



II WORKSHOP DE
ENERGIAS
OCEÂNICAS E FLUVIAIS

**Análise de Cenários para
Dimensionamento de Micro-Usina de
Correntes de Maré para Sistema Isolado**

ROTEIRO DA APRESENTAÇÃO

1 Introdução

2 Correntes de Maré

3 Formulação do Problema

4 Estudo de Caso no Canal do Boqueirão

5 Simulações e Resultados

INTRODUÇÃO

- Os sistemas isolados - geradores à Diesel.
- Diante do interesse em reduzir o impacto ambiental, a atenção para fontes não poluentes, como as renováveis não convencionais tem se intensificado.
- O aproveitamento das correntes de maré – pouca intervenção em áreas costeiras – redução dos impactos ambientais – turbinas mais eficientes.

INTRODUÇÃO

- Microrredes isoladas – Necessidade de armazenamento – confiabilidade e controle da intermitência.
- Este estudo está situado no escopo de micro geração de energia oceânicas, com foco específico nas correntes de marés e em sistemas isolados.

PROBLEMÁTICA

- O desafio é definir critérios para o dimensionamento eficiente de plantas deste tipo. A fonte de energia varia durante o ciclo lunar e além disso, a carga também varia, porém em um ciclo diário.
- **Dimensionamento na Sizígia:** Se o dimensionamento da micro-usina de correntes de maré for realizado apenas no período de sizígia, então nos períodos de quadratura o gerador à diesel será mais solicitado, emitindo mais CO₂.
- **Dimensionamento na Quadratura:** Se o dimensionamento for no período de quadratura, então na sizígia o sistema estaria sobredimensionado, resultando em grande quantidade de energia vertida.

PROBLEMÁTICA

- Com isso, surge a seguinte problemática, qual o melhor período da maré para dimensionar a micro-usina de correntes de maré?
- O problema não é simples, por um lado, interessa otimizar o investimento global. Por outro lado, é relevante reduzir a emissão de CO₂.

ENERGIA DE CORRENTES DE MARÉ



Fig. 1. Principais locais no mundo onde as marés são mais adequadas para exploração.

No Brasil, a região Norte e Nordeste possui potencial significativo para a exploração de energia maremotriz, como por exemplo os Estados do Maranhão e Amapá.

MODELAGEM DA POTÊNCIA HÍDRICA E MECÂNICA

$$E = \frac{m.V_0^2}{2}$$

$$m = \rho.Q$$

$$P = \frac{\rho.Q.V_0^2}{2}$$

$$Q = A.v$$

$$A = \pi R^2$$

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot V_0^3$$

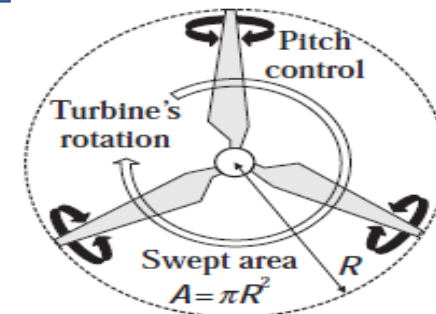
Potencial Hídrica

$$P = \frac{1}{2} \cdot C_p \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot V_0^3$$

Potencial Mecânica

ρ → densidade da água (kg/m³);
 A → Área varrida pelas pás;
 V_0 → Velocidade das correntes de maré;

C_p → Coeficiente de Desempenho;
 Q → Vazão em m³/s;
 m → massa de água que incide na turbina;



FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

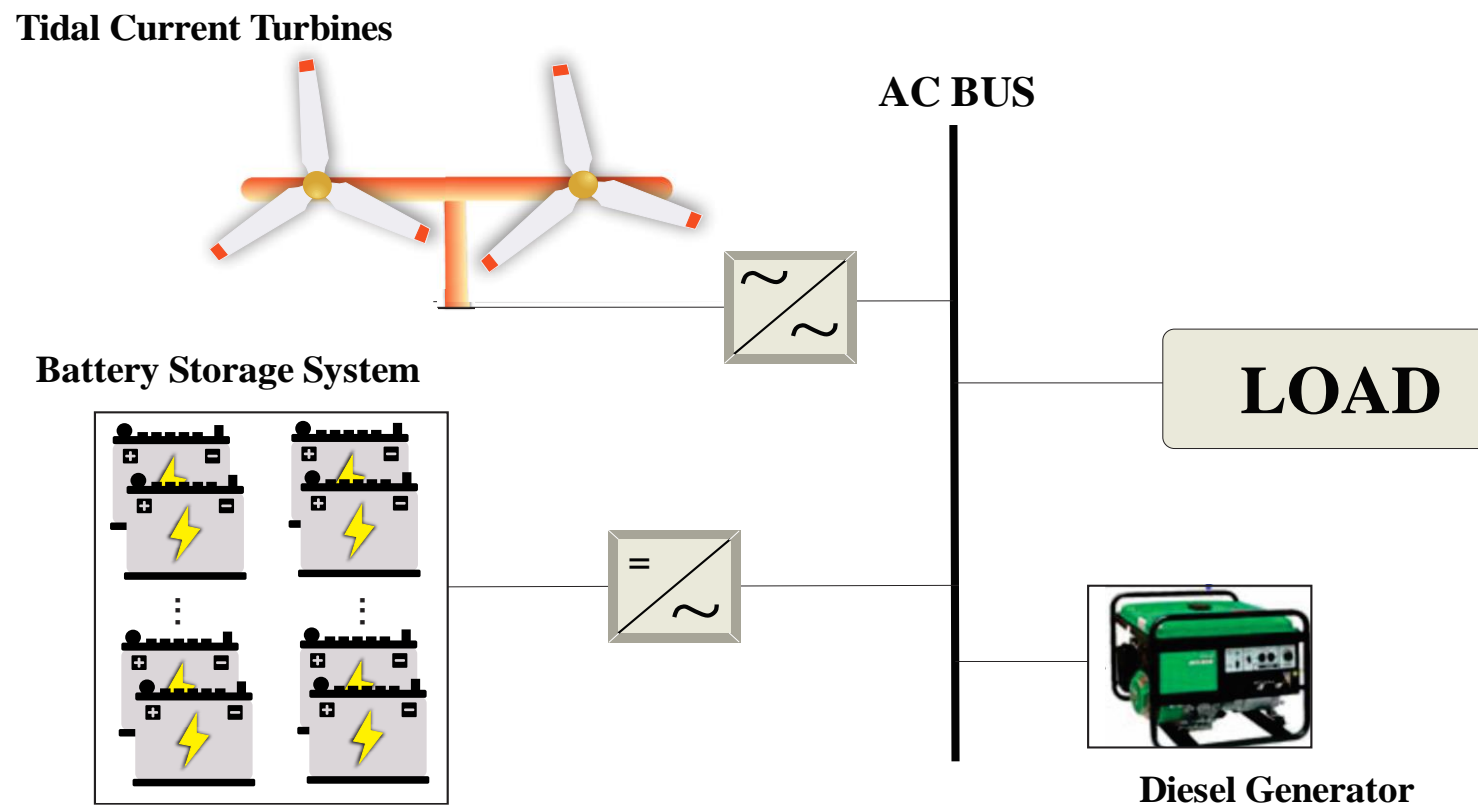


Fig. 2. Esquema Geral do Problema

DISPOSITIVOS

- **Turbinas de Correntes de Maré:** O dimensionamento considera turbinas com potência nominal de 5 kW, 10 kW, 25 kW, 42 kW e 55 kW;
- **Sistema de Armazenamento:** é indispensável para garantir a continuidade no atendimento à carga. A função das baterias é armazenar energia quando há excesso de geração e fornecer energia para carga quando houver déficit;
- **Gerador à Diesel:** é utilizado como fonte reserva, que deve ser acionado em situações de insuficiência das baterias em momentos de pouca ou nenhuma geração.

FUNÇÃO OBJETIVO

O problema tem como objetivo minimizar o custo total do sistema

$$\textit{Min} (C_T)$$

Onde custo total é expressado como segue

$$C_T = C_{In} + C_{OM} + C_s$$

(C_{In}) Investimento inicial

(C_{OM}) Custo de operação e manutenção

(C_s) Custo de substituição

DESCRIÇÃO DOS CUSTOS

→ Custo Inicial:

$$C_{In} = (N_{TCM} C_{TCM})(1 + k_{TCM}) + 2(N_{SAB} C_{SAB})(1 + k_{SAB}) + (N_{GD} C_{GD})(1 + k_{GD})$$

$$0 \leq k_{TCM} \leq 1$$

$$0 \leq k_{GD} \leq 1$$

$$0 \leq k_{SAB} \leq 1$$

→ Custo de Operação e Manutenção:

$$C_{OM} = \sum_{t=1}^{t_{\max}} \frac{C_{TCM_{OM}} + C_{SAB_{OM}} + C_{GD_{OM}}}{(1 + j)^t}$$

→ Custo de Substituição:

$$C_S = \sum_{t=1}^{t_{\max}} \frac{(N_{TCM} C_{TCM_s})(1 + k_{TCM_s})}{(1 + j)^t} +$$

$$\frac{2(N_{SAB} C_{SAB_s})(1 + k_{SAB_s})}{(1 + j)^t} + \frac{(N_{GD} C_{GD_s})(1 + k_{GD_s})}{(1 + j)^t}$$

ESTUDO DE CASO: CANAL DO BOQUEIRÃO

Como estudo de caso foi considerado um perfil tipo de consumo de ilhas da região.

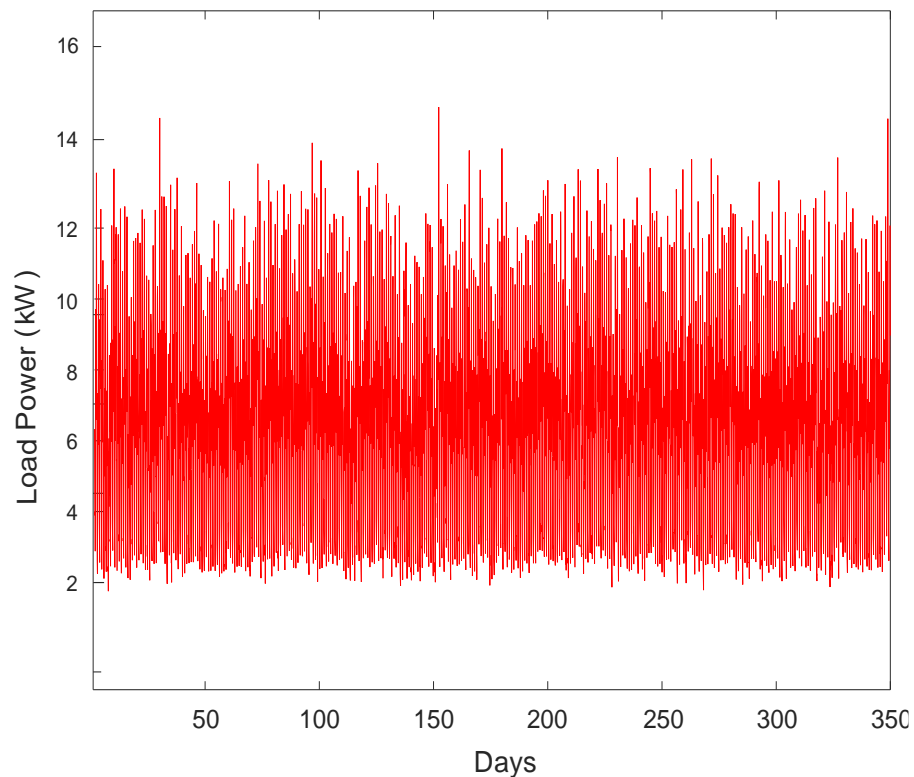


Fig. 3 – Demanda de uma Ilha típica da região.

Localização onde foram realizadas as medições de velocidade das correntes de marés.

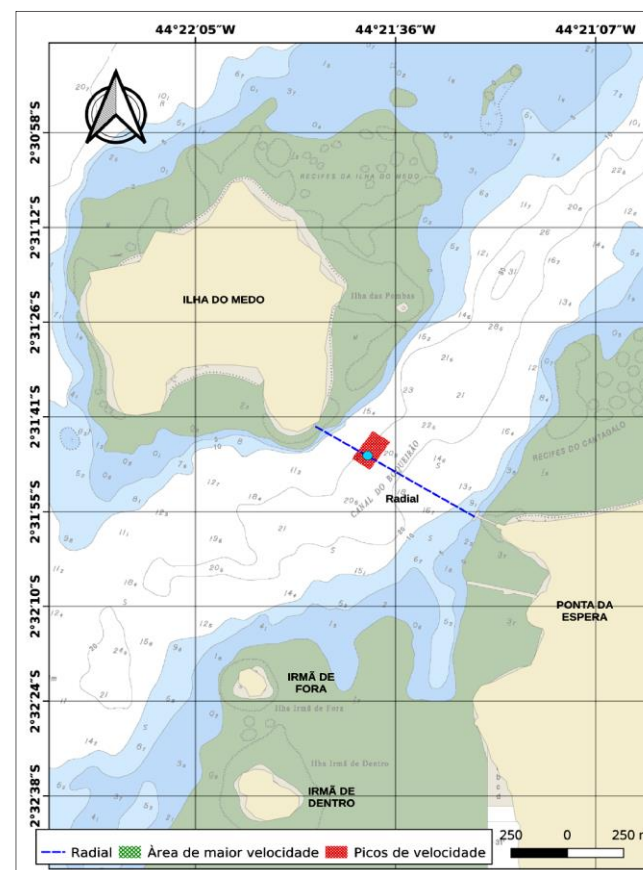


Fig. 4. Canal do Boqueirão (Baía de São Marcos)

DADOS UTILIZADOS

→ Os custos das turbinas e baterias foram estimados a partir do preço comercial de uma turbina de 5 kW e uma bateria de 100 Ah. Para estimar custo para outras dimensões aplicou-se a regra do 0,6, por meio da Equação a seguir.

$$C_{TCM}(t) = C_{ref_{TCM}} \left(\frac{t}{t_{ref}} \right)^{0,6}, \quad C_{SAB}(b) = C_{ref_{SAB}} \left(\frac{b}{b_{ref}} \right)^{0,6}$$

→ Como uma porcentagem do investimento inicial de cada dispositivo, no caso das baterias e turbinas de correntes de maré 3% e para o gerador à diesel 2%. A taxa de juros (j) utilizada no cálculo do valor presente líquido foi 10%.

SIMULAÇÕES E RESULTADOS

→ Para a análise de sensibilidade do dimensionamento de uma micro usina de correntes de maré foram consideradas as configurações que estão expostas na Tabela 1.

Number of Turbines	Battery Capacity (Ah)	Power Generator to Diesel (kW)
1 a 21	100, 300, 500, 1000, 1200 e 1500	24, 28, 32,40, 44 e 50

Tabela 1. Configuração dos dispositivos utilizados no Sistema

SIMULAÇÕES E RESULTADOS

A. Dimensionamento

Os resultados do dimensionamento para diferentes configurações podem ser vistos na Tabela 2. Através da análise de sensibilidade, o dimensionamento de menor custo foi obtido para uma turbina de 42 kW, baterias de 1200 Ah e um gerador à diesel de 44 kW. A turbina de 5 kW é a menos viável economicamente, em razão de ser necessária uma grande quantidade de turbinas para este caso.

Nº Turbinas	Turbine Power (kW)	Power Generator Diesel (kW)	Battery Capacity (Ah)	Total System Cost (R\$)
11	5	50	1500 Ah	R\$2.811.815,06
6	10	44	1200 Ah	R\$2.446.006,58
2	25	44	1200 Ah	R\$ 1.842.299,11
1	42	44	1200 Ah	R\$ 1.580.241,58
1	55	44	1200 Ah	R\$ 1.679.211,55

Tabela 2. Resultados do Dimensionamento de Menor Custo.

SIMULAÇÕES E RESULTADOS

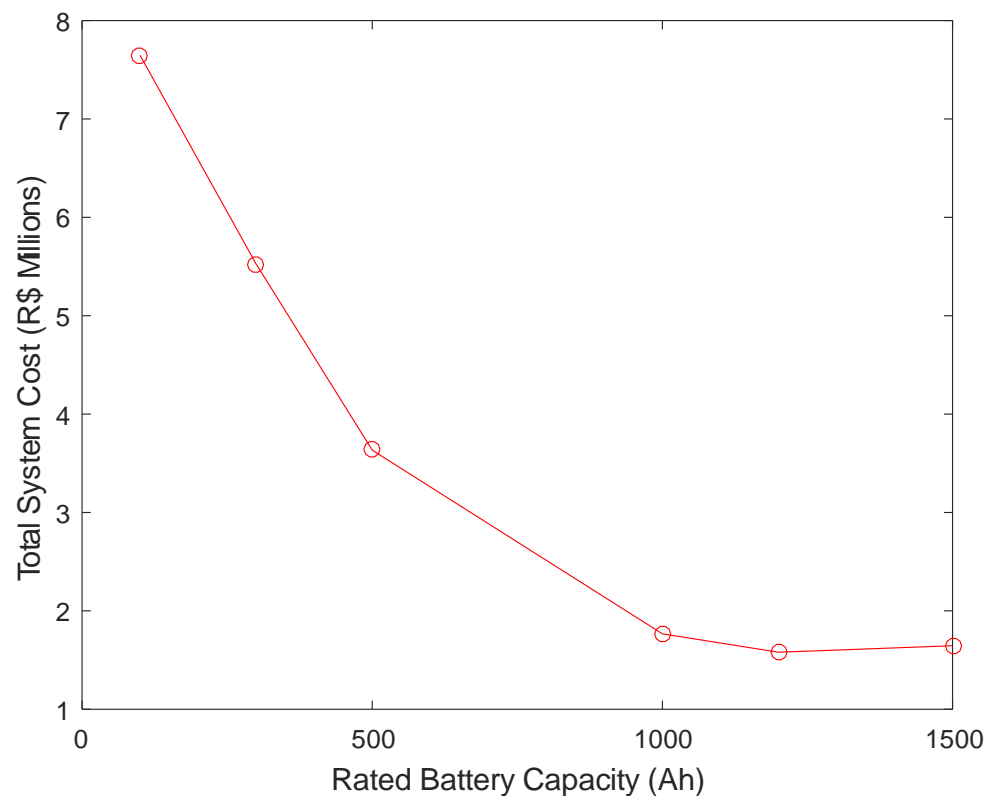


Fig. 5 – Custo do sistema em relação a capacidade das.

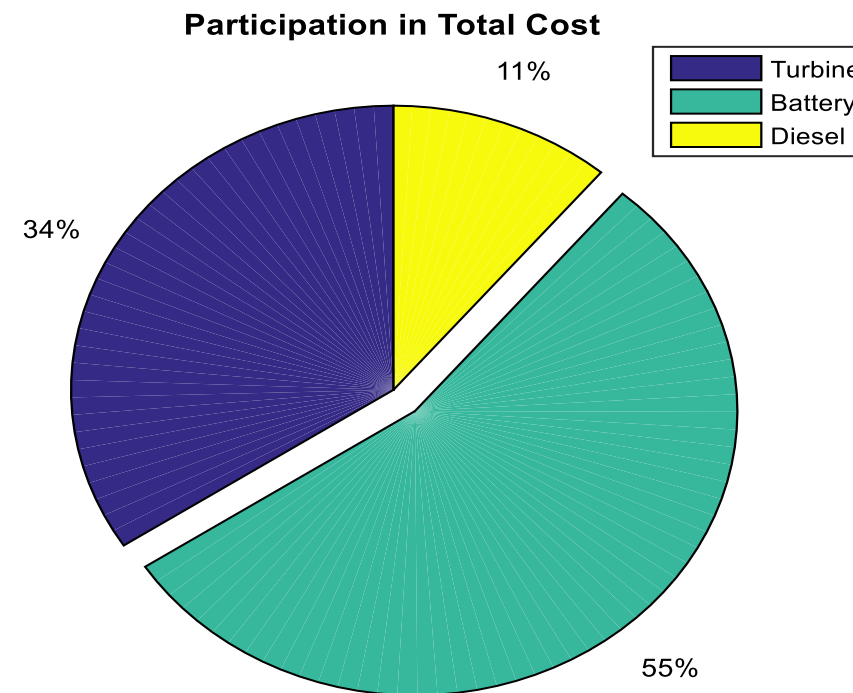


Fig. 6 – Participação dos dispositivos no custo total.

SIMULAÇÕES E RESULTADOS

B. Fator de Capacidade

Para verificar a turbina mais eficiente para ser utilizada no canal do Boqueirão foi avaliado o fator de capacidade para cada tipo de turbina, conforme a Tabela 3.

Nº Turbine	Turbine Power (kW)	Useful Energy (kWh)	Capacity Factor (%)
11	5	78.897,70	16,00
6	10	80.567,00	15,00
2	25	75.783,00	17,50
1	42	75.209,00	21,00
1	55	86.558,00	18,00

Tabela 3. Fator de Capacidade para cada Turbina

SIMULAÇÕES E RESULTADOS

C. Análise dos Períodos Lunares

É realizada uma análise avaliando o melhor período para o dimensionamento desta fonte.

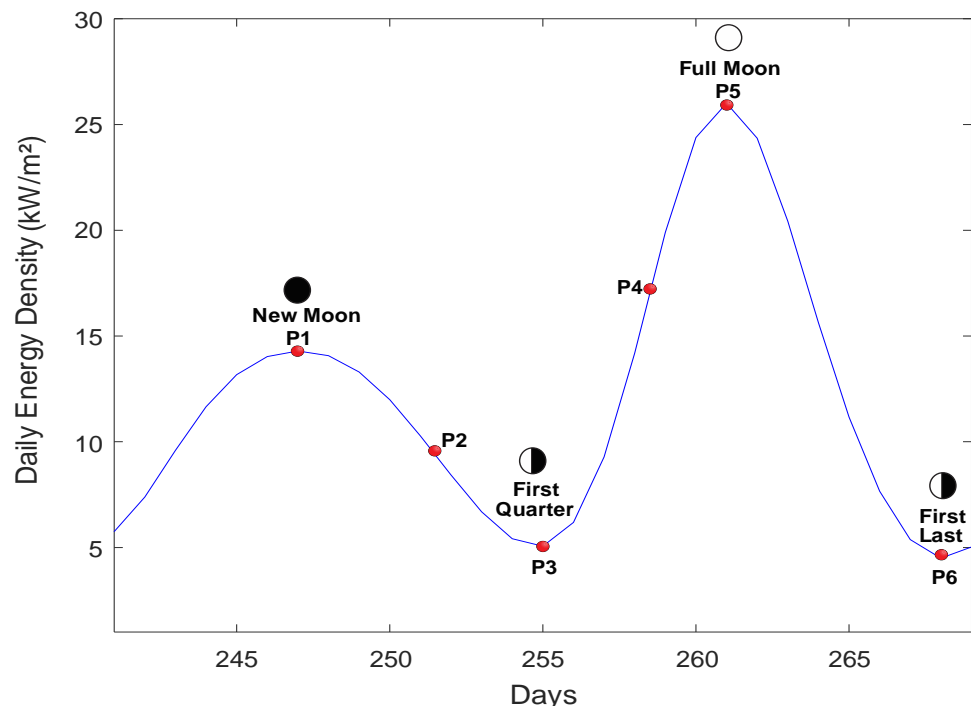


Fig. 7 – Densidade Energética diária durante um ciclo lunar.

SIMULAÇÕES E RESULTADOS

Observa-se que os períodos de sizígia (Lua cheia e nova) requerem um número menor de turbinas e enquanto que períodos de quadratura (Lua crescente e minguante) um número muito maior de turbinas é necessário para garantir a operação do sistema.

$$N_{Turbine} = \frac{E_{Tidal_{day}}}{\left(P_{average_{Load}}\right) \cdot 24}$$

$E_{Tidal_{day}}$ é a energia diária gerada por uma turbina de corrente de maré,

$P_{mean_{Load}}$ é a potência média da carga.

SIMULAÇÕES E RESULTADOS

→ A Tabela 4 apresenta a quantidade de turbinas dimensionada para cada ponto escolhido baseada na Equação abaixo.

Ponto de Análise		Número de Turbinas		
		5 kW	10 kW	25 kW
P1	Lua Nova	7	4	1
P2	Intermediário 1	12	6	2
P3	Minguante	20	10	3
P4	Intermediário 2	5	3	1
P5	Lua Cheia	4	2	1
P6	Crescente	22	11	3

$$N_{Turbine} = \frac{E_{Tidal_{day}}}{\left(P_{average_{Load}}\right) \cdot 24}$$

$E_{Tidal_{day}}$ é a energia diária gerada por uma turbine de corrente de maré,

$P_{mean_{Load}}$ é a potência media da carga.

Tabela 4. Dimensionamento para cada ponto durante o ciclo lunar.

SIMULAÇÕES E RESULTADOS

Analysis Point	Total System Cost		
	5 kW	10 kW	25 kW
Lua Nova	R\$6.185.720,32	R\$5.223.843,61	R\$ 3.902.173,76
Intermediário 1	R\$2.902.679,80	R\$2.446.006,58	R\$ 1.842.299,11
Minguante	R\$4.159.996,45	R\$3.398.874,42	R\$ 2.255.096,25
Intermediário 2	R\$7.621.965,98	R\$7.104.060,78	R\$ 3.902.173,76
Lua Cheia	R\$8.359.819,76	R\$8.194.672,78	R\$ 3.902.173,76
Crescente	R\$4.474.325,61	R\$ 3.637.091,37	R\$ 2.255.096,25

Tabela 5. Resultados do custo para cada ponto durante o ciclo lunar.

CONCLUSÃO

- É demonstrado que o problema da alta variabilidade da fonte induz ao problema do dimensionamento, que pode mudar bastante, dependendo do critério utilizado.
- Carga máxima de 15,41 kW – Turbina dimensionada (42 kW).
- Para turbinas pequenas são necessárias uma grande quantidade (11 turbinas de 5 kW) e baixo fator de capacidade.

CONCLUSÃO

- Uso do Diesel x Dimensionamento do sistema de armazenamento.
- O gerador à diesel é fundamental nesse sistema tanto para confiabilidade, como também para fazer a equalização do sistema de armazenamento e aumentar a vida útil da bateria.
- O período intermediário P2 é o mais adequado para estimar a quantidade necessária de turbinas, garantindo melhor participação das fontes renováveis e menor custo do sistema.

REFERÊNCIA

1. Bagen; Billinton, R. Evaluation of Different Operating Strategies in Small Stand-Alone Power Systems. IEEE Transactions on Energy Conversion, v. 20, n. 3, p. 654–660, set. 2005.
2. Ben Elghali, S. E.; Benbouzid, M. E. H.; CHARPENTIER, J. F. Marine tidal current electric power generation technology: State of the art and current status. Proceedings of IEEE International Electric Machines and Drives Conference, IEMDC 2007, v. 2, p. 1407–1412, 2007.
3. S. Estefen and A. Lewis, “Ocean Energy in: IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation.”, New York, 2012.
4. P. Bezerra, L. Neto, O. R. Saavedra, N. J. Camelo, L. A. De Souza Ribeiro, and R. M. Ferreira, “Exploração de energia maremotriz para geração de eletricidade: aspectos básicos e principais tendências,” Revista Chilena Ingeniería., vol. 19, no. 2, pp. 219–232, 2011.
5. Empresa de Pesquisa Energética. Plano Nacional de Energia – PNE 2030.
6. P.N. Bezerra, O. R. Saavedra, et al, “Avaliação Revisitada do Potencial Maremotriz do Estuário do Bacanga”, Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos, SBSE 2014.
7. P. B. L. Neto, “Contribuições Para A Operação Energética E Econômica De Microrredes Isoladas Com Fontes Renováveis Diversificadas”, Dissertação de Doutorado, PPGEE, UFMA, São Luís, BR, 2017.
8. [B. G. de Sá](#), O. R. Saavedra, D. Q. Oliveira, P. B. L. Neto. Dimensionamento de uma Usina Maremotriz para Sistemas Isolados. In: CBA, Congresso Brasileiro de Automática, João Pessoa, Brasil, 2018.
9. Diouf, B.; Pode, R. Potential of lithium-ion batteries in renewable energy. Renewable Energy, v. 76, p. 375–380, 2015. ISSN09601481.
10. Tribe, M. A.; Alpine, R. L. W. Scale economies and the “0.6 rule”. Engineering Costs and Production Economics, v. 10, n. 1, p. 271–278, 1 mar. 1986.