entre outros, ficando desta forma o leitor livre para simular e interpretar os resultados obtidos e pretendidos da forma que lhe convir.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AFIFY, A. “Prioritizing desalination strategies using multi-criteria decision analysis”. *Desalination* 250 (2010) 928–935.
2. CHARCOSSET, C. “A review of membrane processes and renewable energies for desalination”. *Desalination* 245 (2009) 214–231
3. CIPOLLINA, A., MICALÉ G., RIZZUTI L., “Seawater Desalination – Conventional and Renewable Energy Processes” ed. Springer, 2009.
4. DA SILVEIRA, A.P.P., [et. al.], *Dessalinização de Águas*, Oficina de Textos, 2015.
5. DREIZIN, Y., “Ashkelon seawater desalination project — off-taker’s self costs, supplied water costs, total costs and benefits”, *Desalination*, 190 (2006) 104–116.
6. FERRAZ, K. C. “Origem e transferência de nutrientes para a Produção Primária de *Ulva* sp. na Ressurgência de Arraial do Cabo: Utilização de Composições Isotópicas naturais de C e N ($\delta^{13}C$, $\Delta^{14}C$ e $\delta^{15}N$)”, dissertação de Mestrado, Universidade Federal Fluminense (UFF) - RJ, 2003.
7. GLOBAL WATER INTELLIGENCE, “Desalination Markets 2010”,ed. Media Analytics Ltd., 2010
8. GREENLEE, L. F., LAWLER, D. F., FREEMAN, B. D., MARROTC, B., MOULINC, P. “Reverse osmosis desalination: Water sources, technology, and today’s challenges”. *Water Research* 43 (2009) 2317 – 2348
9. <http://www.dessaldata.com>, diversos acessos: 06/2009 a 07/2010.
10. “Industry Consortium Analysis of Large Reverse Osmosis/Nanofiltration Element” <http://www.usbr.gov/pmts/water/publications/reportpdfs/report114.pdf>, 05/07/2010.
11. KALOGIROU, S.A. “Seawater desalination using renewable energy sources”. *Progress in Energy and Combustion Science* 31 (2005) 242–281.
12. KARAGIANNIS, I. C., SOLDATOS, P. G., “Water desalination cost literature: review and assessment”. *Desalination* 223 (2008) 448–456.
13. KUCERA, J., “Reverse Osmosis – Industrial Applications and Processes” ed. John Wiley & Sons, Inc., 2010
14. LI N. N., FANE A. G., HO W. S. W., MATSUURA T., “Advanced Membrane Technology and Applications” ed. John Wiley & Sons, Inc., 2008.
15. MALLEVIALLE J., ODENDAAL P.E., WIESNER M. R., “Water Treatment Membrane Processes” Ed. McGraw-Hill, 1996.
16. ROSA versão 7.2.1, “Reverse Osmosis System Analysis”, 2010.
17. WITTHOLZ, M. K., O’Neill B. K., Colby C.B., Lewis D., “Estimating the cost of desalination plant using a cost database”. *Desalination* 229 (2008) 10-20.
18. VOUTCHKOV, N., *Desalination Cost Assessment and Management*, ed. TechnoBiz Communications Co. Ltd., 2011.