

**ADRIEN NARDIN
LUIZ ALMEIDA
RAQUEL NASCIMENTO
TIAGO VIEIRA**

**A GERAÇÃO DE ENERGIA ATRAVÉS DA OSCILAÇÃO DAS
MARÉS – ANÁLISE DE VIABILIDADE DA INSTALAÇÃO DE
UMA USINA MARÉMOTRIZ NO BRASIL**

Projeto de Formatura apresentado à
Escola Politécnica da Universidade de
São Paulo, no âmbito do Curso de
Engenharia Civil

São Paulo
2010

**ADRIEN NARDIN
LUIZ ALMEIDA
RAQUEL NASCIMENTO
TIAGO VIEIRA**

**A GERAÇÃO DE ENERGIA ATRAVÉS DA OSCILAÇÃO DAS
MARÉS – ANÁLISE DE VIABILIDADE DA INSTALAÇÃO DE
UMA USINA MARÉMOTRIZ NO BRASIL**

Projeto de Formatura apresentado à
Escola Politécnica da Universidade de
São Paulo, no âmbito do Curso de
Engenharia Civil

Orientador: Prof. Dr. Paolo Alfredini

São Paulo
2010

FICHA CATALOGRÁFICA

Nardin, Adrien

A geração de energia através da oscilação das marés: análise de viabilidade da instalação de uma usina marémotriz no Brasil / A. Nardin, L. Almeida, R.A. do Nascimento, T. Vieira. -- São Paulo, 2010. 82 p.

Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária.

1. Energia elétrica 2. Fontes alternativas de energia 3. Maré 4. Energia marémotriz I. Almeida, Luiz II. Nascimento, Raquel Almeida do III. Vieira, Tiago IV. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária V. t.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos a todos os profissionais e amigos que tornaram possível a conclusão deste trabalho e que tanto nos ajudaram em seu andamento.

Às nossas famílias, especialmente aos nossos pais por formarem nosso caráter e nos ensinar a buscar o sucesso pelos estudos e pelo trabalho.

Aos membros da banca, Professora Yvone Faria Lemos e Professor Ricardo de Camargo, que ao longo de todo ano se colocaram sempre à disposição para nos ajudar em tudo que fosse possível, dividindo conosco sua sabedoria e experiência profissional, que tanto ajudaram a enriquecer este trabalho.

Aos professores e colegas consultados ao longo do ano: Professor Fagá, professor Márcio Vaz, Professor Segen Estefen, Professor Harari, Professor Antonio Carlos, Rafael Malheiro Ferreira, Professor Cordeiro e professor Rodolfo Scarati.

Ao nosso orientador Professor Doutor Paolo Alfredini, pela sua dedicação e por dividir conosco todo seu conhecimento e experiência na área nos incentivando.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
2	Objetivos.....	3
2.1	Objetivos Gerais.....	3
2.2	Objetivos Específicos	3
3	Justificativa e Metodologia	4
3.1	Justificativa	4
3.2	Metodologia	6
3.2.1	Escolha do local adequado.....	6
3.2.2	Levantamentos batimétricos	7
3.2.3	Previsão das marés	8
3.2.4	Modelo de geração	8
3.2.5	Teoria de cálculo: desnível; vazão; volume; potência	14
3.2.6	Análise de Impactos Ambientais	17
4	Revisão Bibliográfica.....	20
4.1	Estudos já realizados na área	20
4.1.1	Usinas marémotrizas no mundo.	23
4.1.2	A tentativa de instalação de uma usina marémotriz no Brasil	24
4.2	Estudo de caso – A instalação de uma usina marémotriz no Brasil.....	25
4.2.1	A escolha do local adequado – Um breve estudo de viabilidade de quatro locais diferentes.	25
4.2.2	Batimetria	32
4.2.3	Dados de maré	33
4.2.4	Proposta de geração	34
4.2.5	Arranjo construtivo.....	45
4.2.6	Análise de impactos ambientais	53
5	Conclusões e Recomendações.....	75
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	77

RESUMO

A busca mundial por fontes de energia renovável se torna cada vez mais evidente considerando os constantes desastres ambientais e consciência global da escassez de recursos não renováveis.

A matriz energética brasileira, composta predominantemente pela geração por meio de hidrelétricas, assim como a popularização da construção de pequenas centrais hidrelétricas (PCHs), tornou possível o domínio, por parte dos técnicos nacionais do uso de turbinas de baixa queda, que hoje já são inclusive desenvolvidas no Brasil.

Um dos principais atributos brasileiros, que atrai milhões de turistas anualmente, é sua vasta linha costeira com mais de 8.000 quilômetros de extensão. As grandes amplitudes de maré presentes principalmente nas regiões Norte-Nordeste do Brasil credenciam-nas ao aproveitamento da oscilação da maré para geração de energia.

Tal conceito não é novo e já era usado pelos romanos na Antiguidade para mover seus moinhos de milho, mas foi realmente incorporado à tecnologia contemporânea com o advento da construção de La Rance, maior usina marémotriz em operação, em 1968.

A idéia de implantar uma usina marémotriz no Brasil também não é nova: houve uma tentativa de aproveitamento da energia das marés com a Barragem do Bacanga, em São Luís (MA), mas problemas de compatibilidade e coordenação entre projetos levaram à não implantação da usina, inviabilizando sua utilização comercial hoje.

Este estudo desenvolve uma metodologia que engloba desde a busca de um local adequado no Brasil, até o desenvolvimento da concepção construtiva da usina com especificação de conjunto hidromecânico, o cálculo da potência gerada, análise de impactos ambientais e concepção geral de uma pequena central hidrelétrica (PCH) marémotriz. Os estudos apresentados, assim como os dados de entrada dos modelos estão no âmbito de um estudo de viabilidade.

ABSTRACT

The world's constant seek for renewable energy sources become increasingly evident in light of numerous environmental disasters and the scarceness of fossil fuels.

Brazil's energy is based on the use of hydroelectric power combined with the popularization of the small hydroelectric power stations (SHPs), which made the use of low head turbines known by the national technicians, currently also developed in Brazil.

One of Brazil's most famous features, that attract millions of tourists every year, is its vast coast line, which is more than 8,000 kilometers long. The great tidal ranges in the sea, found especially in the northeast region of Brazil lead us to think about the exploitation of the oscillations of the sea to generate energy.

Such concept is not a new one and it has been used since the ancient Roman Empire time to move their corn mills. However it was really incorporated into modern technology in 1968, with the opening of La Rance, the largest tidal power station.

The idea of installing a tidal power station in Brazil was first applied in the Bacanga Dam (MA). However, since the project was not fully installed it is currently unavailable for commercial use.

This study developed a methodology that goes from finding a suitable place in Brazil, the development of the constructive concept of the power station as well as its turbine, calculation of power generated, analysis of environmental impact, to general concepts of a small hydroelectric power station as a tidal power station. This study is presented as a feasibility study, as well as the input (data) for the models that were used.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Moinho de maré de Olhão - Algarve, Portugal (WIKIPÉDIA, 2007)	1
Figura 2. Vista noturna do Brasil revelando extensas áreas escuras na Região Norte do Brasil (fonte: geology.com).....	5
Figura 3. Proporção de domicílios com energia elétrica (Fonte: Atlas de energia elétrica)	6
Figura 4. Instalação das turbinas de eixo vertical (fonte: Wikipédia)	9
Figura 5. Turbinas Kaplan (Fonte: IMPSA).....	10
Figura 6. Turbina Bulbo (Fonte: Santo Antonio Energia)	11
Figura 7. Perspectiva do funcionamento das turbinas de corrente (Fonte: Marine Current Turbines)	12
Figura 8. Rotores das turbinas MCT (Fonte: Marine Current Turbines)	12
Figura 9. O sistema multirrotor patenteado pela MCT (Fonte: Marine Current Turbines).....	12
Figura 10. Formação de um único reservatório no rio Turiaçu	13
Figura 11. Geração em simples efeito (Fonte: Diez, 2002; Ferreira, 2007)	14
Figura 12. Funcionamento da usina marémotriz – fonte www.portalsaofrancisco.com.br	20
Figura 13. Via terrestre sobre a barragem de La Rance.....	23
Figura 14. Locais com elevadas amplitudes de marés (Tidal Power, 2001)	24
Figura 15. Locais com maré potencial para instalação de uma usina.....	26
Figura 16. Imagem fornecida pelo Professor Marcio Vaz referente à área de estudo do NEA	29
Figura 17. Efeitos da ressonância variando com o comprimento e vazão dos estuários	34
Figura 18. Identificação da área provável de implantação da barragem.....	35
Figura 19. Delimitação do reservatório.....	37
Figura 20. Interface do GE Path.....	38
Figura 21. Curvas de nível geradas cada 2 metros, região do rio Turiaçu (AUTOCAD)	40
Figura 22: Arranjo construtivo da barragem proposta.....	46
Figura 23: Detalhe das edificações da barragem.	47
Figura 24: cotas relevantes da barragem	48
Figura 25: Esquema do vertedor	50
Figura 26: Esquema do corte transversal da casa de força.....	51
Figura 27: Construção da usina de La Rance com utilização de ensecadeiras (Electricité de France).....	52
Figura 28: Gráfico com vazões mensais para o ano de 2009 no rio Turiaçu	53
Figura 29. Mapa das bacias do Maranhão. – Fonte: PPGT (programa de planejamento e gestão territorial- www.ppgt.ma.gov.br).....	55
Figura 30. Unidades de conservação e proteção ambiental – Fonte: PPGT (programa de planejamento e gestão territorial- www.ppgt.ma.gov.br).....	56
Figura 31. Precipitação média anual da zona costeira do Maranhão – Fonte: PPGT (programa de planejamento e gestão territorial- www.ppgt.ma.gov.br)	57
Figura 32. Umidade relativa do ar no Maranhão. – Fonte: PPGT (programa de planejamento e gestão territorial- www.ppgt.ma.gov.br).....	57

Figura 33. Uso e cobertura vegetal demonstrando a presença de áreas inundáveis no entorno da bacia do Turiaçu – Fonte: PPGT (programa de planejamento e gestão territorial- www.ppgt.ma.gov.br)	58
Figura 34. Mapa de solos acusando a presença de manguezais na área da bacia do Turiaçu. – Fonte: PPGT (programa de planejamento e gestão territorial- www.ppgt.ma.gov.br)	59
Figura 35. Localização de Turiaçu no estado do Maranhão – fonte Google maps. ..	60
Figura 36. Eixo de implantação da barragem (alternativa 1) – Fonte: Google Earth.	60
Figura 37. A bacia do Turiaçu determinada pelo IBGE e definida por nós como área de estudo - Fonte: Atlas de saneamento IBGE	61
Figura 38. Visão ampliada dos limites da bacia do Turiaçu - Fonte: Atlas de saneamento IBGE.....	61

LISTA DE TABELAS

Exemplos de usina maremotrizes operantes.....	24
Matriz de avaliação do Rio Mearim	28
Matriz de avaliação da Costa Ocidental do Maranhão	30
Matriz de avaliação da foz da margem esquerda do Amazonas	31
Matriz de avaliação da Foz do rio Tocantins	31
Matriz final: comparação da pontuação obtida por cada uma das locações	32
Estação Turiaçu II - Cataloga de estações maregráficas brasileiras (Femar)	38
Comparação dos reservatórios de Turiaçu com La Rance	41
Quadro resumo dos resultados	43
Tabela de rendimento de acordo com a potência (Fonte: Macintyre)	44
Quadro resumo do dimensionamento do rotor	45
Atividades e ações que ocorrem ao longo de cada uma das fases da obra da usina (Fonte: Sanchéz 2006).....	62
Impactos relacionados ao meio e a fase em que ocorrem.	64
Cada um dos impactos relacionados a cada um dos aspectos levados em conta....	66
Severidade dos impactos e ordem de importância e cada uma das alternativas propostas	69
Impactos mais relevantes respectivamente ligados as suas medidas mitigadoras...	72
Amplitude das marés - Fonte DHN - Marinha do Brasil em www.mar.mil.br	79

LISTA DE SÍMBOLOS

a	altura do vertedor
A	área total do rotor
A_m	amplitude média da maré
A_{ms}	semi amplitude máxima de maré
A_{res}	área do reservatório
B	largura da embocadura
C	celeridade efetiva de propagação
Ca	coeficiente de portança
Ca'	coeficiente de portança corrigido
$D1$	diâmetro externo mínimo do rotor
$D1'$	diâmetro externo máximo do rotor
E	energia potencial disponível
E_{pot}	energia potencial anual produzida pela usina
E_{potap}	energia potencial anual aproveitável da maré
$E_{potusina}$	energia aproveitável pela usina
g	aceleração da gravidade
h	profundidade média do mar
H	amplitude de maré
H_f	horas de funcionamento da usina em um ano
H_m	carga média a montante do vertedor
K	fator de correção para descarga submersa
l	comprimento das pás
L	largura do vertedor
n_s	velocidade específica
P	potência gerada pelas turbinas
P_{disp}	potência fornecida pela usina
P_{ins}	potência instalada
$P_{min.inic.}$	potência mínima correspondente à queda inicial
Q	vazão
Sp	seção livre de passagem de água
t	passo entre as pás
u	velocidade específica média
$u1$	velocidade periférica para queda de 1 metro
V	velocidade da corrente
V_m	velocidade meridiana
$Vu1$	componente periférico da velocidade absoluta
$V_{util_{médio}}$	volume útil médio do reservatório
$V_{util_{quadratura}}$	volume útil do reservatório na quadratura
$V_{util_{sizígia}}$	volume útil do reservatório na sizígia
W	velocidade relativa
$W1$	velocidade relativa para queda de 1 metro
Z	número de pás
α_1	ângulo de ataque
β_p	ângulo do perfil
γ	peso específico da água
ΔH	amplitude de maré
ε	rendimento hidráulico
η	rendimento da turbina

θ	ângulo de atrito
μ	coeficiente de contração
ρ	densidade da água do mar
φ	fator de potência
ϕ	fator de utilização da capacidade instalada
τ	período da maré

1 INTRODUÇÃO

A descoberta e exploração em larga escala dos combustíveis fósseis permitiram um acelerado desenvolvimento industrial. Sua abundância e baixo custo limitaram o desenvolvimento de outras fontes de energia. Até a segunda metade do século XX o uso de fontes renováveis se concentrou na construção de usinas hidrelétricas.

Esse cenário mudou no pós-guerra, quando fatores geopolíticos levaram a bruscas elevações nos preços do petróleo. Nesse período também se intensificaram os estudos sobre os efeitos das emissões geradas pela queima de combustíveis fósseis. A sociedade civil, sobretudo nos países desenvolvidos, passou a exigir maior comprometimento com as questões ambientais.

Hoje, a problemática da emissão de gases estufa e suas conseqüências sobre o clima terrestre têm papel de destaque na mídia e política global. A maioria dos países já se comprometeu, seja por legislação própria ou tratados internacionais (como o Protocolo de Kyoto), com metas de redução da emissão desses gases. É também consenso que a realização desses objetivos envolve necessariamente a substituição de petróleo e carvão por fontes de energia mais limpas e, preferencialmente, renováveis.

Uma das possibilidades para a geração sustentável de energia é o aproveitamento das marés. Essa idéia não é nova, remontando à Antiguidade. Os romanos já utilizavam o desnível criado pelas marés para movimentar moinhos de milho. Esse mesmo tipo de aproveitamento se estendeu pela Idade Média em algumas regiões da Europa e só foi interrompido pelo surgimento dos moinhos movidos a vapor no século XIX, alimentados com carvão e muito mais eficientes.



Figura 1. Moinho de maré de Olhão - Algarve, Portugal (WIKIPÉDIA, 2007)

Estima-se o potencial mundial de geração de energia através das marés em 60 GW (Ferreira, 2003) e sua utilização apresenta diversos atrativos. Depois de construída, embora tenha um substancial custo de manutenção de equipamentos o custo operacional é baixo. As oscilações de maré são parcialmente previsíveis, garantindo maior confiabilidade ao sistema. Também se deve destacar que a operação não produz gases estufa ou outros poluentes.

As dificuldades para a adoção da alternativa marémotriz iniciam-se pela existência de poucos locais apropriados ao redor do globo para a construção das usinas. Se for construída uma barragem para aproveitar desnível os custos de implantação podem ser bastante elevados. Neste caso os impactos ambientais são relevantes, sobretudo pela retenção de sedimentos e interferência no ciclo de vida da fauna das regiões afetadas. Outra desvantagem é que a produção de energia é intermitente ao longo do dia, necessitando de fontes complementares para garantir o abastecimento continuado.

A retomada na utilização da energia marémotriz se deu com a construção da usina experimental de La Rance, na França, em 1966. Ainda hoje é o maior empreendimento do tipo, com potência instalada de 240 MW. Atualmente se discute no Reino Unido a construção de uma grande usina no estuário do Rio Severn. Sua potência instalada poderá chegar a 8.600 MW, fornecendo até 6% de toda a energia elétrica consumida pelos britânicos.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivos Gerais

O litoral da Região Norte do Brasil é freqüentemente citado em publicações técnicas como tendo potencial para a exploração da energia das marés. Nos anos setenta, pesquisadores e técnicos nacionais já haviam vislumbrado essa possibilidade quando da construção da Barragem do Bacanga, em São Luís (MA). Apesar disso, nas décadas que se passaram não houve investimento adequado para estudar e desenvolver a técnica e conhecimentos necessários para a implantação de uma usina marémotriz nacional.

Este trabalho visa reunir o conhecimento atual acerca do aproveitamento das marés para geração de energia elétrica, descrevendo as tecnologias utilizadas, critérios de projeto e impactos ambientais esperados. Pela aplicação deste conhecimento pretende-se desenvolver uma metodologia para a escolha do local e implantação de uma usina marémotriz na Região Norte do Brasil, considerando a previsão das marés e a batimetria da região, características que influem fortemente na viabilidade de uma usina marémotriz. Outras variáveis, como tipo de turbina e modo de operação também serão consideradas, bem como uma análise de impactos ambientais.

2.2 Objetivos Específicos

Após a escolha do local onde será locada a usina, serão avaliados conceitualmente o potencial de geração, impactos locais e viabilidade econômica e ambiental do projeto proposto.

3 JUSTIFICATIVA E METODOLOGIA

3.1 Justificativa

A busca por fontes de energia alternativa é uma realidade no Brasil e no mundo. Tendo em vista o crescente consumo das fontes não renováveis de energia e a constante busca do ser humano em aumentar sua qualidade de vida, as energias renováveis passam a figurar como um dos temas mais abordados em trabalhos, teses e novas propostas de crescimento sustentável.

Tendo em vista que no Brasil o potencial hidrelétrico das grandes quedas d'água já foi quase totalmente explorado, e que há ainda excessiva burocracia para a implantação de PCHs (Pequenas Centrais Hidrelétricas), propõe-se o desenvolvimento de uma nova tecnologia. Outra motivação é a de que a geração de energia através da oscilação das marés já vem sendo colocada em prática em países mais desenvolvidos, embora nunca tenha sido empregada de fato no Brasil, pois a implantação de uma usina para o aproveitamento das amplitudes das marés requer estudos detalhados sobre a região de implantação, desde levantamentos batimétricos e estudos sobre a maré na região de implantação até estudos sobre efeitos de ressonância, que podem afetar significativamente o desempenho da usina.

Outro fato relevante para tal pesquisa é de que os locais com maior potencial de geração de tal energia são também as regiões brasileiras com maior carência energética (Figuras 2 e 3). As regiões Norte e Nordeste têm sido os principais focos do programa "Luz para Todos", que visa levar energia elétrica a populações que ainda não foram integradas à rede de distribuição nacional. O enfoque social, portanto, não fica de fora desta pesquisa, como jamais poderia deixar de estar presente.



Figura 2. Vista noturna do Brasil revelando extensas áreas escuras na Região Norte do Brasil
(fonte: geology.com)

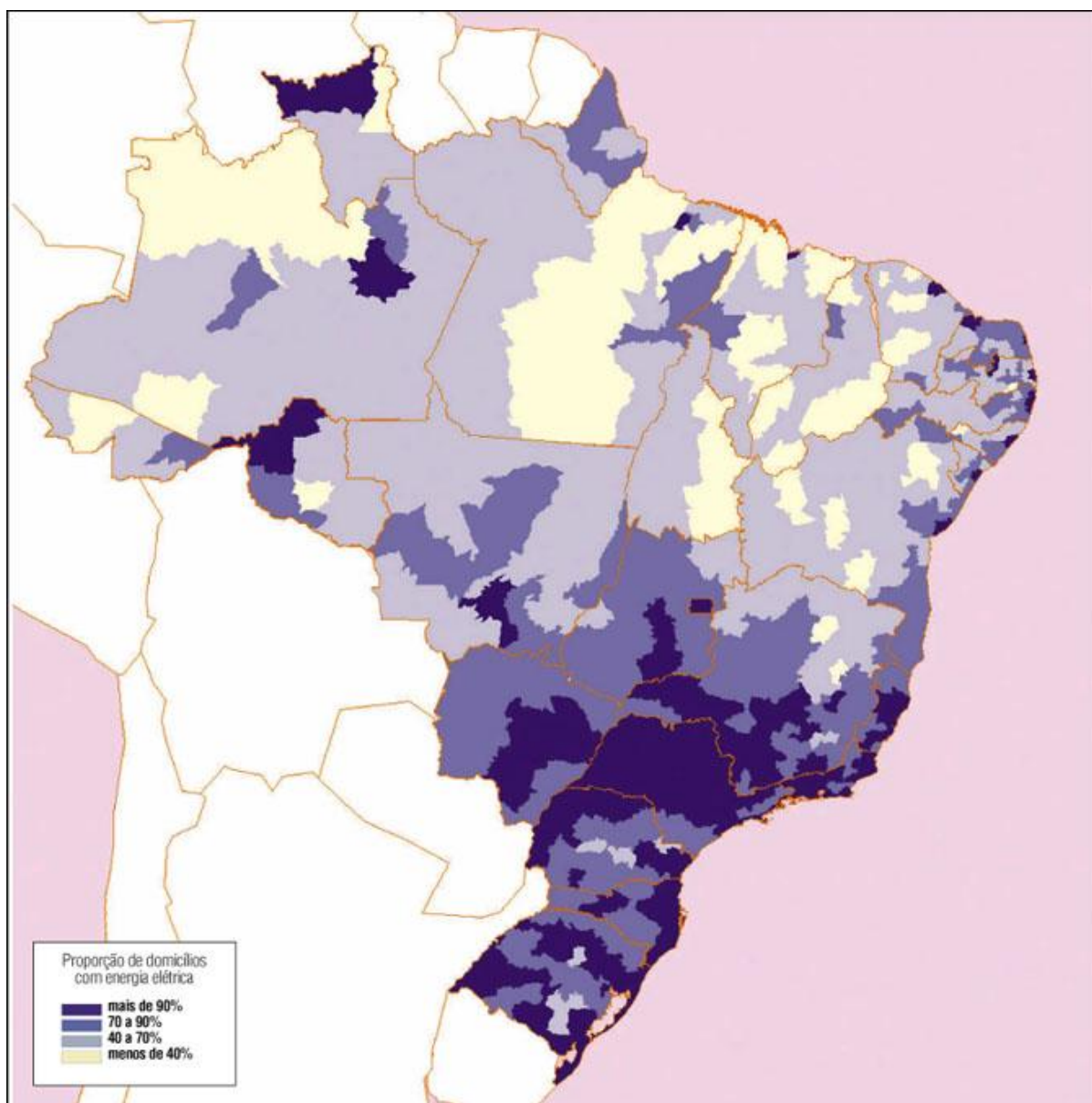


Figura 3. Proporção de domicílios com energia elétrica (Fonte: Atlas de energia elétrica)

3.2 Metodologia

3.2.1 Escolha do local adequado

Buscar no país locais com potencial para ser instalada uma usina marémotriz foi a primeira providência a ser tomada para realização da parte prática do trabalho. Para a escolha de locais adequados, o principal aspecto a ser levado em consideração é a amplitude de oscilação das marés. A análise desta questão deu-se através informações provenientes de tábuas de marés, cartas náuticas, levantamentos batimétricos e de contatos com professores e pesquisadores das faculdades locais, que nos ajudaram com estudos já realizados, ou em andamento, sobre o assunto.

As dimensões dos canais localizados nos pontos de interesse são também essenciais para determinar tal local. Esta análise foi feita com base em mapas, imagens de satélite e, mais uma vez, com o auxílio de pesquisadores da região. Atentou-se também para os possíveis impactos ambientais, verificando-se em cada localidade a existência de eventuais áreas de preservação que não poderiam ser inundadas ou comprometidas de alguma outra forma.

As usinas maremotrizes são comumente implantadas em áreas estuarinas na foz dos rios, com fechamento total ou parcial dos canais estuarinos. A alteração no nível das águas e no regime do transporte de sedimentos pode comprometer várias atividades, como a navegação. Assim, no estudo de uma região estuarina com rios navegáveis é necessário verificar se haverá interferência no transporte aquaviário e, em caso afirmativo, analisar as soluções possíveis (como a construção de eclusas).

Analizou-se de forma preliminar também a presença e características de populações que vivem as margens das áreas estudadas. Para esta análise utilizaram-se dados atuais de estudos referentes à ocupação da costa brasileira, como a densidade demográfica, atividades econômicas predominantes, integração à rede nacional de distribuição de energia elétrica, etc. Estes dados são de grande interesse quando analisamos a possibilidade de inundação de uma área habitada. A eventual necessidade de realocação dessas comunidades pode ser viável em casos particulares, como no Amapá, ou totalmente inviáveis, quando pensamos em locais como às margens do Rio Bacanga, que hoje conta com uma população superior a 20.000 habitantes.

3.2.2 Levantamentos batimétricos

Os estudos batimétricos de uma região permitem conhecer as profundidades de rios e oceanos. O conhecimento do relevo submerso é fundamental na navegação, para a implantação de portos e obras costeiras, bem como no estudo de usinas hidrelétricas e maremotrizes.

Tradicionalmente, os levantamentos batimétricos são executados com uma embarcação percorrendo trajetórias pré-definidas e uma sonda de ultrassom embarcada levantando o relevo submerso.

Para o estudo de uma usina geradora de energia elétrica com reservatório, a potência gerada depende do fluxo de água pelas turbinas. Este fluxo está relacionado com a diferença de cargas entre os dois lados da barragem.

Para a determinação da potência que pode ser gerada em uma usina, são executadas simulações, considerando-se o escoamento de água do reservatório desde o seu nível máximo normal de operação até seu nível mínimo operacional. Com esta variação do volume de água armazenado no reservatório, é possível então, calcular a energia disponível com a implantação da usina.

A barragem possui um nível mínimo de operação, abaixo do qual a geração de energia deve ser interrompida. Tal nível é calculado de forma a garantir a não formação de vórtices, e evitar o acúmulo excessivo de sedimentos. O cálculo do nível mínimo é executado considerando os sedimentos da região e características das turbinas utilizadas, como carga mínima de operação. Novamente, torna-se

necessário então o conhecimento da batimetria da região, para uma determinação do volume a ser ocupado por sedimentos e do volume que garanta a submersão mínima para a operação, bem como suas respectivas alturas de lâminas de água.

3.2.3 Previsão das marés

A energia gerada pela usina marémotriz está ligada às variações do nível de marés. A região em estudo é conhecida por suas elevadas amplitudes de marés, porém um adequado conhecimento da maré no local de implantação é indispensável já que a viabilidade de uma usina pode ser comprometida caso a amplitude das marés não atinja o valor esperado.

Para um estudo de viabilidade, são considerados levantamentos existentes de marés, como dados históricos registrados por marégrafos próximos à região de implantação. Estes dados são utilizados durante a fase de análise de viabilidade da usina, fornecendo estimativas sobre o potencial energético do eixo de barragem em questão, porém, é indispensável um estudo das oscilações de maré no local de implantação para um eventual projeto básico de uma usina marémotriz.

Devem ser considerados também os efeitos de ressonância de marés no local de estudo, utilizando-se de modelos em escala reduzida já que a implantação da barragem afeta o comportamento dinâmico das marés, podendo amplificar as oscilações ou até mesmo reduzi-las, comprometendo a geração de energia.

3.2.4 Modelo de geração

A escolha do tipo de turbina

Em nosso trabalho, optamos pela instalação de uma barragem capaz de produzir o desnível máximo que pode ser obtido para a geração e aproveitamento da máxima energia potencial de queda. Para tal arranjo é necessário o uso de turbinas desenvolvidas para baixa queda, grandes vazões e que operem em apenas um sentido de escoamento, uma vez que o modelo de geração adotado foi o de simples efeito (do reservatório para o mar). Nessas configurações as turbinas mais apropriadas são as Kaplan (figura 4). Tais turbinas são as mais recomendadas para as chamadas “quedas muito baixas” que variam entre 2 metros e 15 metros. Seu amplo uso em pequenas centrais hidrelétricas tem popularizado seu uso no Brasil e também no resto do mundo.



Figura 5. Turbinas Kaplan (Fonte: IMPSA)

Outro modelo de turbina que poderia ser utilizado são as do tipo bulbo (Figuras 6). Tais turbinas têm o gerador envolvido por uma carcaça e funcionam com eixo horizontal podendo trabalhar em ambos os sentidos do escoamento. Ela tem como desvantagem a grande necessidade de obras de estrutura e ancoragem, que podem ser justificadas frente ao seu custo, mais baixo que as de eixo vertical. Este foi o tipo de turbina utilizado em La Rance e é usualmente recomendada para casos onde a altura de queda é um pouco maior (de 10 metros a 30 metros). Neste caso toda a turbina deve ser tratada contra incrustações e corrosão uma vez que toda ela fica submersa, podendo sofrer ações dos organismos marinhos.

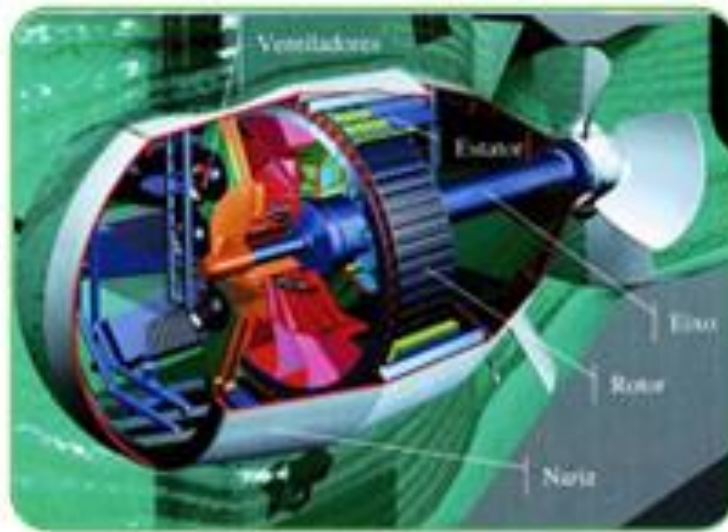


Figura 6. Turbina Bulbo (Fonte: Santo Antonio Energia)

A turbina tubular inclinada é também um tipo que pode ser utilizado em baixas quedas. Neste tipo de turbina, as pás são conectadas ao eixo, inclinado em relação às suas pás possibilitando que o núcleo gerador fique longe do fluxo de água. Estes tipos de turbina foram utilizados no Rio Severn.

Os modelos de turbina que funcionam com corrente de água (figuras 7, 8 e 9), embora não seja objeto principal deste nosso trabalho, serão aqui mencionados, pois se tratam de uma alternativa bastante eficiente para locais onde não é possível a instalação de uma barragem (seja por motivos financeiros, ambientais ou por ter pequenas amplitudes de marés) e onde a velocidade de corrente da água supere 0,8 m/s (Garman, 1986), pois neste caso a potência da turbina é muito pequena não compensando sua instalação.

O cálculo da potência gerada por tais turbinas é demonstrado por Garman (1986) como:

$$P = 0,05 \gamma A V^3 \eta$$

Onde P é a potência gerada pela turbina (em Watts), γ é o peso específico da água (em N/m³), A é a área total do rotor (m²), V a velocidade da corrente (m/s) e η o rendimento da turbina.

As turbinas devem estar devidamente ancoradas em plataformas flutuantes que devem ser fixadas às margens ou ao fundo por meio de cabos, bases gravitacionais ou estruturas semelhantes.



Figura 7. Perspectiva do funcionamento das turbinas de corrente (Fonte: Marine Current Turbines)



Figura 8. Rotores das turbinas MCT (Fonte: Marine Current Turbines)

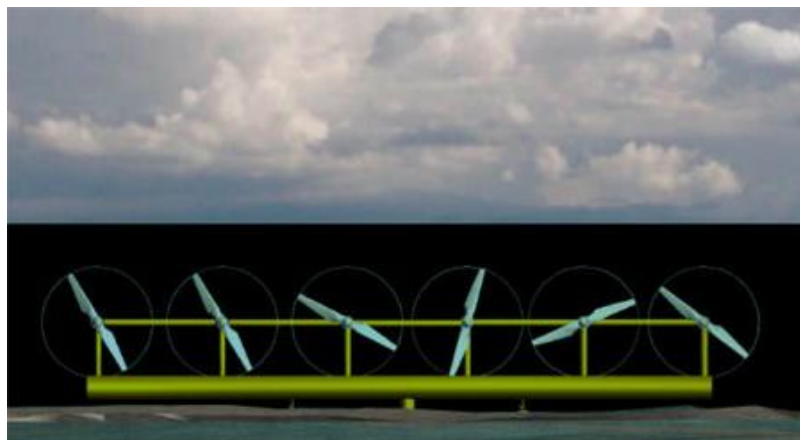


Figura 9. O sistema multirotor patenteado pela MCT (Fonte: Marine Current Turbines)

As turbinas hidrocínéticas (de corrente), assim como a de baixa queda, estão também se popularizando e, depois de passar a ser fabricada por diversas empresas ela passou a se sobressair como alternativa de geração nas chamadas micro-

centrais hidrelétricas. A disponibilização destas turbinas chegou a comunidades isoladas que sofriam por falta de energia, ou que eram obrigadas a gerar energia através da queima de combustíveis fósseis. A simples manutenção e operação destas máquinas permitem que a população local seja treinada para manter seu correto funcionamento e dar cunho social ao trabalho.

Outro aspecto bastante importante do uso destas turbinas é a dramática redução dos impactos ambientais gerados pela instalação de uma usina. Além de dispensar a construção da barragem e formação do reservatório, responsáveis pela imensa maioria dos impactos ambientais existentes na construção e operação de uma usina, o fato de funcionarem afogadas elimina a interferência com a paisagem do local.

A forma de operação

Usinas marémotriz podem operar em simples ou duplo efeito, com ou sem reservatório. O modelo sem reservatório não permite a criação de desnível e, portanto a geração se dá pela corrente. Os equipamentos usados para este tipo de funcionamento são descritos no item seguinte.

O funcionamento com reservatório pode contar com a formação de um ou múltiplos reservatórios. A operação com múltiplos reservatórios já foi abordada em alguns trabalhos teóricos e chegou a ser cogitada para algumas instalações, mas nunca chegou efetivamente a ser utilizada. Por este motivo, não foi abordado o funcionamento com múltiplos reservatórios.

A operação com formação de um único reservatório (Figura 10) pode contar com geração em apenas um sentido, o chamado simples efeito ou em ambos os sentidos, chamado duplo efeito.

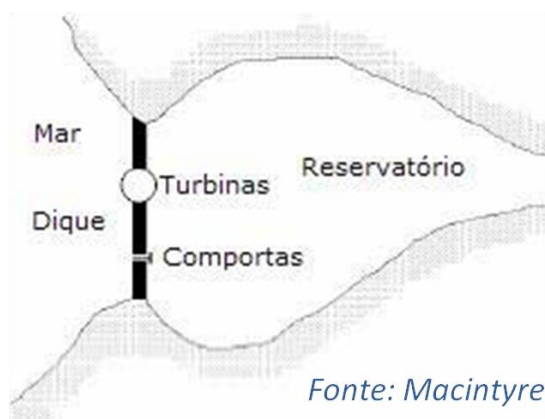


Figura 10. Funcionamento da usina com um único reservatório

Este trabalho elegeu a operação em simples efeito. Tal decisão veio embasada no argumento que, para operação em duplo efeito, o uso das turbinas Kaplan não seria o mais adequado. Neste caso seriam usadas então turbinas bulbo, que teriam que ser adaptada à necessidade. Além de mais caras, estas turbinas têm rendimento inferior à Kaplan e sua diferença de custo não seria justificada para o potencial de geração que seria obtida pela usina. A facilidade de operação da usina de simples efeito também contou para esta opção.

A geração em simples efeito se dá na vazante (Figura 11). A barragem está com suas comportas abertas quando do aumento do nível do mar (que também eleva o nível do reservatório). Quando o nível do mar pára de subir, as comportas são fechadas para que a água fique presa no reservatório. Quando o mar atinge seu nível mínimo (cerca de três horas depois do fechamento das comportas), as comportas são novamente abertas e o reservatório descarrega seu volume para o mar, gerando energia. A geração se dá enquanto o nível do mar permanece baixo.

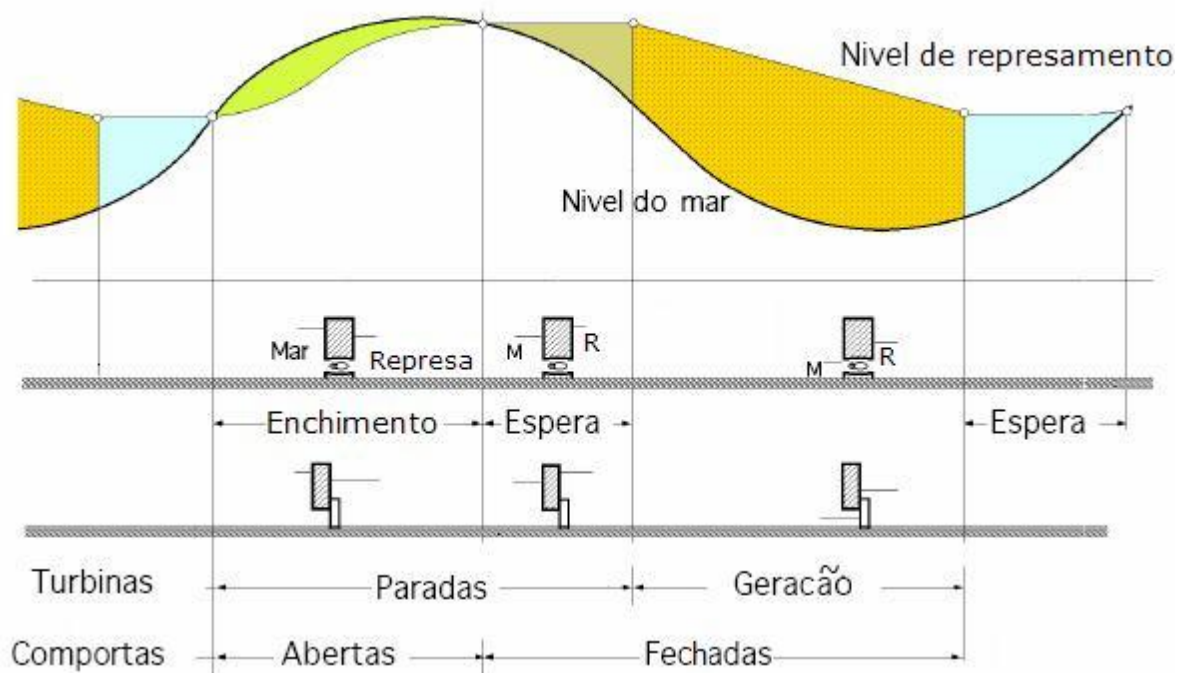


Figura 11. Geração em simples efeito (Fonte: Diez, 2002; Ferreira, 2007)

3.2.5 Teoria de cálculo: desnível; vazão; volume; potência

a) Escolha do eixo do barramento

Após ter definido a área provável da barragem, é preciso escolher o local mais indicado do eixo do barramento. Para tanto, levamos em conta alguns fatores condicionantes que são explicitados na sequência.

Quanto aos aspectos ambientais, devem-se considerar a área de terras úmidas (manguezal) afetada e a redução do prisma de marés.

Em relação aos aspectos técnicos, no entanto, devem-se buscar o local onde a energia gerada é maior, ou seja, o local onde a amplitude de maré e o volume do reservatório são maiores.

É preciso também considerar os aspectos construtivos e, por este lado, as características geotécnicas devem ser favoráveis e largura do rio estreita, de forma a reduzir a extensão da barragem.

b) Delimitação do reservatório

A área e o perímetro do reservatório são calculados com auxílio do freeware GE Path. O dado de entrada no GE Path é um polígono representando o contorno do reservatório, constituído da maior quantidade possível de pontos, para ter a maior precisão possível para esta etapa.

c) Estimativa da amplitude

A maré deve ser estimada de acordo com os dados fornecidos pela FEMAR referentes a estação maregráfica “Turiaçu II” (FEMAR). Deve ser feita a análise quanto à periodicidade da maré (caracterizado por duas preamares e duas baixamares em cada período ou ciclo de maré, ou seja, em cada dia lunar). A amplitude média das marés de sizígia de quadratura são os dados utilizados para determinar a amplitude de maré que será utilizada nos cálculos.

Deve-se então considerar algumas hipóteses:

- Os parâmetros da maré são constantes ao longo do reservatório, a amplitude de maré é compensada pelas aproximações adotadas no cálculo da área do reservatório.
- A maré no reservatório é similar àquela da estação.

d) Estimativa do volume útil

A partir dos dados batimétricos obtidos deve-se optar por um dos métodos a seguir:

Primeiro método

O primeiro método desenvolvido para calcular com a maior precisão o volume útil do reservatório é a utilização de bancos de dados geomorfológicos, ou seja, de altimetria.

Esse método consiste em, a partir dos dados altimétricos, gerar curvas de nível, com auxílio do AutoCAD. Para cada amplitude característica da maré deve-se criar um contorno, e a partir daí, deduzir a área molhada correspondente.

A geração das curvas de nível pode ser extremamente trabalhosa, mas deve ser realizada para aplicação correta deste método.

Segundo método

Para esta estimativa do volume útil do reservatório, inicialmente deve-se buscar na literatura características do solo na região, um Gleissolo, ou alternativamente fazer uma análise das margens para determinar o ângulo de inclinação dos taludes do rio. Caso tal análise também fosse impossibilitada pela ausência de dados, segundo Ferreira (2007) pode-se considerar a área constante com a variação da maré.

Conforme descrito por Ferreira (2007), a declividade ao longo do rio pode ser considerada constante. Calcular o volume útil do reservatório se resume em multiplicar a queda de nível do reservatório ΔH durante a descarga pela área do reservatório A_{res}

Assim, obtêm-se:

$$V_{util_{sizigia}} = \Delta H_{sizigia} \cdot A_{res}$$

$$V_{util_{quadratura}} = \Delta H_{quadratura} \cdot A_{res}$$

Considerando que a curva senoidal representando a evolução do nível da maré ao longo do tempo seja perfeita, conclui-se que:

$$V_{util_{médio}} = \frac{V_{util_{sizigia}} + V_{util_{quadratura}}}{2}$$

e) Estimativa da potência e outras grandezas básicas da usina

A determinação das grandezas básicas da usina, feita neste item, é integralmente baseada sobre no modelo proposto por Macintyre (1983). Segundo Macintyre, Bernstein introduziu para as usinas marémotrizes o conceito de Energia potencial anual aproveitável, isto é, o trabalho realizado durante um ano pela maré de uma dada bacia para elevar e baixar o nível. Deduziu a fórmula:

$$E_{potap} = 0,41 \cdot Am^2 \cdot A_{res} \cdot 10^6 \text{ [kWh/ano]}$$

Onde:

Am é a amplitude da maré média dada em metros e
 A_{res} é a área da bacia (estuário do rio) dada em km^2

Porém tem-se que: $Am = \frac{\Delta H_{sizigia} + \Delta H_{quadratura}}{2}$

O aproveitamento energético da usina, entretanto, é consideravelmente menor que o obtido teoricamente da bacia em razão do regime de operação da mesma e das próprias condições da bacia. Deve-se, portanto, introduzir um fator corretivo que equivale a um coeficiente de rendimento da instalação, φ , que varia de 0,30 a 0,36. Adotamos $\varphi = 0,30$ a favor da segurança. Tem-se então para potência da usina, com regularização:

$$E_{pot_{usina}} = \varphi \cdot E_{potap}$$

A **descarga máxima** $Q_{máx}$ e a **queda máxima** $H_{máx}$ da usina serão:

$$Q_{máx} = 35,6 \cdot Am \cdot A_{res}$$

$$H_{máx} = 0,62 \cdot Am$$

Admitindo um rendimento $\eta = 0,75$, a **potência instalada** da usina é dada pela fórmula:

$$P = \frac{1.025 \cdot \eta \cdot Q_{\text{máx}} \cdot H_{\text{máx}}}{75} \text{ cv}$$

Ou seja:

$$P = \frac{7,36 \cdot N_{\text{ev}}}{10} \text{ kW}$$

A **potência máxima instalada** é dada por:

$$P_{\text{inst}} = 210 \cdot A_{\text{m}}^2 \cdot A_{\text{res}}$$

A **máxima potência fornecida** pela usina no curso de um ciclo, no momento em que a amplitude máxima se verifica, é:

$$P_{\text{disp.}} = \frac{N_{\text{inst.}}}{1,23^2}$$

Cabe ressaltar que a **potência mínima correspondente à queda inicial** é dada por:

$$P_{\text{mín.inic.}} = 126 \cdot A_{\text{m}}^2 \cdot A_{\text{res}}$$

f) Número de horas de funcionamento anual

Temos uma produção anual de energia igual a E_{pot} . A usina funcionará anualmente durante um número de horas h , dado por:

$$hf = \frac{E_{\text{pot}}}{N_{[\text{kW}]}}$$

O **fator de utilização** da capacidade instalada é:

$$\Phi = \frac{hf}{8.760 \text{ horas anuais}}$$

3.2.6 Análise de Impactos Ambientais

A análise de impactos ambientais foi elaborada com formato de plano de trabalho para futura elaboração de um estudo de impacto ambiental. Dentro do plano de trabalho sugerido por Sánchez (2006) optamos por nos concentrar nos itens que consideramos factíveis de serem trabalhados, com o nível de detalhe de informação que possuímos ainda nesta fase preliminar. A ausência de alguns dados, que poderão ser obtidos apenas com a visita à campo nos obrigam portanto a eliminar

alguns itens desta análise inicial. Tais itens devem voltar a ser objeto do plano quando da elaboração do projeto básico, quando poderemos obter os dados chamados secundários, necessários para realização desta etapa. A decisão de optar por este modelo de análise veio da necessidade requerida pelo estudo de viabilidade. Com a evolução do estudo de viabilidade para o projeto básico, a elaboração do estudo de impacto ambiental (EIA) se faz necessária para garantir o sucesso da obtenção da outorga de uso obrigatória, segundo a Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH- Lei 9.433/1997), para qualquer uso que não se configure como insignificante.

A estrutura utilizada para tal avaliação foi recomendada por Sánchez (2006) que em seu livro recomenda o uso da seguinte estrutura para o plano de trabalho:

1. Breve descrição do empreendimento
2. Breve descrição das alternativas que serão avaliadas.
Devem ser consideradas, no mínimo, a alternativa de não execução do empreendimento e de execução com uma alternativa de eixo para a barragem.
3. Localização.
4. Delimitação da área de estudo.
5. Características ambientais básicas da área.
6. Principais impactos prováveis devido ao empreendimento.
7. Considerações sobre os possíveis impactos mais significativos.
8. Estrutura proposta para o EIA e conteúdo de cada capítulo e seção.
9. Metodologia de levantamento e tratamento de dados.
10. Procedimentos de análise de impactos.
11. Formas de apresentação dos resultados
12. Compromissos de consulta pública

Para elaboração do plano de trabalho é necessário explicar alguns conceitos e os seus respectivos significados como serão abordados neste trabalho. Tal definição se faz necessária devido à grande confusão de termos e conceitos existentes nesta área, muitas vezes por estes conceitos terem sido trazidos de culturas com diferentes línguas e tradições. As definições que seguem abaixo são dadas segundo Sánchez (2006) e são necessárias para a elaboração de qualquer estudo ambiental. Ficam, portanto explicitados:

- Impacto ambiental: qualquer modificação na qualidade ambiental natural que resulta da alteração dos processos naturais por meio de intervenção humana.
- Aspecto ambiental: são os elementos de todas as atividades de uma organização que podem interagir com o meio ambiente (NBR ISO 14001:2004)

- Efeito ambiental: alteração de um processo natural ou social, decorrente de ação humana.
- Degradação ambiental: qualquer alteração adversa do processo, funções ou componentes ambientais.
- Recuperação ambiental: aplicação de técnicas que permitam a um ambiente degradado seu novo uso por atividade sustentável produtiva.
- Diagnóstico ambiental: descrição de um dado local, segundo suas características ambientais, no momento atual.
- Avaliação de impacto ambiental: análise de consequências futuras de uma ação presente ou proposta.

Nos demais aspectos, devemos observar também que os principais impactos de uma usina marémotriz são os mesmos apresentados em uma usina hidrelétrica qualquer. Isto porque os aspectos construtivos da usina que será executada, com criação de barragem e reservatório seguem os mesmos de uma usina hidrelétrica, diferindo basicamente em sua fase de operação. A diferença básica mais evidente é o uso da água do mar, salina, e que portanto pode trazer maior degradação ao local.

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 Estudos já realizados na área

Há duas formas de energia que podem ser extraídas dos oceanos: energia térmica e energia mecânica. A energia térmica ocorre pelo aquecimento solar de camadas superficiais dos oceanos, formando um gradiente de temperaturas. É necessário um gradiente mínimo de 20°C para que a extração seja viável (Harari ;Camargo; Almeida, 2009). Já a energia mecânica pode ser dividida em duas categorias: a energia de ondas, geradas pela ação de ventos; e a energia das marés, gerada pela interação gravitacional entre Terra, Sol e Lua.

A energia mecânica dos oceanos pode, portanto, estar na forma cinética, nas ondas, ou na forma potencial, nas marés. Neste estudo abordaremos a extração da energia potencial com a construção de uma barragem e um reservatório.

A geração de energia em usinas marémotrizas se dá a partir da diferença de nível de água entre os dois lados da barragem, como ilustra a figura 12. Como a maré apresenta variações de nível ao longo do tempo, o desnível e, conseqüentemente, a energia disponível, é variável.



Figura 12. Funcionamento da usina marémotriz – fonte www.portalsaofrancisco.com.br

Havendo um desnível mínimo necessário para a operação, a água escoar do lado com maior energia potencial para o lado com menor energia potencial, movimentando turbinas e gerando energia elétrica. O fluxo de água pode se dar tanto no sentido mar-reservatório como no sentido inverso, sendo possível a geração de energia em ambos os casos.

Os equipamentos utilizados em usinas marémotrizas são semelhantes aos utilizados em usinas hidrelétricas, porém com condições de operação distintas.

Usinas marémotrizas trabalham com grandes vazões e pequenas alturas de queda (Ferreira; Estefan, 2003). É necessário o uso de turbinas de baixa queda, desenvolvidas de maneira a otimizar a geração de energia nessas condições. Como exemplo pode-se citar a turbina Kaplan que além de operar bem com pequenas quedas e grandes vazões, tem baixo custo de instalação devido ao seu tamanho reduzido (power.alstom.com).

Outra diferença nas condições de operação vem da agressividade do ambiente marinho. Os equipamentos devem ser protegidos contra corrosão e incrustação de organismos marinhos. Com o uso de técnicas de engenharia naval, pode-se proteger adequadamente os equipamentos.

Como é necessário um desnível mínimo, a operação se dará de forma intermitente, já que o equipamento de geração deve ser desligado caso não seja suficiente para a operação adequada da usina. Com a intermitência de funcionamento, a usina marémotriz necessitará de uma fonte complementar de energia para regularizar o fornecimento.

A energia gerada por usinas marémotrizas depende fortemente do local e forma de implantação. A energia potencial disponível pode ser estimada com o uso da seguinte fórmula:

$$E = \eta \times \rho \times g \times A_m^2 \times A_{res}$$

onde:

η = eficiência na conversão da energia mecânica em energia elétrica

ρ = densidade da água do mar

g = aceleração da gravidade

A_m = amplitude média da maré

A_{res} = área total do reservatório

Pode-se notar a importância da amplitude da maré para a geração de energia, já que a equação é quadrática em h e linear nos demais parâmetros.

A potência média de uma maré de período τ pode ser calculada da seguinte fórmula (Twidell; Weir):

$$\bar{P} = \frac{\rho * A_{res} * A_m^2 * g}{2 * \tau}$$

Onde: ρ : massa específica da água

A_m : amplitude média da maré

Novamente, nota-se a forte dependência da potência em relação à amplitude das marés.

A mínima amplitude de marés para a implantação de uma usina é de aproximadamente 5 metros (Tidal Power, 2010), porém, podem-se viabilizar usinas em locais com amplitudes inferiores, com o uso de tecnologia adequada, como sistemas de conversão de energia mais eficientes, por exemplo.

A geometria do local de implantação também tem um forte impacto na energia disponível. Maiores amplitudes de marés podem ocorrer caso a interação entre as ondas de cheia e as ondas refletidas nas margens do estuário gerem condições de ressonância (Tidal Power, 2010).

Como os locais de implantação de barragens geralmente têm uma geometria complexa, é necessário o estudo de modelos reduzidos, em tanques de ondas, para obter mais dados sobre o local de implantação, já que possíveis amplificações das amplitudes de marés são bastante relevantes na geração de energia (Twidel; Weir).

A implantação da usina causa alteração nos níveis de maré da bacia. Caso a área próxima ao reservatório seja ocupada, deve ser prevista a remoção dos habitantes para locais seguros, onde não sejam afetados pela operação da usina. Do contrário seria necessário limitar as cotas de inundação, comprometendo a viabilidade do projeto.

Entre outros impactos possíveis, podemos citar a alteração nos padrões de sedimentação, erosão e turbidez da água.

Como impactos positivos, há a possibilidade de construção de vias terrestres passando pela barragem e interligando suas extremidades. A figura 13, mostra como isso foi feito na usina de La Rance, na França. Com a redução de amplitudes de marés dentro do reservatório, é possível ainda o uso de partes do mesmo para fins recreativos.

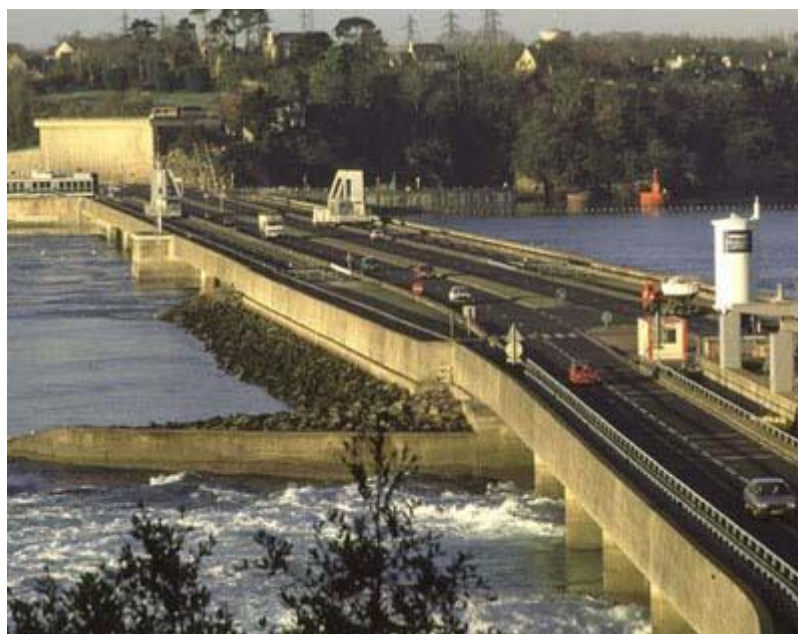


Figura 13. Via terrestre sobre a barragem de La Rance

Fonte: <http://www.sciencemuseum.org.uk>

Outros benefícios da implantação da usina é o controle de cheias. Como desvantagem devemos citar o fato do assoreamento reduzir o prisma de maré prejudicando assim a navegabilidade do rio. Para exemplificar tal fato temos o caso do Bacanga onde tal assoreamento causou prejuízos. Outras vantagens e desvantagens são citadas no quadro abaixo:

Quadro 1. Vantagens e desvantagens da usina marémotriz

Vantagens	Desvantagens
Construção de via terrestre sobre a barragem	Pode ser necessário remover a população próxima à barragem
Uso de partes do reservatório para fins recreativos	Alteração dos padrões de sedimentação, assoreamento reduz o prisma de maré.
Controle de cheias	Erosão
Não emite carbono ou gases causadores do efeito estufa (Tidal Power)	Elevado custo de implantação (Tidal Power)
Não depende de combustíveis fósseis (Tidal Power)	Não produz energia até que a barragem esteja terminada (Tidal Power)

4.1.1 Usinas marémotrizes no mundo.

Há poucos lugares adequados à instalação de usinas marémotrizes principalmente pela necessidade de elevadas amplitudes de maré.

A figura 14 mostra locais com altas amplitudes de marés.

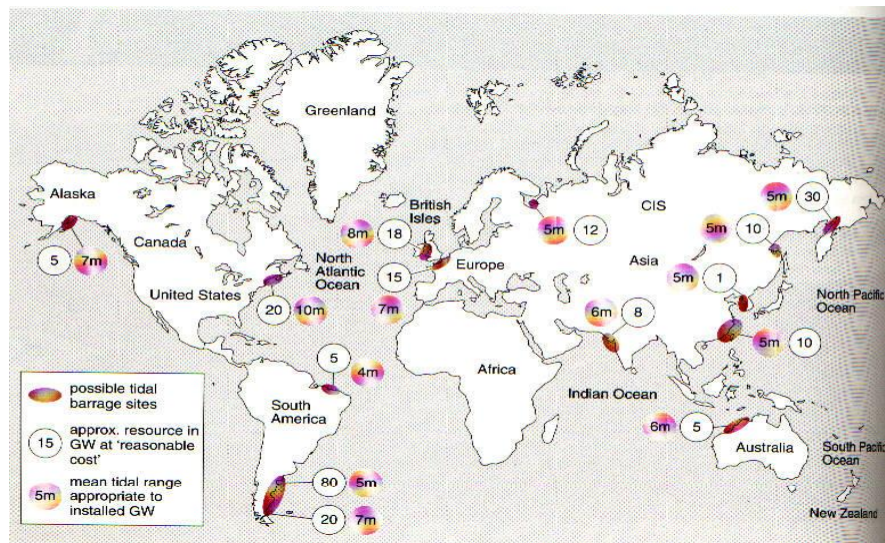


Figura 14. Locais com elevadas amplitudes de marés (Tidal Power, 2001)

A usina de La Rance, cuja construção foi concluída em 1966, é, até esta data, a maior usina marémotriz operante. Sua barragem tem 750 metros de extensão. Com 24 turbinas bulbo e uma capacidade instalada de 240 MW, tem uma geração anual de aproximadamente 600GWh.

A tabela 1 apresenta algumas outras usinas marémotrizes em operação.

Tabela 1. Exemplos de usina maremotrizes operantes

Usina	Local	Capacidade Instalada	Tipo de turbina
Annapolis	Canadá	20 MW	"Straight-flow"
Jiangxia	China	3,2 MW	Bulbo
Kislaya	Rússia	1,5 MW	Ortogonal

No Brasil, a costa da região norte apresenta bom potencial para a implantação de uma usina marémotriz, devido às suas elevadas amplitudes de marés (Tidal Power, 2010).

4.1.2 A tentativa de instalação de uma usina marémotriz no Brasil

Na tentativa de explorar o potencial energético das marés na região norte do país, foi concebida e construída uma barragem no rio Bacanga, no Maranhão, próximo ao porto de Itaqui, em 1968. Fica localizada na bacia de São Marcos, onde se registram

marés de grandes amplitudes. O projeto básico foi, em seu inteiro teor, realizado pela empresa Sondotécnica.

A concepção foi fortemente influenciada pela usina de La Rance. Caso fosse implementada como o planejado, seria a segunda maior usina maré motriz do mundo (Twidell; Weir).

Alguns problemas impediram que a usina fosse construída. A inauguração da Avenida Presidente Médici em 1973, além de limitar a cota de inundação do reservatório, impulsionou a ocupação de áreas que deveriam ser inundadas quando a usina entrasse em funcionamento.

Outro grave problema encontra-se nas fundações da barragem que não foram dimensionadas prevendo vibrações geradas pelo funcionamento das turbinas. Dentro do atual cenário a usina não é mais viável economicamente. Há, porém, interesse em sua ativação como usina piloto para pesquisas.

4.2 Estudo de caso – A instalação de uma usina marémotriz no Brasil

4.2.1 A escolha do local adequado – Um breve estudo de viabilidade de quatro locais diferentes.

A primeira decisão a se tomar na análise do potencial nacional para a implantação de uma usina marémotriz foi o local a ser indicado para a instalação da usina.

Segundo nossas pesquisas durante a já citada revisão bibliográfica, os locais mais propícios para tal implantação, que forneceriam a amplitude de maré necessária, seriam “na foz do rio Mearim no Maranhão, na margem esquerda do Amazonas, no Amapá e na foz do rio Tocantins no Pará” (Rizzo, 1998; Harari, Camargo e Almeida, 2009). Levando tal proposta ao nosso orientador e discutindo tais locais com professores do Instituto Oceanográfico da USP (Universidade de São Paulo), da UFMA (Universidade Federal do Maranhão), da UFPA (Universidade Federal do Pará), UFRJ (Universidade Federal do Rio de Janeiro), entre outras instituições, decidimos incluir nesta primeira seleção também a costa Ocidental do Maranhão.



Figura 15. Locais com maré potencial para instalação de uma usina

Sabemos ainda que, no Brasil, os efeitos meteorológicos alteram sensivelmente as marés ao sul de nossa costa, sendo, porém, quase desprezíveis conforme nos deslocamos para o norte. Desta forma, as marés sofrem influência substancialmente astronômica, o que nos permite dizer que a previsão de marés é bastante precisa, apresentando apenas pequenas variações (Ferreira, 2007).

Criamos então uma matriz de decisão que nos levaria a escolha do local definitivo. Para preencher tal matriz fizemos um breve estudo sobre os locais pré-definidos. Deve ser feita a análise de vantagens e desvantagens para cada local, a fim de tomar uma decisão embasada sobre o local de implantação desta usina.

A matriz de decisão foi feita levando em conta alguns aspectos principais, considerados indispensáveis para viabilizar esta iniciativa, a saber:

1. O local deve ter altas amplitudes de marés e, simultaneamente, um canal com largura máxima de 500 metros, de forma a viabilizar a construção de uma barragem para a criação de um reservatório;
2. A densidade demográfica às suas margens deve ser baixa ou nula, de forma a reduzir o impacto a populações ribeirinhas que inevitavelmente teriam de ser removidas da área em questão;
3. Não selecionar áreas de reserva ou preservação ambiental, o que inviabilizaria a inundação do local;

4. Áreas onde existam alternativas de geração de energia renovável, que sirvam como complemento à marémotriz, para aumentar a capacidade de geração ou ao menos atenuar sua intermitência, como será explicado mais adiante.

A matriz de decisão irá atribuir pesos de 0 a 10 aos quatro aspectos citados, ponderados por seu grau de importância. Para cada aspecto, cada região receberá uma nota (de 0 a 10) de acordo com o cumprimento da exigência em questão. Ao final da análise teremos então um ranking, decidindo o local mais adequado. Baseado nestes aspectos, segue a análise:

- Foz do rio Mearim no Maranhão:

A bacia do rio Mearim é composta basicamente por cinco rios: o próprio Mearim, o rio Pindaré, o rio Grajau, o rio Das Flores e o rio Corda. O rio Mearim conta com uma extensão de 1.150 quilômetros desde sua nascente nas encostas da Serra Negra, da Menina e Crueiras até desembocar na baía de São Marcos, na altura da ilha de Caranguejos (EMBRAPA, 1986).

Com grandes amplitudes de marés e algumas reentrâncias, o local supre a primeira exigência de possuir um canal com menos de 500 metros de largura e com mais de 3 metros de amplitude de maré, nível que é facilmente ultrapassado (ANEXO I).

Já no segundo aspecto, a área mencionada, também tratada como o “Golfão Maranhense”, tem a maior densidade demográfica do estado do Maranhão, ultrapassando 174 hab./km² (Feitosa e Souza, 2009). Ainda segundo Feitosa e Souza (2009), as baías de São Marcos e São José são consideradas as mais importantes do estado, pela densidade das atividades humanas e circulação de riquezas.

Devemos destacar ainda a proximidade desta área com o porto de Itaqui, da Companhia Vale (antiga Companhia Vale do Rio Doce) e da ALUMAR. Juntos, estes portos respondem por toda a exportação do estado. A instalação de uma usina marémotriz, invariavelmente, diminuiria as amplitudes de maré alterando a navegabilidade no porto e inviabilizando a entrada de alguns tipos de navios. Este fato impactaria sensivelmente a atividade econômica local.

Quanto o terceiro aspecto, o impacto ambiental para a inundação de uma grande área naquele local é um fato de grande preocupação. Isto porque a área tem alta densidade demográfica o que torna difícil a remoção. Como exemplo da gravidade deste fato podemos citar a usina do Bacanga uma vez que foi este o fator que a tornou inviável atualmente. A ocupação das áreas baixas, antigamente atingidas pela preamar, que ocorreu devido ao nível do reservatório ter sido mantido em 2,5 metros, superou a marca de 20 mil habitantes que teriam de ser retirados do local no caso de inundação, tornando a obra inviável (Lima, Saavedra, Barros e Camelo, 2003). Em relação ao quarto item, é objeto atual do nosso estudo o potencial eólico

desta região. Como citamos acima, é bastante importante que a área escolhida possa nos suprir com fontes alternativas de energia. A busca por energia limpa e renovável nos é de particular interesse uma vez que o impacto ambiental da usina será substancial. Estamos, portanto, buscando dados que suportem a instalação de um parque eólico na região.

Tabela 2. Matriz de avaliação do Rio Mearim

Aspectos (peso) Locais	1	2	3	4	TOTAL
	10 – (muito relevante)	8 – (relevante)	9 – (muito relevante)	7 – (relevante)	
Rio Mearim	9 (pouca dificuldade de encontrar canais com menos de 500 metros porém grande amplitude de maré).	0 (áreas totalmente saturadas)	7 (região bastante explorada e habitada, poucas áreas de preservação)	10 (energia eólica abundante)	223

- Costa ocidental do Maranhão

O litoral ocidental do Maranhão é formado por uma série de baías de extensão e formas diferentes que, repletas de ilhas, compõe a forma recortada e cheia de reentrâncias que nos é de grande interesse. As baías em questão são: Turiaçu, Lençóis, Capim, Cabelo de velha, Cumã, Mutuoca, Maracaçume, Carará, Piracaua, Tromí e Iririaçu, Irimirim e Gurupi (Feitosa e Souza, 2009). Ainda segundo os autores, nesta área, há baixa densidade demográfica (aproximadamente 8 hab./km²) e as comunidades que ocupam tal área sobrevivem basicamente da pesca e extração de recursos como o sururu e madeira de mangue. Tais atividades não chegam a representar desequilíbrio natural uma vez que são exercidas apenas por esta pequena população.

As reentrâncias formadas pelas baías nos asseguram uma série de pequenos canais que atendem simultaneamente ambas as necessidades ressaltadas - largura inferior a 500 metros e as altas amplitudes de marés (anexo I).

Tabela 3. Matriz de avaliação da Costa Ocidental do Maranhão

Aspectos (peso) Locais	1	2	3	4	TOTAL
	10 – (muito relevante)	8 – (relevante)	9 – (muito relevante)	7 – (relevante)	
Costa Ocidental do Maranhão	10 (excelentes níveis de maré além de uma costa cheia de canais de pequenas larguras)	8 (menor densidade demográfica dentre as regiões do estado)	8 (não haverá necessidade de inundação de áreas que não sejam inundadas)	5 (possibilidade de intensificar a captação de energia solar e ventos fortes nos dão a oportunidade de estudar a captação de energia eólica)	271

- Foz da margem esquerda do rio Amazonas no Amapá

O rio Amazonas tem um comprimento de 6.992 km e mais de mil afluentes. Entre eles, tem vários da margem esquerda que conduzem à parte do estuário, que fica entre Almeirim e o mar. Por falta de informações, não foi possível encontrar as amplitudes de marés neste trecho, e menos ainda determinar um local preciso onde seria mais adequada a implantação de uma usina maré-motriz. Mas sem dúvida, o fenômeno de marés neste trecho é importante: a Pororoca, palavra de origem indígena, expressa o barulho produzido pelo fenômeno do encontro das águas do rio Amazonas com o oceano Atlântico [...] a maré empurra o rio de volta na direção de seu curso e este se expande pela terra ao redor, inundando toda a região, inclusive praias e as ilhas mais rasas (Governo do Estado do Amapá). A amplitude da maré é de 4 metros na barra norte do rio Amazonas (Tabuas de marés BNDO). Em relação ao aspecto social, a FUNAI (Fundação Nacional do Índio) informa que a população indígena do Estado do Amapá está estimada em 4.100 habitantes, sendo assim uma densidade bem baixa de 0,4 hab./km², em áreas conhecidas. Além disso, o IBGE indica, em 2009 e fora da capital, uma densidade demográfica inferior a 5 hab./km² na região do rio Amazonas.

Segundo dados do Governo do Estado do Amapá e do IBGE, a produção de energia elétrica no Amapá supera o seu consumo doméstico. Assim, o interesse de investir em uma nova alternativa de produção de energia é limitado em relação aos outros lugares propostos.

Finalmente, é importante ressaltar que os recursos provenientes da pesca configuram uma das maiores riquezas do estado, limitando também o fechamento de qualquer rio.

Tabela 4. Matriz de avaliação da foz da margem esquerda do Amazonas

Aspectos (peso) Locais	1	2	3	4	TOTAL
	10 – (muito relevante)	8 – (relevante)	9 – (muito relevante)	7 – (relevante)	
Foz da margem esquerda do rio Amazonas	4 (local provavelmente adaptado, mas falta de informações)	8 (densidade demográfica relativamente baixa)	5 (pesca atividade principal)	6 (produção de energia superior ao consumo)	191

- Foz do rio Tocantins no Pará

Na margem esquerda da Baía do Guajará, em frente ao porto de Belém, podemos identificar vários canais, ao redor da cidade de Ponte de Pedras, que apresentam uma capacidade de reservatório potencialmente viável, uma largura inferior a 500 metros, além de uma amplitude da maré de 3,5 metros (Tabuas de marés da marinha). Uma vantagem dessa região é a oportunidade de obter cartas batimétricas bem detalhadas.

O IBGE mostra que a densidade demográfica em 2009 nessas regiões é relativamente baixa (10 hab./km²), favorecendo a eventual remoção da população ribeirinha. Não temos informações para concluir se a implantação de uma usina maré-motriz teria como consequência a inundação da região, mas comparando com o estuário da cidade de Turiaçu, concluímos que esse local é menos apropriado porque a amplitude de maré é menor.

Em relação às energias alternativas possíveis nessa região, a UFPA desenvolve muitos projetos (alguns já concluídos) de iluminação ou bombeamento de água com a energia solar fotovoltaica, que se apresenta, assim, como concorrente sério.

Tabela 5. Matriz de avaliação da Foz do rio Tocantins

Aspectos (peso) Locais	1	2	3	4	TOTAL
	10 – (muito relevante)	8 – (relevante)	9 – (muito relevante)	7 – (relevante)	
Foz do rio Tocantins	5 (local viável mas potencial médio)	8 (densidade demográfica relativamente baixa)	4 (segurança por falta de informação)	5 (possibilidade de intensificar a energia solar)	185

Depois desta cuidadosa análise e nos baseando em nossa matriz de decisão, definiu-se que o melhor lugar para a implantação de uma usina marémotriz seria a costa ocidental do Maranhão.

Tabela 6. Matriz final: comparação da pontuação obtida por cada uma das locações

Aspectos (peso) Locais	1	2	3	4	TOTAL
	10 – (muito relevante)	8 – (relevante)	9 – (muito relevante)	7 – (relevante)	
Rio Mearim	9	0	7	10	223
Costa Ocidental do Maranhão	10	8	8	5	271
Margem esquerda do Amazonas	4	8	5	6	191
Rio Tocantins	5	8	4	5	185

4.2.2 Batimetria

A região escolhida para a implantação da usina apresentou uma grande dificuldade no desenvolvimento do estudo da região devido à falta de dados batimétricos ou mesmo topográficos da região.

Para o desenvolvimento deste estudo de caso foi utilizado o banco de dados geomorfométricos do INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais).

Este banco de dados disponibiliza o levantamento executado durante a missão SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) para a América do Sul em 2003, que visava suprir a necessidade de mapeamentos em escala 1:100.000 e 1:250.000. Mesmo após um refinamento dos dados pelo próprio INPE, a resolução espacial inicial de aproximadamente 90 metros não é adequada para um estudo de viabilidade da usina marémotriz na região. Optou-se, porém por utilizar este levantamento por tratar-se da melhor informação obtida da região durante a elaboração deste estudo.

Os dados batimétricos são necessários para calcular áreas inundadas, volumes armazenados e potência gerada. Com os dados iniciais do INPE, foram calculadas curvas de nível para a região em intervalos de elevação conhecidos. A partir destas curvas é possível então calcular áreas e volumes em função da oscilação de maré e conseqüentemente obter a potência gerada pela usina no eixo em questão.

4.2.3 Dados de maré

Os dados obtidos em relação à maré são de um marégrafo que fica no alto Turiaçu. Tais dados são suficientes para nosso estudo, porém, por estar relativamente afastado do ponto de implantação da barragem, não seria precisos o bastante para desenvolvimento de projeto básico. Para isso, recomendaríamos que durante o desenvolvimento do projeto básico, uma estação maregráfica fosse posicionada exatamente no eixo da barragem, nos fornecendo dados mais precisos sobre o local.

Também é necessário considerar outros fenômenos envolvendo a dinâmica dos estuários. No oceano aberto as ondas de maré são praticamente simétricas e seu movimento é governado basicamente pelos efeitos astronômicos. Mas quando a onda adentra um estuário sofre alterações que são mais bem explicadas pelas leis da hidráulica e de movimentação de ondas (Clark, 2007).

Um dos fenômenos que aparece quando a onda de maré deixa o oceano é a ressonância. A amplitude da maré pode ser significativamente elevada devido às reflexões entre a borda da plataforma continental e a costa. Esse efeito é bastante visível na Baía de Fundy, no Canadá, que possui as maiores amplitudes de maré do mundo, devido ao efeito da ressonância.

Pode-se estimar que o esse efeito seja significativo quando a distância entre a borda da plataforma continental e a costa seja aproximadamente um quarto do comprimento da onda de maré, que se propaga a velocidade aproximada de $\sqrt{g \cdot h}$, onde g é a aceleração da gravidade e h é a profundidade média, que na costa maranhense é de aproximadamente 30 metros. Assim, para um período de maré de 12 h e 25 min., um quarto de onda equivaleria a 192 quilômetros.

No gráfico da figura 17 é possível observar a relação entre o comprimento do estuário e a vazão em suas bocas (que se relacionam com o prisma de maré e, conseqüentemente, com a amplitude). A linha mais pronunciada foi obtida com um modelo da baía de Fundy, no Canadá. É possível notar que as linhas apresentam mais de um pico de vazão, isso ocorre, pois os estuários apresentam diferentes modos de ressonância. Assim, a diminuição do comprimento do estuário, pela construção da barragem, pode provocar tanto o aumento como a diminuição das amplitudes.

Esse fenômeno é relevante no projeto de uma usina marémotriz, pois a construção da barragem pode afetar os modos de ressonância do estuário, causando o aumento ou diminuição dos níveis de maré. Assim, é necessário, determinar previamente, com a maior acurasse possível, os efeitos que a barragem terá sobre a maré, tanto para a escolha do local onde será instalada, como para os cálculos de geração de energia e dimensionamento das estruturas.

O fenômeno da ressonância ainda não é totalmente entendido, sua modelagem é um trabalho complexo que geralmente lança mão de modelos hidráulicos da região da barragem em conjunto com modelos numéricos para descrever o comportamento do oceano (Clark, 2007). Dadas essas dificuldades, não seria possível neste trabalho realizar um estudo extensivo sobre os efeitos da construção de uma

barragem na baía do Turiaçu. A morfologia da região, com ilhas e canais sinuosos, torna o estudo ainda mais complexo.

Para fins de dimensionamento neste trabalho, será considerado que os efeitos da barragem sobre a ressonância e amplitude de maré não são significativos. Isso é justificado devido ao fato de o local planejado para a construção não implicar em alteração significativa das distâncias a serem percorridas pela onda de maré quando adentra a baía do Turiaçu.

Sendo o prisma de maré capturado pela barragem relativamente pequeno, acredita-se que o ponto correspondente a barragem no gráfico abaixo esteja nesta região inicial em destaque, que corresponde às baixas vazões nas embocaduras. Também o posicionamento do eixo da barragem está bem distante da entrada do estuário, assim a diminuição de seu comprimento não será significativa em comparação com o comprimento da onda de maré.

Ainda no gráfico, embora inicialmente as curvas se confundam, afere-se, pelas características morfológicas da região do Turiaçu, que esta apresenta ângulo de atrito da ordem de 0,7, que corresponde à curva onde os efeitos de ressonância são menos significativos.

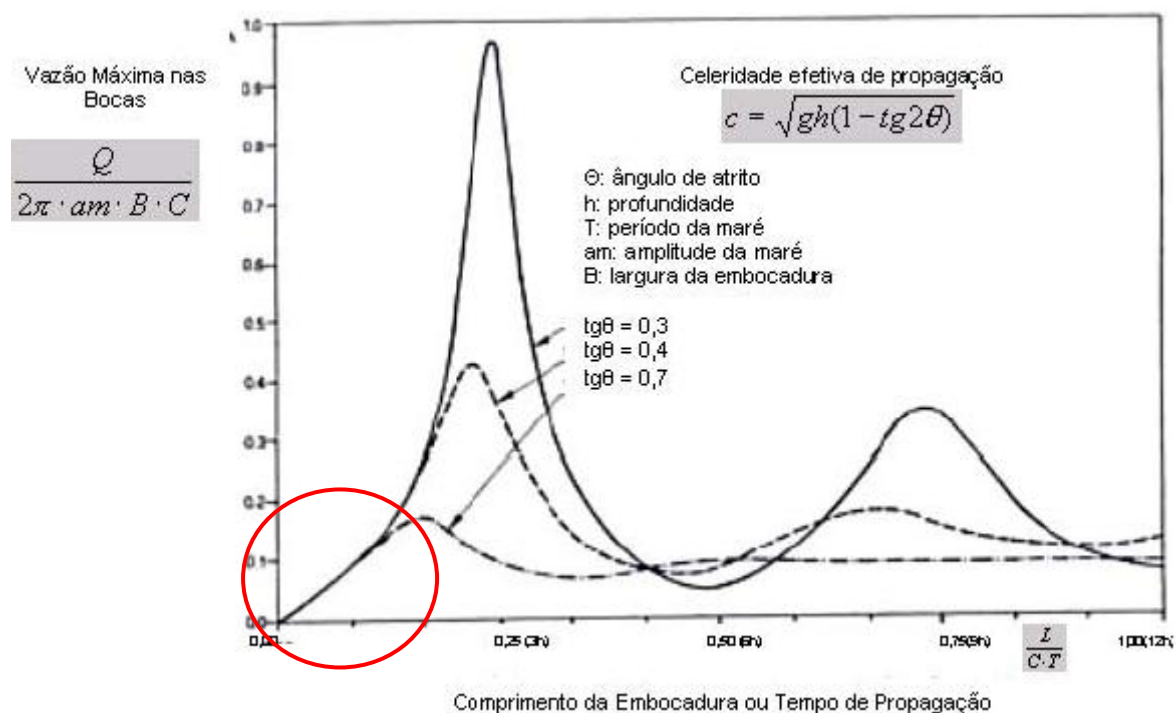
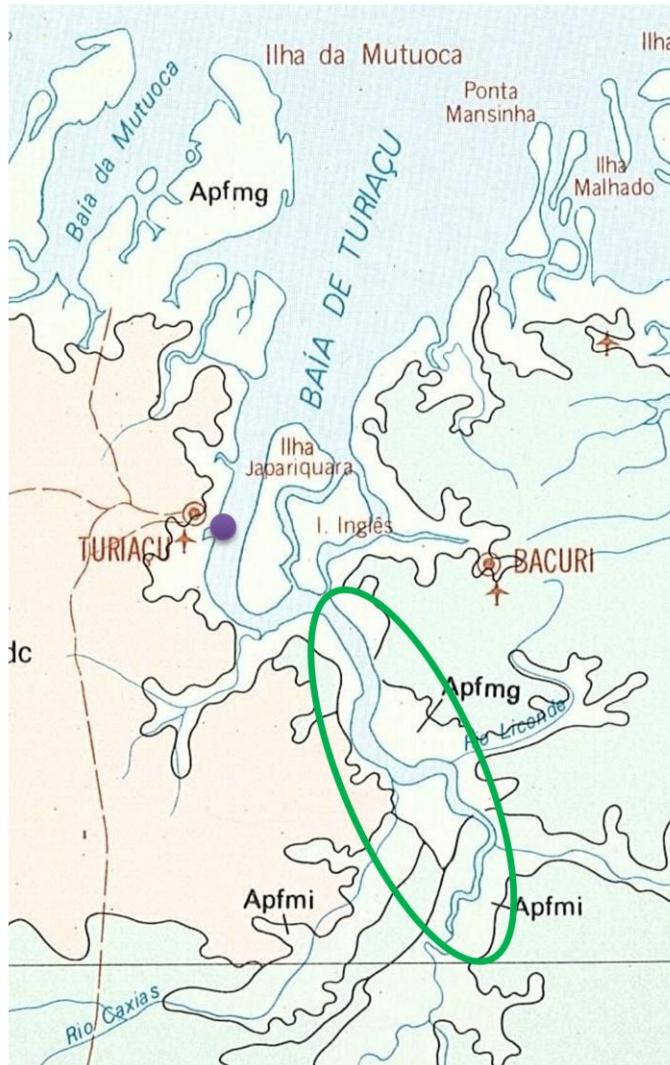


Figura 17. Efeitos da ressonância variando com o comprimento e vazão dos estuários

4.2.4 Proposta de geração

- Escolha do eixo do barramento

A área provável da barragem (Figura 18) foi definida com base nos aspectos discutidos previamente. A definição do eixo ocorrerá então de acordo com os aspectos técnicos e ambientais discutidos na metodologia.



Fonte: Projeto Radam, IBGE

○ Área provável de implantação da usina

Apfmi

Apfmg : zona de manguezal ● Estação Femar

Figura 18. Identificação da área provável de implantação da barragem

De acordo com os fatores condicionantes, temos:

Quanto aos aspectos ambientais, à montante (sul) a área de terras úmidas (manguezal) afetada e a redução do prisma de marés são menores o que favorece esta região por este ponto de vista.

Em relação aos aspectos técnicos, no entanto, à jusante (norte), a energia gerada é maior, pois a amplitude de maré e o volume de reservatório são maiores.

Quanto aos aspectos construtivos, houve certa dificuldade de análise devido à ausência de dados geológicos na região. Tais dados devem ser buscados in loco na fase de elaboração do projeto básico.

Assim sendo, a escolha foi baseada na dualidade entre a potência provável gerada pela usina e os impactos ambientais envolvidos.

À jusante (norte), a potência gerada é maior já que a perda de carga – que aumenta conforme o afastamento do local até a foz e o número de curvas - é minimizada. Nesta localidade o volume útil do reservatório também é maior. Além disso, embora a área de manguezal afetada seja maior nesta posição, convém ressaltar que toda a área de manguezal é naturalmente afogada e portanto, o impacto ambiental gerado por aumentar o período de afogamento pode ser mitigado com o compromisso de monitorar e tratar a qualidade desta água.

g) Delimitação do reservatório

A Figura 19, obtida no Google Earth, determina o contorno do reservatório.



Figura 19. Delimitação do reservatório.

O contorno não inclui o rio Turiaçu até a sua nascente por ele ser muito estreito à montante do polígono. Além disso, a perda de carga é tão elevada que a amplitude de maré pode ser considerada desprezível e tal desconsideração será compensada adiante pela hipótese de que a maré seja constante ao longo de todo o reservatório.

Utilizando 293 pontos para delimitação do reservatório e utilizando o GE Patth, tem-se:

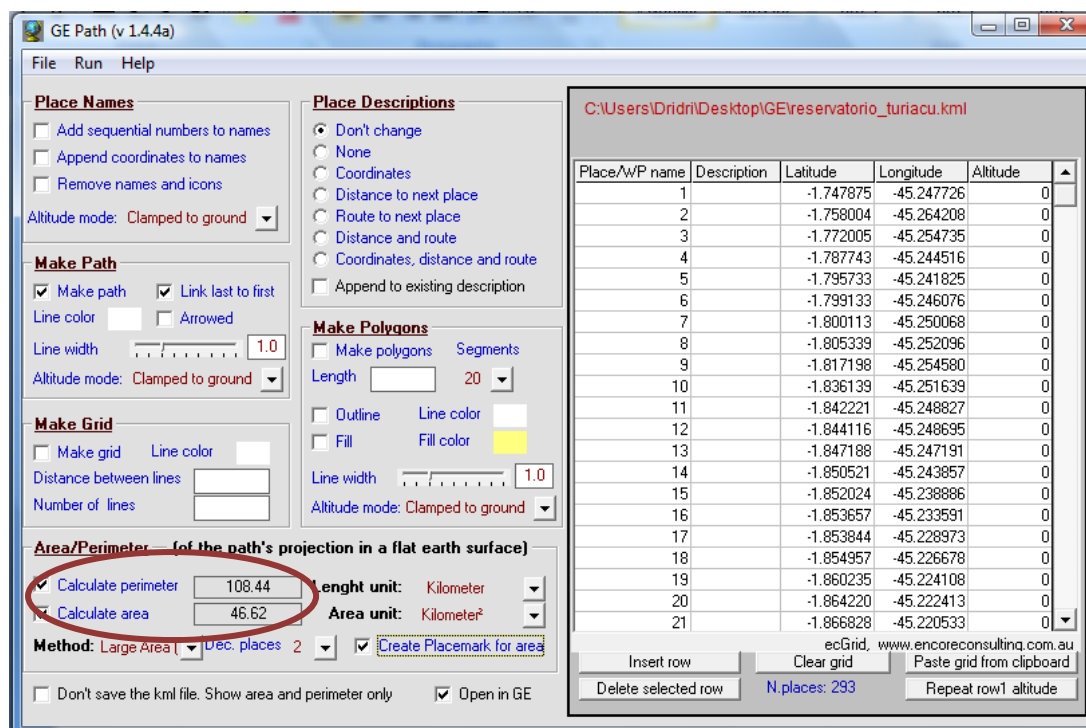


Figura 20. Interface do GE Path

Na Figura 20 extraída do GE Path, percebem-se os resultados obtidos:

Perímetro=108,44 km e Área=46,62 km²

h) Estimativa da amplitude

A Tabela 7 a seguir apresenta os dados da estação maregráfica “Turiaçu II” (FEMAR). A maré nesta região, assim como no Nordeste do país, é semi-diurna (periodicidade de cerca de 12,42 horas (meio dia lunar). A amplitude média das marés de sizígia é de 600 centímetros e de quadratura é de 318 centímetros. As amplitudes características da maré são resumidas nesta tabela. A localização da estação pode ser vista na figura 19, que delimita a área do reservatório. Nesta figura fica evidente a distância entre a estação e o reservatório.

Tabela 7. Estação Turiaçu II - Catálogo de estações maregráficas brasileiras (Femar)

FEMAR- FUNDAÇÃO DE ESTUDOS DO MAR		CATALOGO DE ESTAÇÕES MAREGRÁFICAS BRASILEIRAS	
Nome da estação:	Turiaçu II Maranhão		
Localização:	Foz do Rio São João		
Org responsável:	DHN		
Latitude:	01° 38,5' S	Longitude:	45° 21,3' W
Período Analisado:	02/03/1978 - 28/02/1979	Número de componentes:	62
Harmonica:	Método Almirante Santo Franco		
Classificação:	Maré Semidiurna		
Estabelecimento do porto (HWF & C):	VI H 49 min.	Nível médio (Zo):	365 acima do NR
Média das preamares de sizígia (MHWS):	665 cm acima do NR	Média das preamares de quadratura (MHWN):	524 cm acima do NR
Média das Baixas-mares de sizígia (MLWS):	65 cm acima do NR	Média das Baixas-mares de quadratura (MLWN):	206 cm acima do NR

Conforme explicitado na metodologia, consideramos a maré constante ao longo do reservatório similar aquela obtida pelos dados do mareógrafo, pois o afastamento de vinte e cinco quilômetros até a estação e a provável queda de profundidade, são compensadas pela redução da largura do rio no reservatório (420 metros em média no reservatório contra três quilômetros na região da estação).

i) Estimativa do volume útil

A primeira tentativa do grupo foi de adotar o primeiro método descrito na metodologia dado sua maior precisão. O banco de dados utilizados foi aquele fornecido pelo INPE. Os dados estão todos estruturados em quadrículas compatíveis com a articulação 1:250.000, apresentados em folhas de 1° de latitude por 1,5° de longitude.

A geração das curvas de nível embora extremamente trabalhosa foi realizada. Ao final desta geração os dados pareciam caóticos e tornou-se impossível identificar os contornos desejados. A Figura 21 mostra as curvas de nível, evidenciando a desorganização delas.

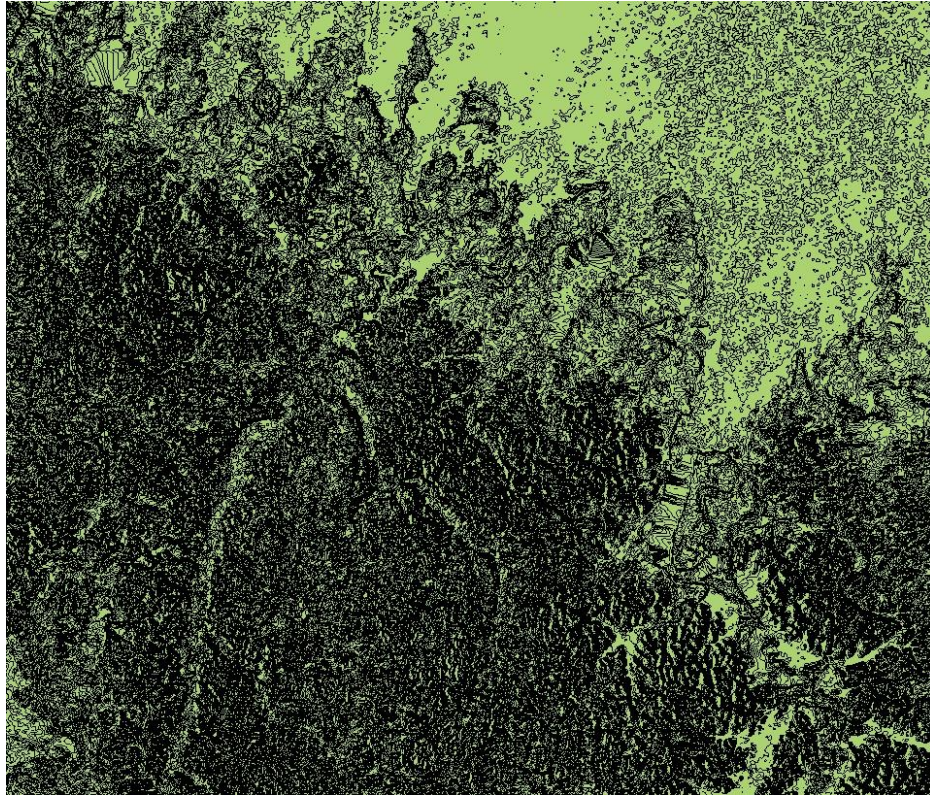


Figura 21. Curvas de nível geradas cada 2 metros, região do rio Turiaçu (AutoCAD)

Assim, foi escolhido o segundo método mais simples e didático e ainda sim apresentando a precisão necessária para este estudo.

As características do solo na região variam muito assim como as condições de resistência. A análise das margens resultou na adoção de uma declividade média de 30° para a região de estudo. Esta adoção nos parece próxima da realidade de rios com a mesma característica, conforme estudos realizados.

A declividade ao longo do rio foi considerada constante.

Assim, obtivemos:

$$V_{util_{sizigia}} = \Delta H_{sizigia} \cdot A_{res} = 6,00 \text{ m} \cdot 46,62 \text{ km}^2 = 279.72 \text{ M. m}^3$$

$$V_{util_{quadratura}} = \Delta H_{quadratura} \cdot A_{res} = 3,18 \text{ m} \cdot 46,62 \text{ km}^2 = 148.25 \text{ M. m}^3$$

Considerando que a curva senoidal representando a evolução do nível da maré ao longo do tempo seja perfeita, conclui-se que:

$$V_{util_{médio}} = \frac{V_{util_{sizigia}} + V_{util_{quadratura}}}{2} = 214,0 \text{ M. m}^3$$

Por indicação, a Tabela 8 compara o volume útil, a área e a amplitude média equivalente (volume útil dividido pela área), dos reservatórios de Turiaçu e de La Rance, referência mundial.

Tabela 8. Comparação dos reservatórios de Turiaçu com La Rance

Reservatórios	Turiaçu	La Rance
V _{útil} (M.m ³)	214	184
Área (km ²)	46,6	22,5
Amplitude média (m)	4,6	8,2

O volume útil é um pouco maior do que de La Rance, mas a amplitude média, ou seja, a altura da queda de água nas turbinas é quase igual à metade.

j) Estimativa da potência e outras grandezas básicas da usina

Seguindo o método proposto, temos:

$$E_{\text{potap}} = 0,41 \cdot A_m^2 \cdot A_{\text{res}} \cdot 10^6 \text{ [kWh/ano]}$$

Onde:

ΔH é a amplitude da maré média dada em metros e
 A_{res} é a área da bacia (estuário do rio) dada em km²

Porém tem-se que: $A_m = \frac{\Delta H_{\text{sizigia}} + \Delta H_{\text{quadratura}}}{2} = 4,6 \text{ m}$ e $A_{\text{res}} = 46,6 \text{ km}^2$

Resulta que $E_{\text{pot}} = 402,7 \text{ GW/ano}$

$$E_{\text{potusina}} = \varphi \cdot E_{\text{potap}} = 120,8 \text{ GW/ano}$$

A **descarga máxima** $Q_{\text{máx}}$ e a **queda máxima** $H_{\text{máx}}$ da usina serão:

$$Q_{\text{máx}} = 35,6 \cdot A_m \cdot A_{\text{res}} = 7,6 \cdot 10^3 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$H_{\text{máx}} = 0,62 \cdot A_m = 2,85 \text{ m}$$

Admitindo um rendimento $\eta = 0,75$, a **potência instalada** da usina é dada pela fórmula:

$$P = \frac{1.000 \cdot \eta \cdot Q_{\text{máx}} \cdot H_{\text{máx}}}{75} = 88,9 \times 10^3 \text{ CV}$$

Ou seja:

$$P = \frac{7,36 \cdot N_{ev}}{10} = 65,4 \text{ MW}$$

A **potência máxima instalada** é dada por:

$$P_{inst} = 210 \cdot A_m^2 \cdot S = 206,3 \text{ MW}$$

A **máxima potência fornecida** pela usina no curso de um ciclo, no momento em que a amplitude máxima se verifica, é:

$$P_{disp.} = \frac{N_{inst.}}{1,23^2} = 136,3 \text{ MW}$$

Cabe ressaltar que a **potência mínima correspondente à queda inicial** é dada por:

$$P_{mín.inic.} = 126 \cdot A_m^2 \cdot A_{res} = 123,8 \text{ MW}$$

k) Número de horas de funcionamento anual

Temos uma produção anual de energia igual à E_{pot} . A usina funcionará anualmente durante um número de horas h , dado por:

$$hf = \frac{E_{pot}}{N_{kW}} = 6.156 \text{ horas por ano.}$$

O **fator de utilização** da capacidade instalada é:

$$\phi = \frac{hf}{8.760 \text{ horas anuais}} = 70\%$$

De acordo com a metodologia proposta no item 3.2.5, foram obtidos os seguintes dados, explicitados aqui para que possamos correlacioná-los com os dados que se seguirão:

Tabela 9. Quadro resumo dos resultados

Resultados obtidos para geração	
Área do reservatório	46,62 km ²
Perímetro	108,44 km
Estimativa da amplitude	4,59 m
Estimativa do volume útil (sizígia)	279,72 Mm ³
Estimativa do volume útil (quadratura)	148,25 Mm ³
Volume útil médio	214,0 Mm ³
Potência Anual	120,8 GW/ano
Vazão máxima	7,6 x 10 ³ m ³ /s
Potência Instalada P _{cv}	88,9 x 10 ³ cv
Potência Instalada P _{MW}	65,4 MW
Potência máxima instalada	206,3 MW
Potência disponível	136,3 MW
Potência correspondente a queda inicial	123,8 MW
Número de horas de funcionamento anual	6.156 horas/ ano
Fator de utilização	70%

As diferentes potências aqui relacionadas têm diferentes significados.

A potência efetivamente gerada e que, portanto consideraremos como a potência da usina é a chamada potência instalada, que atinge aqui o valor de 65, 4MW.

A potência máxima instalada refere-se aquela que poderia ser gerada com aproveitamento total das turbinas, com o máximo número de turbinas possível instaladas, com total eficiência, sem seus desgastes que começam a acontecer a partir do momento em que se inicia seu funcionamento. Para cálculo desta potência, utiliza-se o valor máximo de amplitude de maré.

A potência de queda inicial é aquela gerada com a máxima altura de queda, neste caso quando há a maior amplitude de maré.

Especificação dos equipamentos

A potência para as turbinas de eixo vertical Kaplan pode ser calculada da seguinte forma:

$$P = \rho g Q A_m \eta$$

Onde: N é a potência útil (Watts)

ρ é a massa específica da água salgada (1025 kg/m³)

Q é a vazão (m³/s)

A_m é a amplitude média da maré (em metros)

η é o rendimento da turbina

g é a aceleração da gravidade

$Q = 7617,89 \text{ m}^3/\text{s}$
$A_m = 4,6 \text{ m}$
$P_{cv} = 88883,92 \text{ cv}$
$P_{kw} = 65,42 \text{ MW}$

Considerando 10 turbinas em operação, temos:

$Q = 761,78 \text{ m}^3/\text{s}$
$A_m = 4,6 \text{ m}$
$P_{cv} = 8888,392 \text{ cv}$
$P_{kw} = 6,54 \text{ MW}$

Segundo Macintyre (1983) podemos estimar o rendimento como:

Tabela 10. Tabela de rendimento de acordo com a potência (Fonte: Macintyre)

$P \text{ [cv]}$	<100	$100-1.000$	$1.000-50.000$	>50.000
$\eta(\%)$	$85-87$	$88-90$	$91-92$	$93-94$

Segundo os dados estimados, temos:

$$\eta = 0,91 = 91\%$$

Assim sendo, para cada turbina, a potência gerada será

$$P = 8.088 \text{ cv} = 5,9 \text{ MW}$$

Temos, portanto o quadro final relacionando as potências finais, depois da introdução do coeficiente de rendimento:

Resultados obtidos para geração	
Potência Anual	109,9 GW/ano
Potência Instalada P_{cv}	$80,9 \times 10^3 \text{ cv}$
Potência Instalada P_{MW}	59,5 MW
Potência máxima instalada	187,7 MW
Potência disponível	124 MW
Potência correspondente a queda Inicial	112,65 MW

As dimensões do rotor (calculadas segundo Macintyre) são dadas abaixo e o cálculo no anexo II.

Tabela 11. Quadro resumo do dimensionamento do rotor

Grandeza	Símbolo	Valor	Unidade
Velocidade Específica	$n_s =$	914,6	rpm
Número de pás	$Z =$	4	pás
Diâmetro externo do rotor (variando entre D_1 e D_1')	$D_1 =$	9,44	M
	$D_1' =$	10,82	m
Diâmetro do cubo central	$d_1 =$	4,54	m
Seção livre de passagem de água	$S_p =$	75,72	m ²
Velocidade Meridiana	$V_m =$	10,06	m/s
Passo entre as pás	$t =$	6,03	m
Comprimento das pás	$l =$	4,99	m
Velocidade periférica média	$u =$	49,42	m/s
Rendimento Hidráulico	$\varepsilon =$	96%	
Componente periférico da velocidade absoluta	$V_{u_1} =$	0,87	m/s
Ângulo β_1	$\beta_1 =$	12	Graus
Ângulo β_2	$\beta_2 =$	11,5	Graus
Ângulo β_3	$\beta_3 =$	11,6	Graus
Velocidade relativa	$W =$	50,01	m/s
Velocidade periférica para queda de 1 metro	$u_1 =$	23,07	m/s
Velocidade relativa para queda de 1 metro	$W_1 =$	7,32	m/s
Coeficiente de portança	$C_a =$	0,178	
Coeficiente de portança corrigido	$C_a' =$	0,154	
Ângulo de ataque	$\alpha_1 =$	-3,1	Graus
Ângulo do perfil	$\beta_p =$	14,7	Graus

4.2.5 Arranjo construtivo

O projeto e construção de uma barragem para uma usina marémotriz são semelhantes aos de uma usina hidrelétrica de baixa queda. Os principais elementos do sistema são a tomada d'água, o vertedouro, o corpo da barragem e a casa de força. A seguir trataremos individualmente de cada um desses elementos.

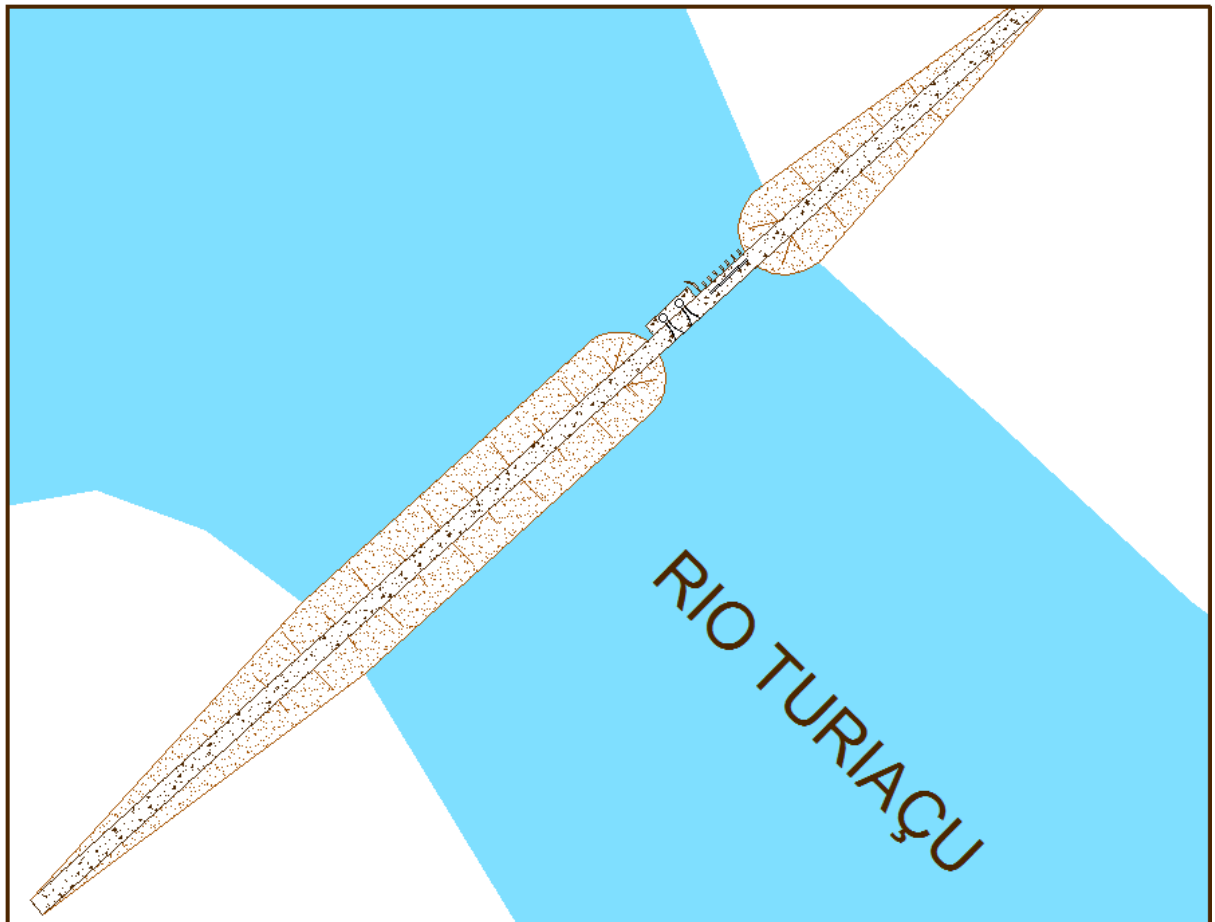


Figura 22: Arranjo construtivo da barragem proposta

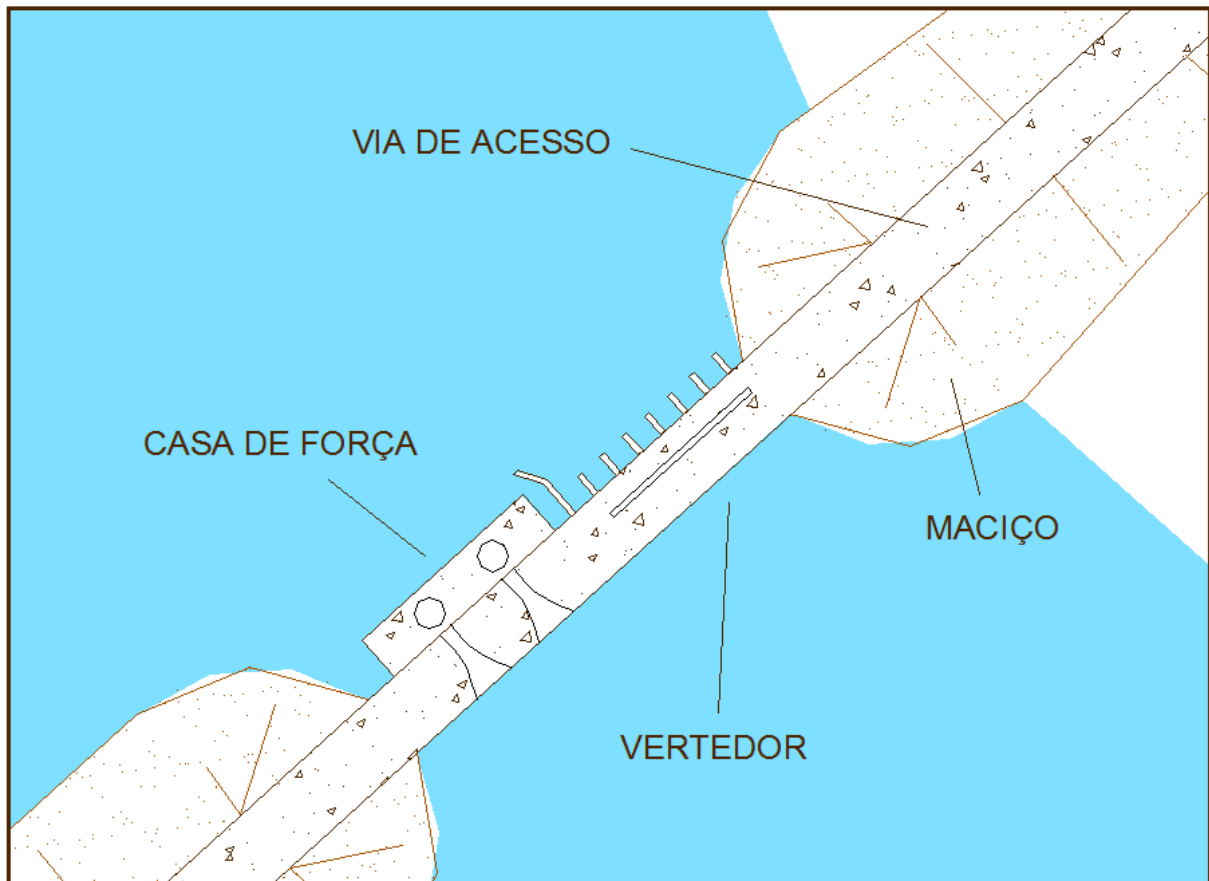


Figura 23: Detalhe das edificações da barragem.

Corpo da barragem:

Existem várias técnicas de construção dos maciços de uma barragem. A mais utilizada são as barragens de terra, por ser uma técnica tradicional e geralmente de menor custo. Essa foi a opção para a construção da barragem no Turiaçu, já que há abundância de argila na região.

O principal parâmetro do corpo da barragem é sua altura, que deve levar em conta o nível d'água máximo do reservatório

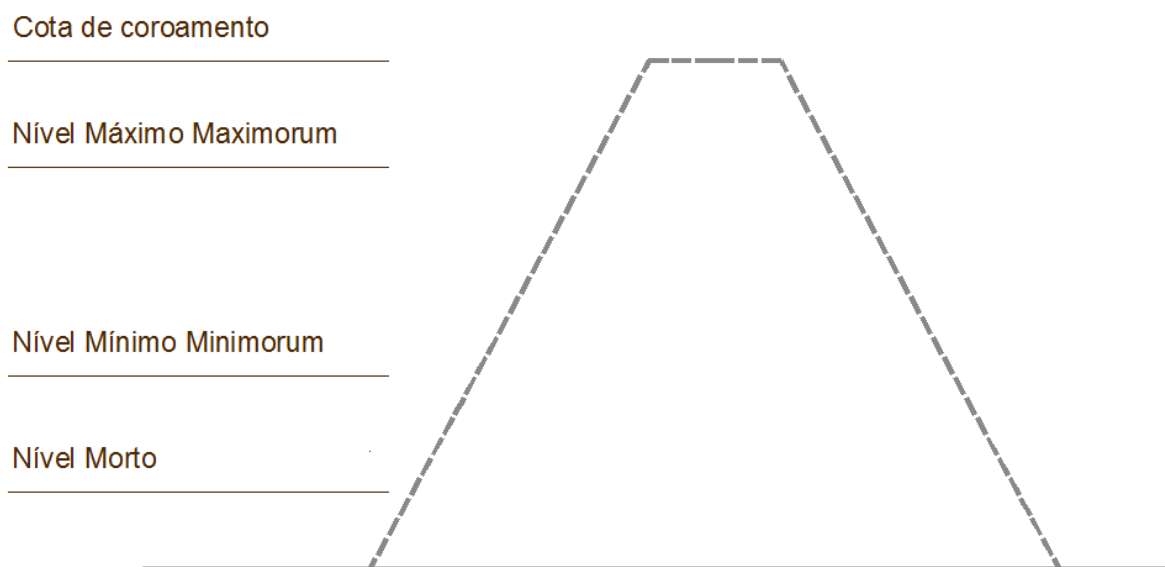


Figura 24: cotas relevantes da barragem

O Nível morto é o volume reservado para a acumulação de sedimentos ao longo da vida útil da barragem. Para sua obtenção devem se realizar estudos sobre as características pedológicas e sua ocupação. Também devem ser tomadas amostras no corpo d'água para determinar a concentração de sólidos em suspensão e sua granulometria, de modo a prever se serão sedimentados com a diminuição da velocidade do rio após a implantação da barragem.

O nível mínimo minimorum é o nível mínimo para o acionamento das turbinas, deve ficar acima da cota superior da tomada d'água e de modo a garantir uma submersão mínima desta, para evitar a formação de vórtices que podem comprometer o funcionamento do sistema. Para um pré-dimensionamento, pode-se adotar uma submersão mínima de 1 metro.

O nível máximo maximorum é o limite para o nível d'água, que não deve ser ultrapassado, devendo ser calculado para a maior amplitude de maré de projeto. Para a baía do Turiaçu não existem dados batimétricos precisos que permitam determinar a profundidade do canal no local onde será implantada a usina, no entanto, baseado em dados mais precisos em posições próximas a entrada da baía, estimamos que tal valor seja próximo a 12 metros. Assim para, para uma maré de sizígia de +3 metros, o nível máximo maximorum se situará próximo a 15 metros.

A cota de coroamento é a altura última, resultante da soma do nível máximo maximorum com uma borda livre, que existe para acomodação das flutuações de nível devido a ondas e efeitos meteorológicos. O valor comumente adotado para a borda livre é de 10% da altura da barragem, aproximadamente 1,5 metro.

Vertedor:

O vertedor deve permitir a passagem da água em ambos os sentidos, tanto para encher a represa na maré alta, quanto para permitir a descarga da água excedente em caso de cheia do rio. Assim, o vertedor deve ser dimensionado tanto para a vazão de projeto do Turiaçu, quanto para a vazão devida à amplitude de maré de projeto.

Para uma usina de simples efeito o reservatório tem seu nível elevado juntamente com a maré alta. O tempo em que ocorre tal elevação equivale a um meio período da maré, que é de 12,42 horas, assim, o enchimento do reservatório se dará em aproximadamente 3,10 horas (T). Conhecendo-se o volume acumulado no reservatório, torna-se possível calcular as vazões que deverão passar pelas comportas.

A vazão média será dada pela razão do volume que adentra o reservatório pelo tempo que isso leva:

$$Q_m = \frac{A_{ms} * A_{res}}{T} = \frac{3 * 46,6 * 10^6}{3,10 * 3600} = 12.944 \text{ m}^3/\text{s}$$

Onde: Q_m é a vazão média (m^3/s);

A_{ms} é a semi-amplitude máxima de maré;

A_{res} é a área do reservatório [km^2]

Foi escolhido um vertedor de fundo com comportas verticais, já que deverá operar em ambos os sentidos. A largura do vertedor pode ser calculada através da equação:

$$L = \frac{Q_m}{k \cdot \mu \cdot a \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H_m}} = \frac{12.944}{0,5 * 0,6 * 10 * \sqrt{2 * 9,81 * 12}} = 308 \text{ m}$$

Onde: Q_m é a vazão média (m^3/s);

k é o fator de correção para descarga submersa, para a operação da barragem é igual a 0,5;

μ é o coeficiente de contração, que pode ser adotado como 0,6;

a é a altura do vertedor, imposta como 10 metros;

H_m é a carga média a montante do vertedor (nível do mar), estimada;

L é a largura do vertedor (metros)

Para calcular a vazão de projeto do rio é necessário utilizar séries estatísticas com medições diárias. Infelizmente, não existem tais dados para as proximidades de onde será construída a barragem. A Agência Nacional de Águas – ANA disponibiliza uma série de 38 anos de medições no Turiaçu– de 1972 a 2010, no entanto o posto de medição fica muito distante do local escolhido para a barragem, aproximadamente 300 quilômetros, não podendo seus dados ser correlacionados com as vazões no local escolhido sem uma ampla coleta de dados na bacia hidrográfica, como características.

Outro dado disponibilizado pela ANA é a vazão média do Turiaçu, que é de 470 m³/s. Embora não seja possível obter a vazão para grandes períodos de retorno, é razoável supor que para tal valor médio, as máximas vazões ainda serão inferiores às vazões devido ao enchimento do reservatório, de quase 13.000 m³/s. Assim, se o vertedor é capaz de atender a esta, atenderá também àquela.

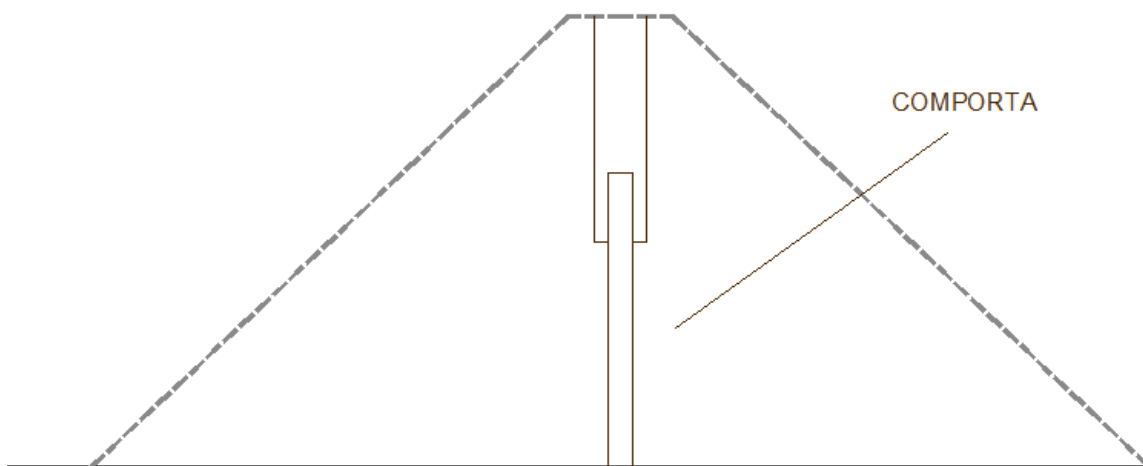


Figura 25: Esquema do vertedor

Casa de Força

A casa de força é onde são instaladas as turbinas e geradores. Como já discutido na metodologia, utilizaremos turbinas tipo Kaplan. Estas turbinas possuem eixo vertical e a potência gerada é proporcional ao quadrado do diâmetro. Assim é preferível utilizar turbinas de grande diâmetro, desde que o reservatório garanta carga e vazão suficientes para mover a turbina. É necessário também instalar comportas na tomada d'água das turbinas, já que durante a vazante da maré as turbinas devem ficar inoperantes até que se atinja o desnível necessário.

A casa de força pode ser enterrada no maciço da barragem, tal configuração é interessante sobretudo em estruturas de grande altura, já que seria mais custoso fazer uma estrutura de concreto da mesma altura dos diques. No caso de uma usina marémotriz, as barragens geralmente não apresentam grandes alturas, sendo este o

nosso caso, assim a casa de força será construída na mesma altura dos diques, servindo também como barreira do reservatório.

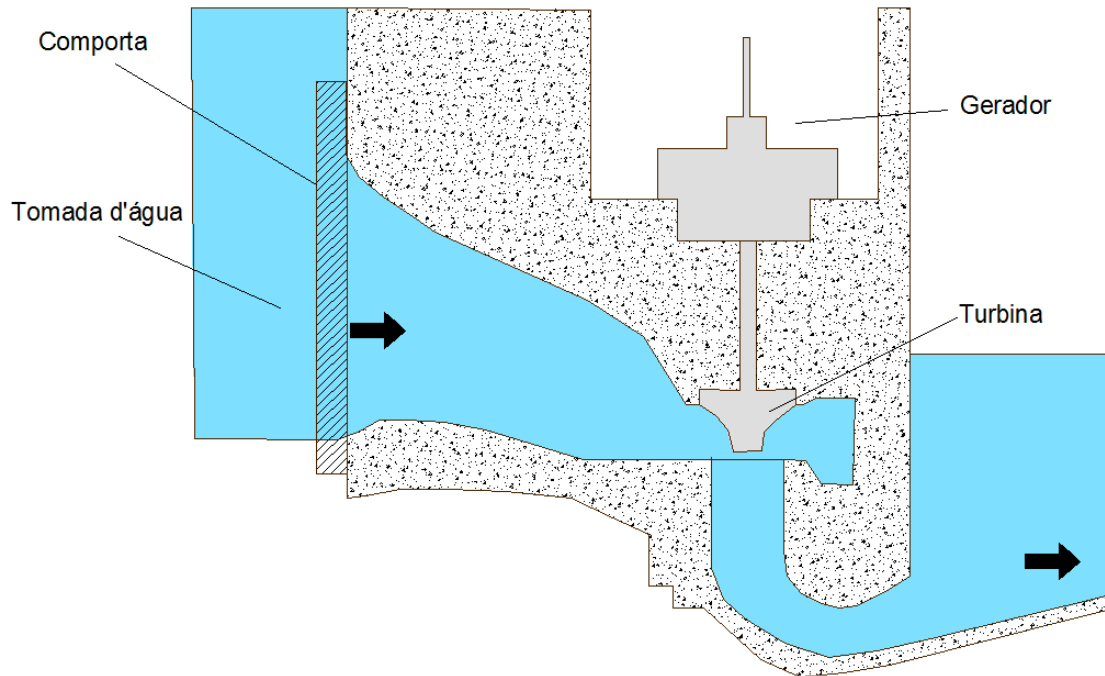


Figura 26: Esquema do corte transversal da casa de força.

Método Construtivo

As principais técnicas de construção de barragens são com o uso de ensecadeiras e com estruturas pré-moldadas, que são transportadas e posicionadas no leito do rio por meio de embarcações. Esta última técnica apresenta diversas vantagens, já que as obras podem ser realizadas em local seco, com melhores condições de terreno e acesso. Também pode significar redução de custos, já que a construção das ensecadeiras pode chegar a 30% do custo da barragem. O uso de ensecadeiras é o método tradicional e mais utilizado, consiste em construir diques de menor dimensão, de modo a expor o leito do rio e permitir a entrada de máquinas e operários.



Figura 27: Construção da usina de La Rance com utilização de ensecadeiras (Eletricit  de France).

Para o Rio Turiaçu, optamos pela construção de ensecadeiras, que é a técnica mais utilizada no Brasil e com tecnologia já conhecida dos técnicos nacionais. Além disso, o rio é fortemente sazonal e as baixas vazões da época de seca dificultariam a moviment  o de embarcações devido à baixa profundidade.

A construção ocorrerá em duas etapas. Primeiro será construída a ensecadeira, feita a partir da margem por meio de aterro de ponta. Com o leito seco, serão construídas as edificações da barragem (casa de fôrça e vertedor). A partir da outra margem do rio, será construído dique da barragem, feito de maneira similar a ensecadeira, porém com critérios mais rigorosos de cálculo e construção, por tratar-se de obra permanente.

O cronograma de construção deve ser feito em função do ciclo hidrológico da região. Na figura 28 é mostrado o gráfico com as vazões m dias do Turiaçu no ano de 2009. Embora estes dados não sejam do local da barragem, pode-se aceitar que o ciclo hidrológico se mant m ao longo do rio, já que não há variação significativa das condições climáticas na bacia.

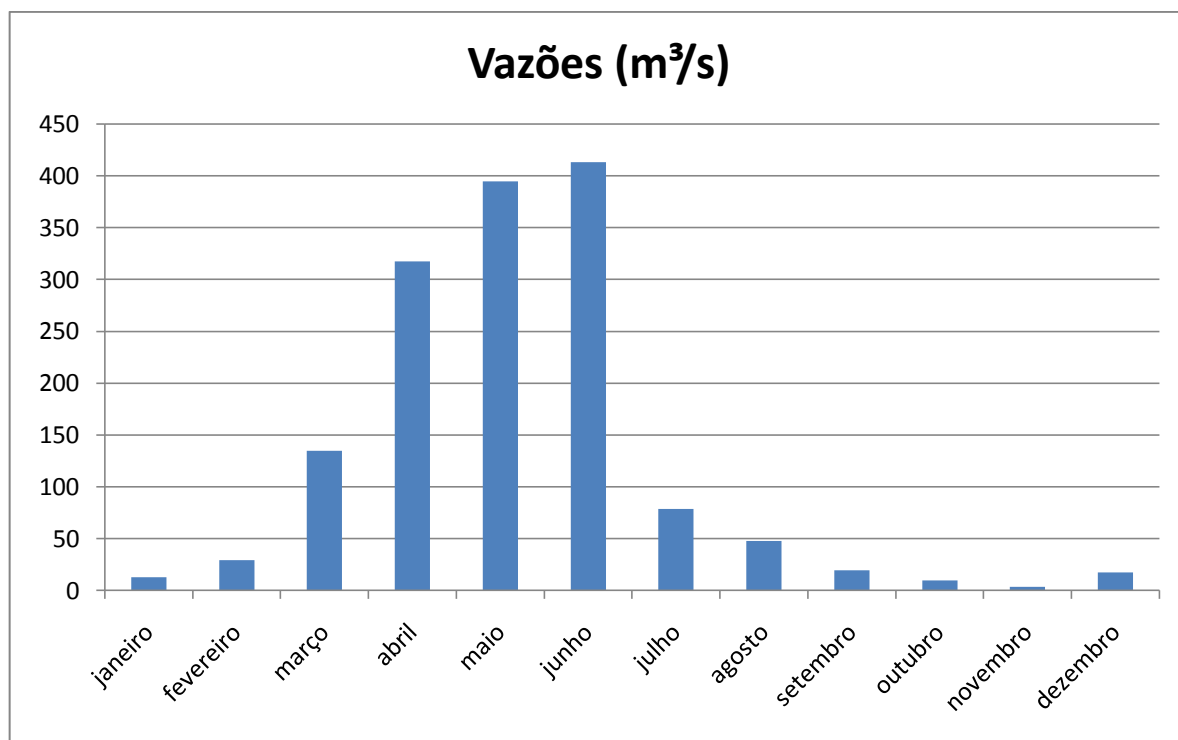


Figura 28: Gráfico com vazões mensais para o ano de 2009 no rio Turiaçu

Nota-se que a estação seca vai de setembro a fevereiro. Esta janela hidrológica deve ser aproveitada para a construção das ensecadeiras, de modo a facilitar os trabalhos de movimentação de terra.

Com as ensecadeiras prontas dá-se início a construção da casa de força e do vertedor no leito seco. Terminada estas obras pode-se iniciar a construção do dique a partir da outra margem, na estação seca seguinte.

Um problema na construção com ensecadeiras é que conforme se constrói o dique o canal fica cada vez mais obstruído, aumentando a velocidade da água na abertura restante. Esse problema pode ser resolvido deixando-se as comportas do vertedor, que já foi construído, abertas até o término dos trabalhos.

4.2.6 Análise de impactos ambientais

1. Breve descrição do empreendimento.

O empreendimento trata-se de uma usina marémotriz, ou seja, uma usina que gera energia a partir dos desníveis criados pela oscilação das marés. O empreendimento compreende fisicamente a implantação de um reservatório através da construção de uma barragem do Rio Turiaçu. A barragem terá sua estrutura em terra e casa de força em concreto. O rio terá seu extravasamento assegurado pelo controle de comportas, além das comportas de fundo que controlam a entrada de água para enchimento do reservatório.

2. Breve descrição das alternativas que serão avaliadas.

Em nosso trabalho, estamos ainda em fase de estudo de viabilidade. Este estudo deverá ser aprofundado para determinação exata da posição do eixo da barragem. Este aprofundamento pode vir a nos dar uma série de alternativas para a localização do eixo e estas alternativas serão então analisadas para determinar aquela mais interessante. No momento, portanto temos apenas duas alternativas que devem ser analisadas. Será analisada aqui então a alternativa de não implantação da usina, chamada de alternativa zero e de implantação com a barragem localizada na posição determinada de forma preliminar.

3. Localização e características ambientais básicas da área.

Localizado à noroeste de São Luís a uma distância de 152 quilômetros da capital, no Estado do Maranhão, Turiaçu é um município que tem uma população de 33.649 habitantes (IBGE – 2009) distribuídos em uma área de 2.578 km². Tem Índice de Desenvolvimento Humano de 0,567 segundo apontamentos do PNUD (2000).

A bacia do Turiaçu como um todo (caracterizada na figura 29) tem clima típico litorâneo e temperatura média anual de 27°C e esta incluída na área de proteção ambiental das reentrâncias maranhenses (figura 30) compreendendo uma área de 900 km² e 700 km de extensão. A precipitação média anual na bacia esta entre 2.000mm nas proximidades do litoral e segue diminuindo conforme o rio entra no continente como pode ser visto na figura 31. A bacia tem meses mais úmidos entre fevereiro e julho mais secos entre setembro e novembro. A umidade relativa do ar em toda a bacia supera os 82% (figura 32).

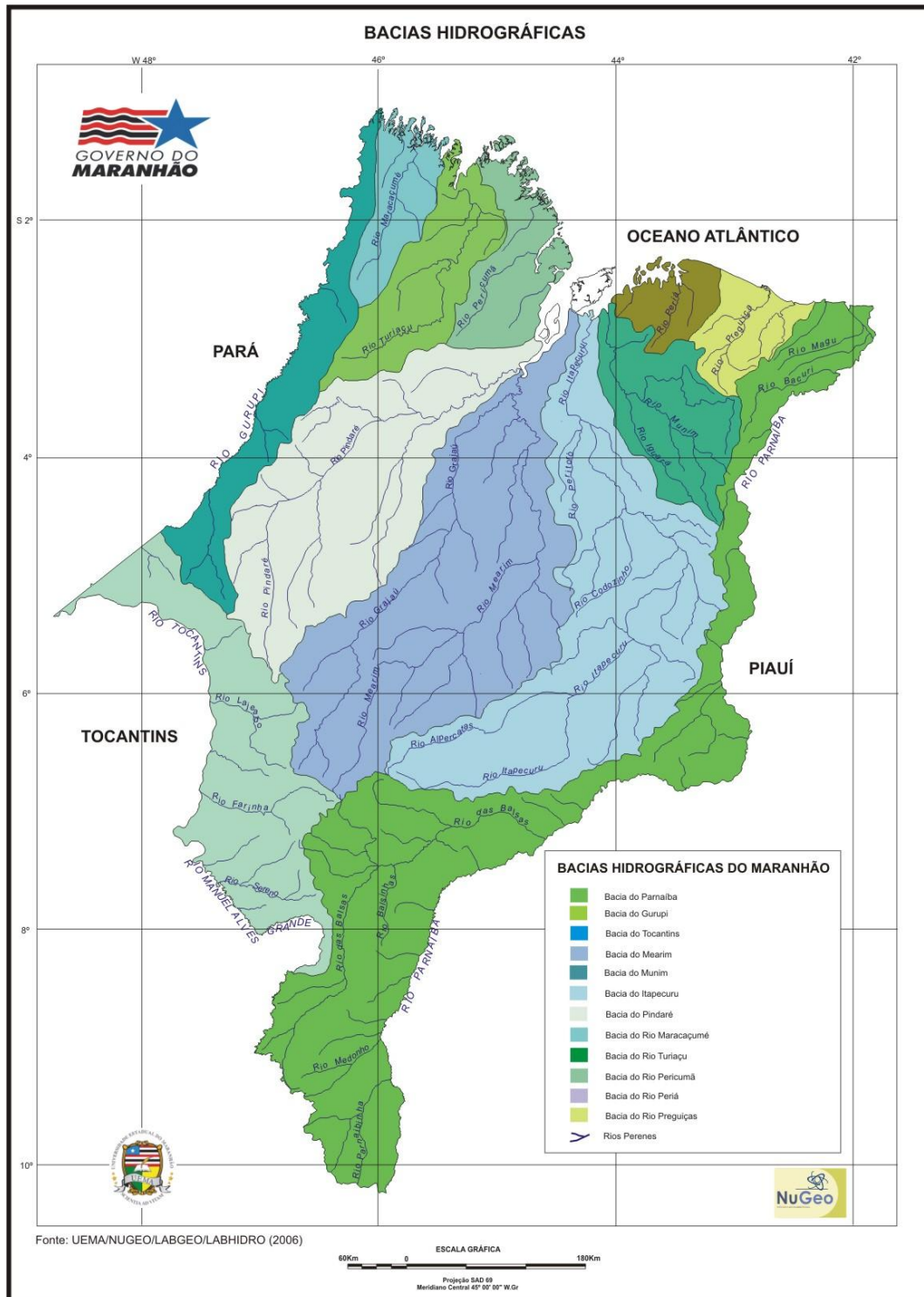


Figura 29. Mapa das bacias do Maranhão. – Fonte: PPGT (programa de planejamento e gestão territorial- www.ppgt.ma.gov.br)

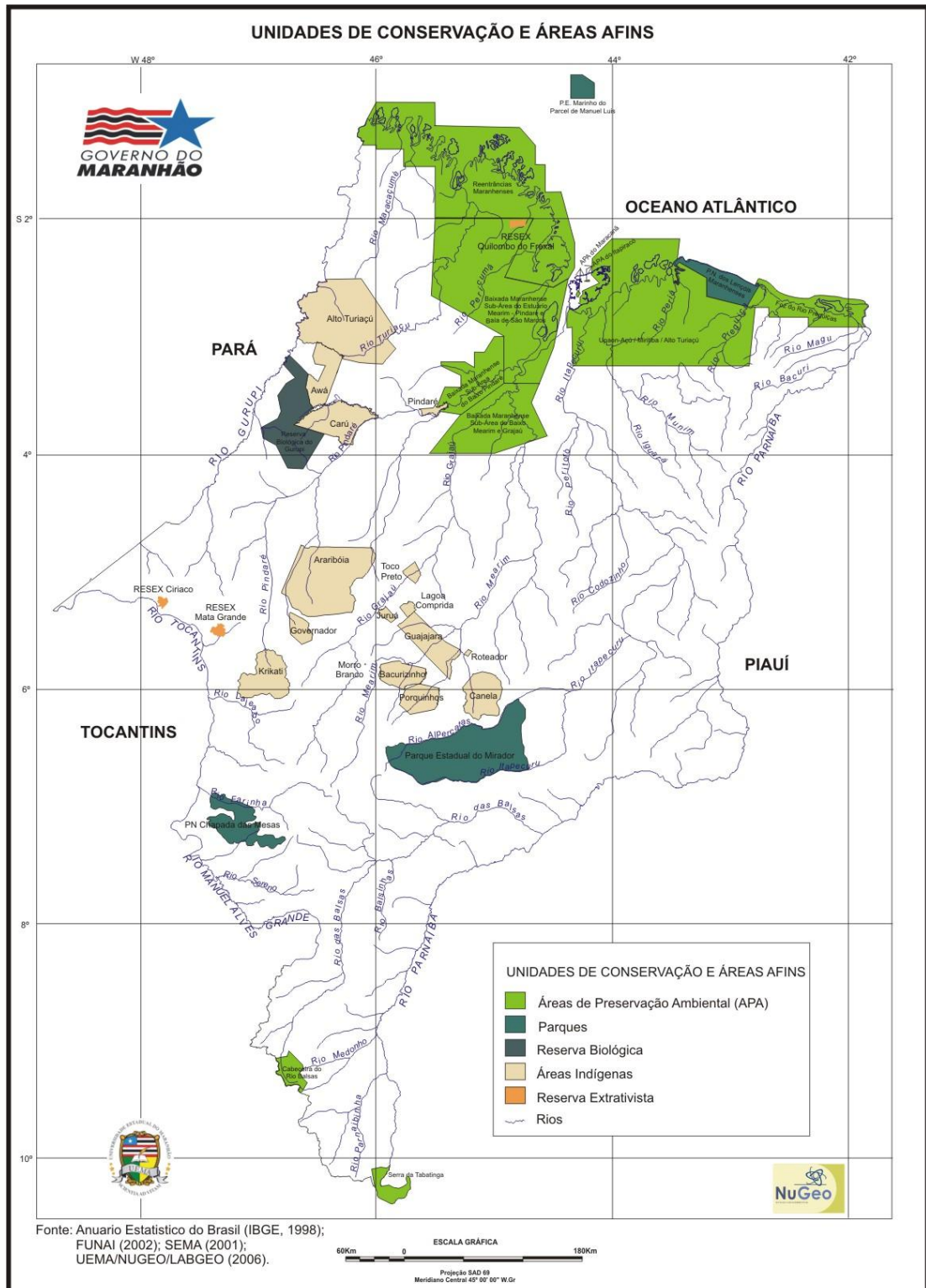


Figura 30. Unidades de conservação e proteção ambiental – Fonte: PPGT (programa de planejamento e gestão territorial- www.ppgt.ma.gov.br)

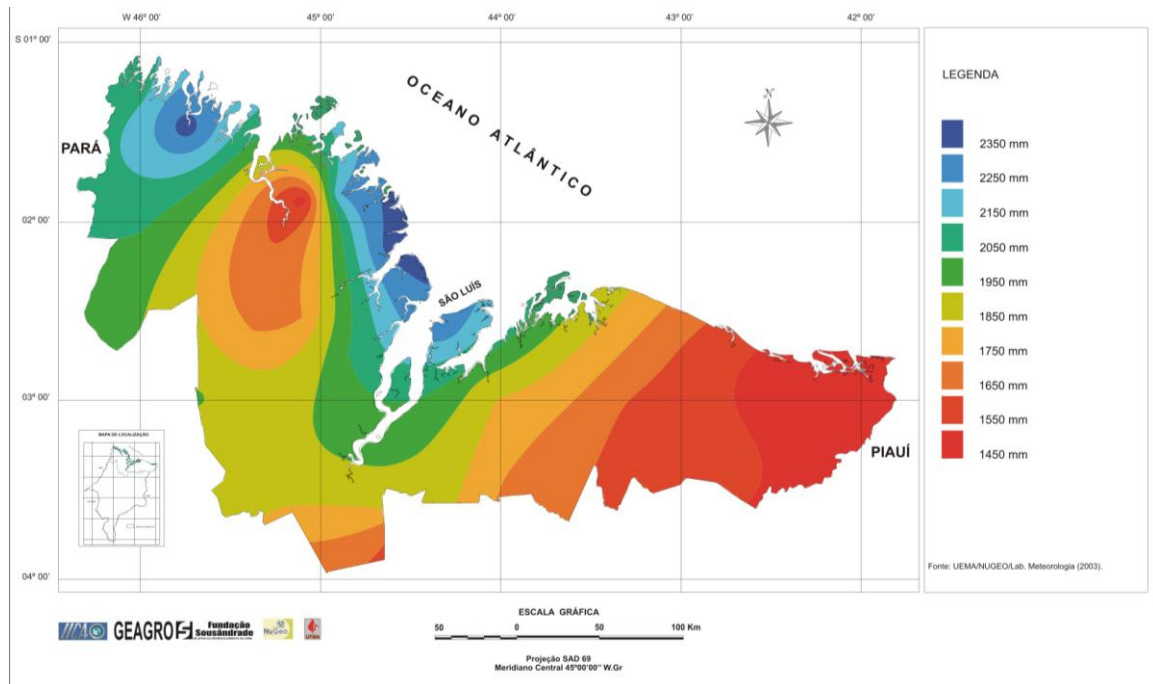


Figura 31. Precipitação média anual da zona costeira do Maranhão – Fonte: PPGT (programa de planejamento e gestão territorial- www.ppgt.ma.gov.br)

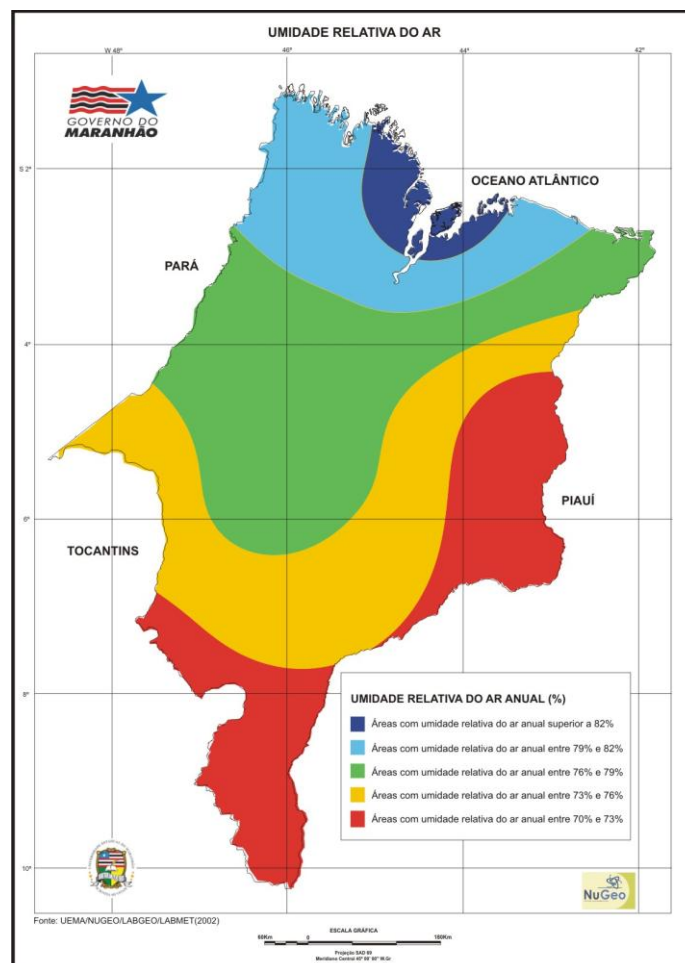


Figura 32. Umidade relativa do ar no Maranhão. – Fonte: PPGT (programa de planejamento e gestão territorial- www.ppgt.ma.gov.br)

O mapa de uso e cobertura vegetal na zona costeira nos mostra que as adjacências são áreas inundáveis (figura 33) enquanto o mapa de solos mostra a presença marcante de manguezais (figura 34).

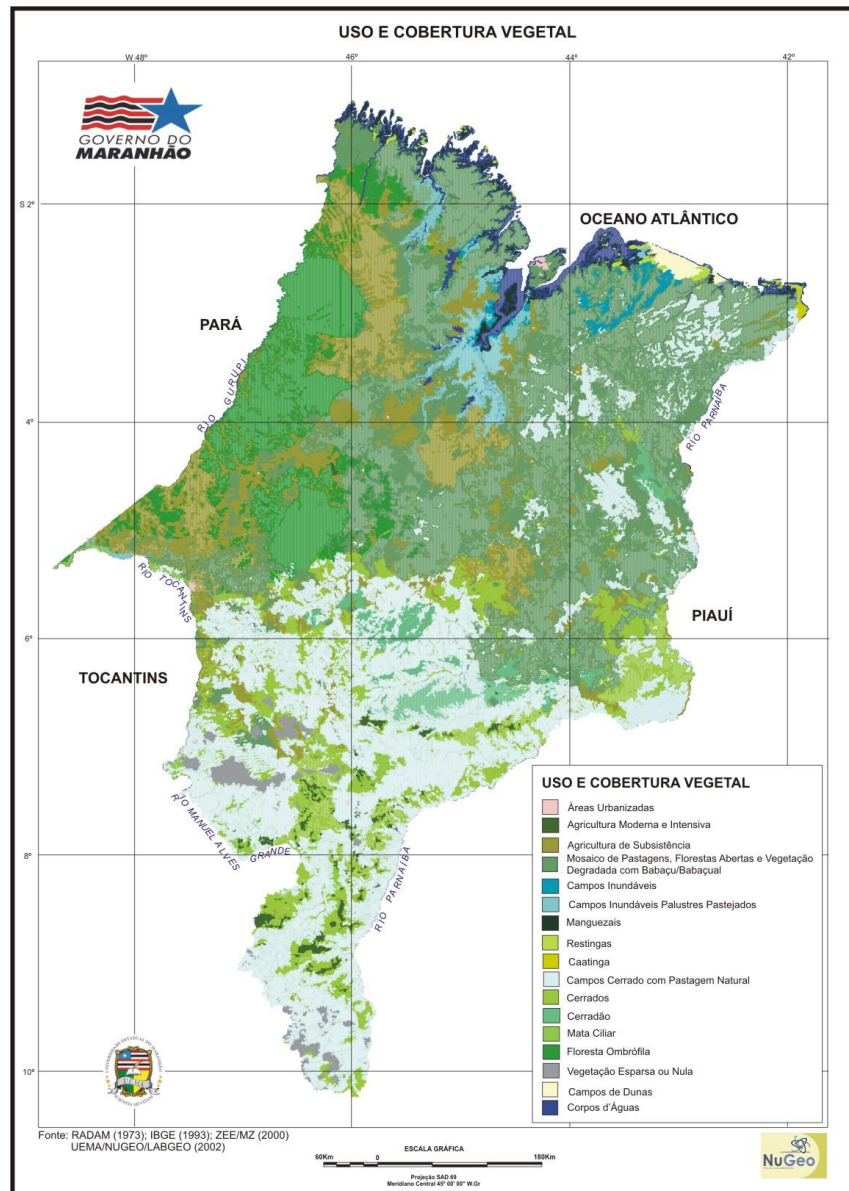


Figura 33. Uso e cobertura vegetal demonstrando a presença de áreas inundáveis no entorno da bacia do Turiaçu – Fonte: PPGT (programa de planejamento e gestão territorial- www.ppgt.ma.gov.br)

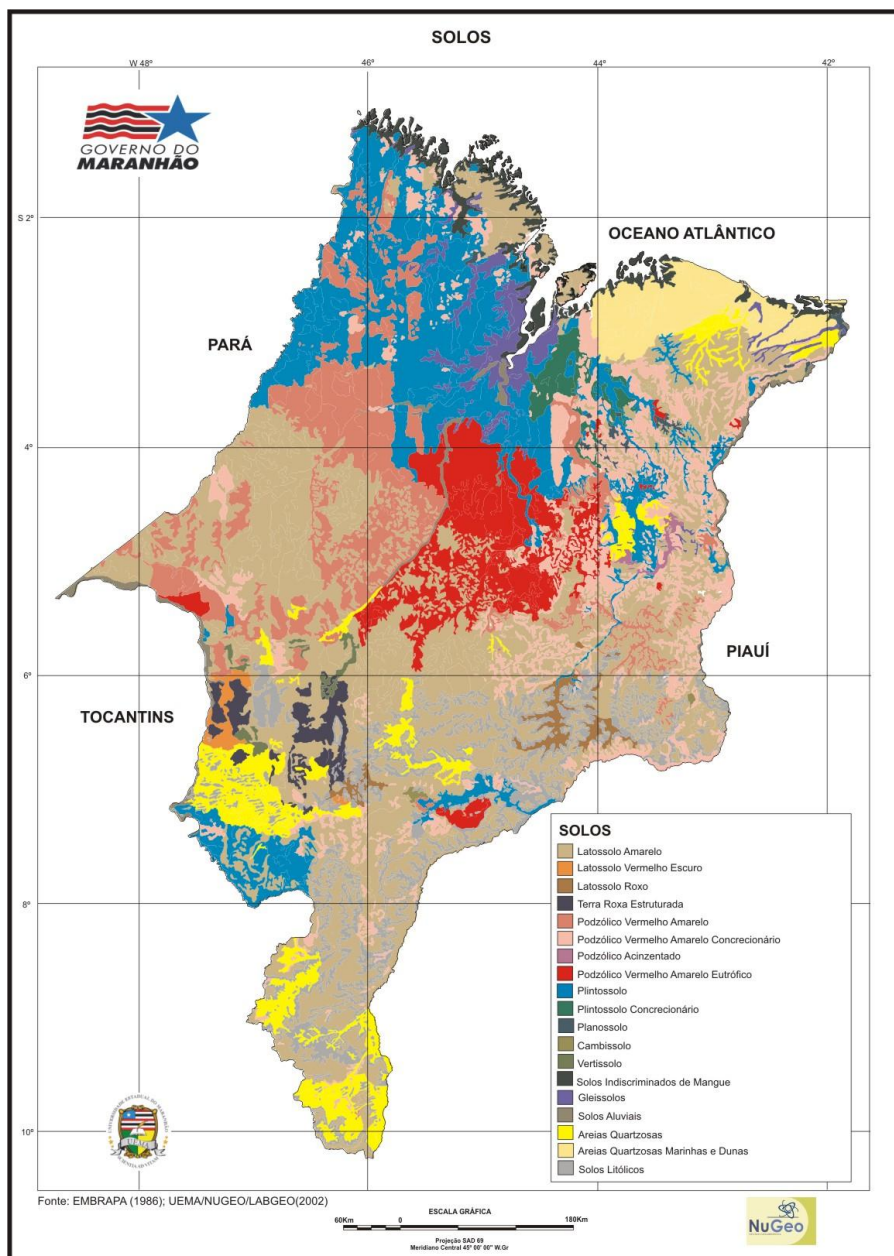


Figura 34. Mapa de solos acusando a presença de manguezais na área da bacia do Turiiaçu. – Fonte: PPGT (programa de planejamento e gestão territorial- www.ppgt.ma.gov.br)

O local específico da implantação da barragem pode ser visto nas figuras que seguem. O local foi definido segundo aspectos técnicos de projeto e, como já foi dito, estes mesmos aspectos técnicos podem vir a alterar a localização, todas, porém dentro da área que é objeto de estudo desta análise de impactos ambientais.

A barragem é certamente o elemento construtivo mais importante da usina pois será aquele que irá gerar o maior impacto na região. Os demais impactos serão gerados pelo alagamento da área de reservatório, que será a área que já inunda atualmente, uma vez que uma usina marémotriz não aumenta a cota do rio, e os impactos que serão gerados pela operação da usina.

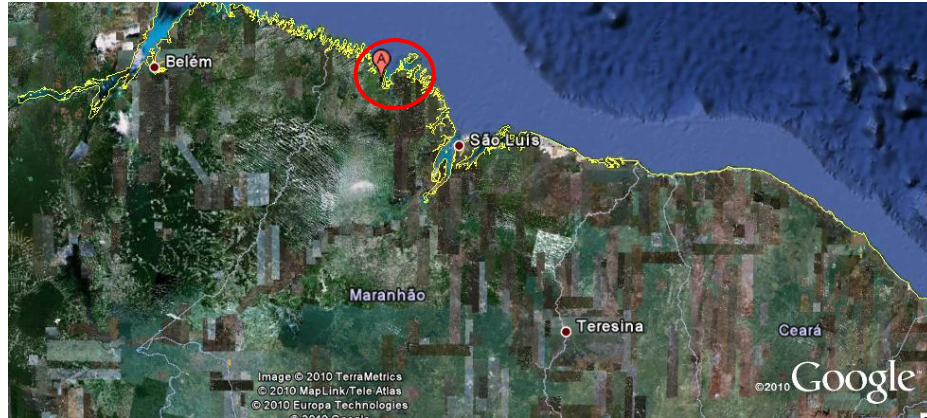


Figura 35. Localização de Turiaçu no estado do Maranhão – fonte Google maps.

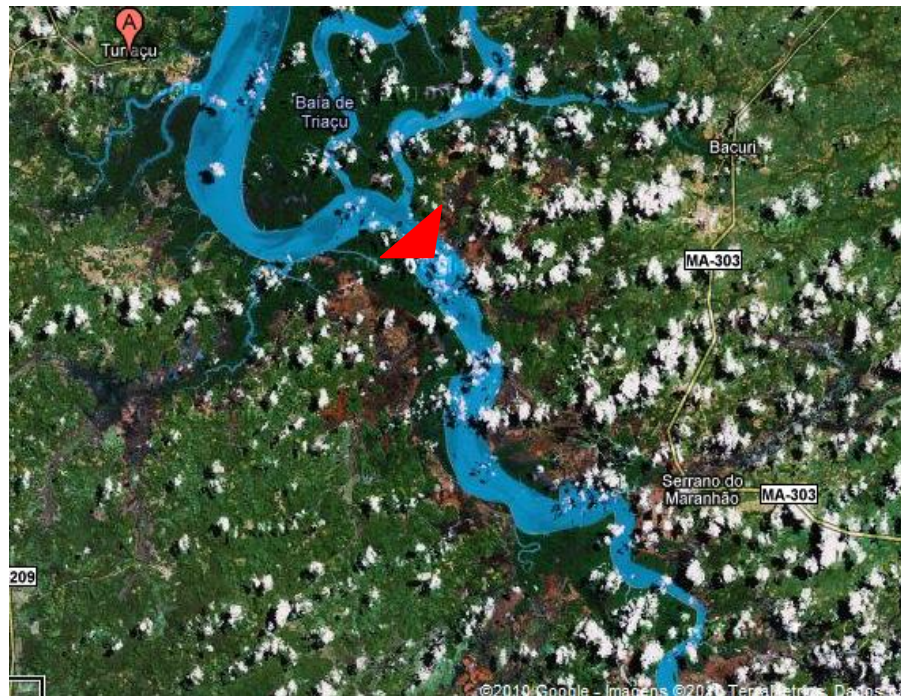


Figura 36. Eixo de implantação da barragem (alternativa 1) – Fonte: Google Earth

4. Delimitação da área de estudo.

A área de estudo deve abranger toda a região onde serão colhidos dados que irão montar o Estudo de Impacto Ambiental (EIA). Esta área é, portanto, significativamente menor que a área de influência do empreendimento. Isso ocorre porque muitas cidades além da bacia podem ser afetadas pela geração de emprego, migração dos trabalhadores e suas famílias, movimentação monetária, etc.

Segue na figura, portanto a área escolhida de forma preliminar como área de estudo. Estabelecemos aqui como preliminar pelo fato de que, uma vez em campo para a coleta de dados, entrando em contato com a população, podemos descobrir uma série de dados que podem impactar diretamente o

empreendimento e que estão em uma área diferente daquela planejada inicialmente.

Definimos de forma inicial a área de estudo como sendo aquela que engloba a bacia de Turiaçu e seus limites. É a chamada Bacia Conjugada do Rio Turiaçu e assim determinada pelo IBGE (VII-2) na figura abaixo:

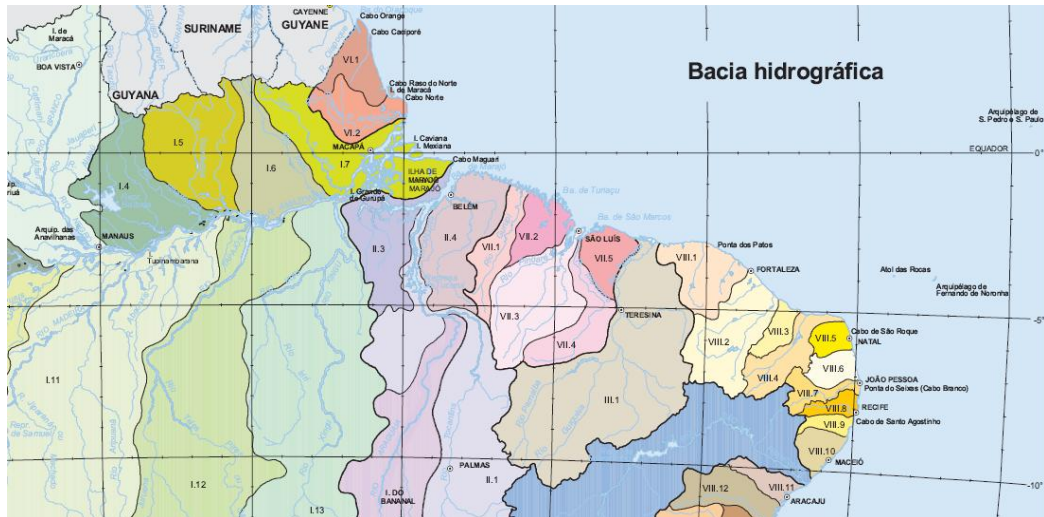


Figura 37. A bacia do Turiaçu determinada pelo IBGE e definida por nós como área de estudo - Fonte: Atlas de saneamento IBGE



Figura 38. Visão ampliada dos limites da bacia do Turiaçu - Fonte: Atlas de saneamento IBGE

5. Principais impactos prováveis devido ao empreendimento e análise dos impactos.

A função desta avaliação não é apenas de mencionar os possíveis e prováveis impactos, mas de identificar todos os impactos possíveis de ocorrer e principalmente selecionar aqueles mais significativos. Para tanto, Sánchez (2006) sugere o uso de uma série de matrizes a fim de identificar, classificar e ordenar os impactos em ordem de importância utilizando alguns métodos de classificação destes impactos. Tais métodos serão explicados ao longo da análise.

A fim de identificar os impactos faremos uma lista inicial das etapas da obra relacionando a cada uma destas etapas as ações que podem causar impactos ambientais. Recomenda-se atualmente nas legislações mais cuidadosas que a análise contemple todas as fases da obra. Utiliza-se a denominação “do berço ao túmulo” para retratar tal conceito. Este tipo de avaliação é muito importante, pois alguns impactos relevantes podem ocorrer apenas em determinada fase da obra e desconsiderá-lo em nossa avaliação pode ser prejudicial ao estudo e até mesmo inviabilizar a obtenção das licenças ambientais necessárias para implantação e operação da usina.

Tabela 12. Atividades e ações que ocorrem ao longo de cada uma das fases da obra da usina (Fonte: Sánchez 2006).

	Atividades e ações
Fase de planejamento e pesquisa	Estudos hidrológicos
	Contratação de pessoal temporário
	Levantamentos aerofotogramétricos
	Serviços topográficos
	Abertura de vias de acesso
	Instalação de acampamentos
	Estudo de disponibilidade de materiais de construção
	Investigações geológicas e geotécnicas
	Perfuração, abertura de trincheiras e coleta de amostra
	Retirada de material para ensaios geológico-geotécnicos
	Realização de ensaio de laboratório
	Levantamento fundiário
Fase preparatória	Elaboração de projeto básico
	Veiculação de informações sobre o empreendimento
	Aquisição de terras para implantação do canteiro
Fase de implantação	Encomenda de máquinas e equipamentos
	Aquisição de terras
	Contratação de serviços de terceiros
	Construção de serviços de melhoria das vias de acesso

	Ampliação e melhoria da infra-estrutura existente (energia, comunicações, fornecimento de água potável, coleta e tratamento de esgoto)
	Decapeamento e terraplenagem da área de canteiro de obras
	Implantação de canteiro de obras
	Contratação de mão de obra para a construção
	Implantação de alojamentos
	Construção de oficinas e pátios de máquina
	Abertura de área de empréstimo e pedreiras
	Remoção da vegetação
	Implantação das fundações da barragem
	Extração de material de empréstimo (solo e rocha)
	Construção de ensecadeira e desvio do rio
	Serviços de terraplenagem, compactação, transporte de material e concretagem
	Disposição de resíduos sólidos
	Transporte, recebimento e armazenamento de insumos e equipamentos
	Montagem eletromecânica
	Construção da linha de transmissão
	Reinstalação de infra-estrutura afetada (estradas etc.)
	Recrutamento de mão-de-obra para a fase de operação
Fase de operação	Desmatamento e limpeza da área de inundação
	Fechamento das comportas
	Operação de reservatório (controle de vazão)
	Acompanhamento do comportamento das estruturas
	Manutenção civil, elétrica e mecânica
	Controle e eliminação de plantas aquáticas
	Fiscalização da área do reservatório e faixa de segurança
	Dragagem e remoção de sedimentos
	Turbinagem de água
Fase de desativação	Geração de energia elétrica
	Remoção e contenção dos sedimentos
	Retaludamento e implantação do sistema de drenagem
	Demolição da estrutura
	Preenchimento de escavações
	Fechamento do acesso e aberturas subterrâneas e sinalização
	Revegetação e recuperação de áreas degradadas
	Desmontagem das instalações elétricas e mecânicas
	Remoção de insumos e resíduos
	Dispensa da mão de obra
	Supervisão e monitoramento pós – operacional

Após a fase de identificação das ações que poderão causar os impactos ambientais, listaremos agora estes impactos em função do meio no qual ocorre, ainda o relacionando com a fase em que ocorrerá: planejamento (PL), preparação (PR), implantação (IM), operação (OP) ou desativação (DE).

Tabela 13. Impactos relacionados ao meio e a fase em que ocorrem.

	Impactos	FASE
Físico	Piora da qualidade do ar por movimentação de máquinas e poluição gerada pela queima de combustível	PL
	Alteração no escoamento superficial direto aumentando probabilidade de cheias e inundações	IM
	Aumento da poluição sonora	IM
	Degradação do solo da área de empréstimo e de seu entorno	IM
	Instabilidade do solo	IM
	Contaminação do lençol freático	IM
	Alteração do escoamento do rio alterando padrão de sedimentação podendo causar assoreamento em área onde isso não ocorria	IM
	Mudança na paisagem natural diminuindo a beleza estética local	IM
	Contaminação do solo por disposição de resíduos sólidos	IM
	Aumento da poluição atmosférica por poeira e lançamento de gases	IM
	Alteração da umidade relativa	OP
	Erosão das margens nos reservatórios	OP
	Aumento do período de inundação dos manguezais	OP
	Risco de acidente e desmoronamento da barragem	DE
	Alteração de níveis de turbidez	OP
Biótico	Lançamento de resíduos à atmosfera	DE
	Aumento da poluição difusa no rio devido aos detritos da barragem	DE
	Degradação de áreas para deposição de resíduos sólidos (entulho de demolição)	DE
	Extermínio e diminuição dos animais terrestres	IM
	Diminuição ou extinção da fauna aquática	IM
	Alteração da atividade agrícola e da piscicultura causando desemprego	IM
	Migração de animais terrestres	OP
	Extinção de animais marinhos	OP
	Decomposição da biomassa submersa	OP

	Interrupção da migração dos peixes	OP
	Extermínio dos peixes à jusante da barragem	OP
	Perda da biodiversidade aquática	OP
ANTRÓPICO	Aumento da população temporária na cidade	PL
	Injeção momentânea de dinheiro na economia (lotação de hotéis e pousadas, restaurantes, etc.)	PL
	Insegurança da população pela movimentação sem ter havido ainda comunicação.	PL
	Especulação imobiliária e invasão de áreas adjacentes	PR
	Insegurança da população quanto ao futuro	PR
	Aumento da população local pela chegada de trabalhadores e famílias	PR
	Valorização da terra	IM
	Conflito entre população local e trabalhadores	IM
	Aumento de arrecadação da união	IM
	Aumento de demanda por serviços públicos (saúde, escola, lazer)	IM
	Aumento de giro econômico local	IM
	Aumento da oferta de emprego e poder aquisitivo da população	IM
	Diminuição do turismo ecológico local	IM
	Transferência de populações indígenas	IM
	Risco de interferência no patrimônio cultura	IM
	Criação de pólo de atração	IM
	Impedimento a navegação e lazer no rio	IM
	Perda de empregos e renda da população	DE
	Diminuição da oferta de energia	DE
	Diminuição da arrecadação fiscal	DE
	Redução na população com a possível retirada de pessoas que moram lá apenas para trabalhar na usina	DE
	Recuperação das atividades econômicas que foram interrompidas pela criação da usina	DE

Em busca de organizar os impactos em uma ordem crescente de significância e severidade, iremos agora, finalmente classificá-los em relação a quatro aspectos que consideramos importantes para tal classificação. Os aspectos receberão uma nota e assim, de acordo com a nota final obtida pelo impacto obteremos a classificação geral quanto à sua severidade. Os aspectos serão:

- Duração: Temporária (1 ponto) ou permanente (2 pontos).
- Interferência: Pequena (1 ponto), relativa (2 pontos) ou grande (3 pontos).
- Natureza: Positivo (0 pontos) ou negativa (3 pontos)

- Possibilidade de ocorrência: Certa (2 pontos), provável (1 ponto) ou incerto (0 pontos).

A tabela abaixo traz a probabilidade de ocorrência de cada um dos impactos para a alternativa 1 (implantação da usina com a barragem no eixo demonstrado). Na alternativa 0 (não construção da usina), a duração, interferência e natureza dos impactos continuam sendo as mesmas e apenas a probabilidade de ocorrência é que se torna incerta para todos os impactos.

Tabela 14. Cada um dos impactos relacionados a cada um dos aspectos levados em conta.

Impacto	Duração	Interferência	Natureza	Probabilidade
Aumento da população temporária na cidade	T	Pe	Ne	CE
Injeção momentânea de dinheiro na economia (lotação de hotéis e pousadas, restaurantes, etc.)	T	Pe	Po	CE
Piora da qualidade do ar por movimentação de máquinas e poluição gerada pela queima de combustível	T	Re	Ne	PRO
Insegurança da população pela movimentação sem ter havido ainda comunicação.	T	Re	Ne	PRO
Especulação imobiliária e invasão de áreas adjacentes	T	Re	Ne	PRO
Insegurança da população quanto ao futuro	T	Re	Ne	PRO
Aumento da população local pela chegada de trabalhadores e famílias	P	Pe	Ne	CE
Valorização da terra	T	Re	Po	PRO
Conflito entre população local e trabalhadores	T	Re	Ne	IN
Aumento da poluição sonora	T	Gr	Ne	PRO
Aumento de arrecadação da união	P	Gr	Po	CE
Alteração no escoamento superficial direto aumentando probabilidade de cheias e inundações	P	Gr	Ne	PRO
Aumento de demanda por serviços públicos (saúde, escola, lazer)	P	Gr	Ne	CE
Aumento de giro econômico local	T	Re	Po	CE
Aumento da oferta de emprego e poder aquisitivo da população	T	Gr	Po	CE
Degradação do solo da área de empréstimo e de seu entorno	P	Re	Ne	CE
Instabilidade do solo	P	Re	Ne	CE

Extermínio e diminuição dos animais terrestres	P	Gr	Ne	CE
Contaminação do lençol freático	P	Gr	Ne	PRO
Diminuição ou extinção da fauna aquática	P	Gr	Ne	PRO
Alteração do escoamento do rio alterando padrão de sedimentação podendo causar assoreamento em área onde isso não ocorria	P	Re	Ne	PRO
Mudança na paisagem natural diminuindo a beleza estética local	P	Re	Ne	PRO
Contaminação do solo por disposição de resíduos sólidos	P	Gr	Ne	PRO
Aumento da poluição atmosférica por poeira e lançamento de gases	P	Gr	Ne	CE
Diminuição do turismo ecológico local	P	Re	Ne	CE
Transferência de populações indígenas	P	Gr	Ne	IN
Risco de interferência no patrimônio cultural	P	Re	Ne	IN
Criação de pólo de atração	P	Re	Po	PRO
Alteração da atividade agrícola e da piscicultura causando desemprego	P	Gr	Ne	CE
Impedimento à navegação e lazer no rio	P	Re	Ne	CE
Migração de animais terrestres	P	Gr	Ne	CE
Extinção de animais marinhos	P	Gr	Ne	CE
Alteração da umidade relativa	P	Gr	Ne	CE
Erosão das margens nos reservatórios	P	Re	Ne	PRO
Aumento do período de inundação dos manguezais	P	Gr	Ne	CE

Decomposição da biomassa submersa	P	Gr	Ne	CE
Interrupção da migração dos peixes	P	Re	Ne	CE
Extermínio dos peixes à jusante da barragem	P	Gr	Ne	CE
Perda da biodiversidade aquática	P	Gr	Ne	CE
Alteração de níveis de turbidez	P	Re	Ne	CE
Risco de acidente e desmoronamento da barragem	P	Gr	Ne	IN
Perda de empregos e renda da população	P	Gr	Ne	CE
Lançamento de resíduos à atmosfera	P	Gr	Ne	CE
Aumento da poluição difusa no rio devido aos detritos da barragem	T	Gr	Ne	CE
Diminuição da oferta de energia	P	Re	Ne	CE
Diminuição da arrecadação fiscal	P	Re	Ne	PRO
Redução na população com a possível retirada de pessoas que moram lá apenas para trabalhar na usina	P	Pe	Ne	PRO
Recuperação das atividades econômicas que foram interrompidas pela criação da usina	P	Re	Po	PRO
Degradação de áreas para deposição de resíduos sólidos (entulho de demolição)	P	Gr	Ne	PRO

De acordo então com a pontuação explicada acima e com as probabilidades de ocorrência relativas à alternativa 0, temos de acordo com o grau final de severidade a ordem decrescente dos impactos para cada uma das alternativas:

Tabela 15. Severidade dos impactos e ordem de importância e cada uma das alternativas propostas

ALTERNATIVA 0		ALTERNATIVA 1	
Impacto	Severidade	Impacto	Severidade
Alteração no escoamento superficial direto aumentando probabilidade de cheias e inundações	8	Aumento de demanda por serviços públicos (saúde, escola, lazer)	10
Aumento de demanda por serviços públicos (saúde, escola, lazer)	8	Extermínio e diminuição dos animais terrestres	10
Extermínio e diminuição dos animais terrestres	8	Aumento da poluição atmosférica por poeira e lançamento de gases	10
Contaminação do lençol freático	8	Alteração da atividade agrícola e da piscicultura causando desemprego	10
Diminuição ou extinção da fauna aquática	8	Migração de animais terrestres	10
Contaminação do solo por disposição de resíduos sólidos	8	Extinção de animais marinhos	10
Aumento da poluição atmosférica por poeira e lançamento de gases	8	Alteração da umidade relativa	10
Transferência de populações indígenas	8	Aumento do período de inundação dos manguezais	10
Alteração da atividade agrícola e da piscicultura causando desemprego	8	Decomposição da biomassa submersa	10
Migração de animais terrestres	8	Extermínio dos peixes à jusante da barragem	10
Extinção de animais marinhos	8	Perda da biodiversidade aquática	10
Alteração da umidade relativa	8	Perda de empregos e renda da população	10
Aumento do período de inundação dos manguezais	8	Lançamento de resíduos à atmosfera	10
Decomposição da biomassa submersa	8	Alteração no escoamento superficial direto aumentando probabilidade de cheias e inundações	9
Extermínio dos peixes à jusante da barragem	8	Degradação do solo da área de empréstimo e de seu entorno	9
Perda da biodiversidade aquática	8	Instabilidade do solo	9
Risco de acidente e desmoronamento da barragem	8	Contaminação do lençol freático	9
Perda de empregos e renda da população	8	Diminuição ou extinção da fauna aquática	9
Lançamento de resíduos à atmosfera	8	Contaminação do solo por disposição de resíduos sólidos	9
Degradação de áreas para deposição de resíduos sólidos (entulho de demolição)	8	Diminuição do turismo ecológico local	9
Aumento da poluição sonora	7	Impedimento à navegação e lazer no	9

		rio	
Degradação do solo da área de empréstimo e de seu entorno	7	Interrupção da migração dos peixes	9
Instabilidade do solo	7	Alteração de níveis de turbidez	9
Alteração do escoamento do rio alterando padrão de sedimentação podendo causar assoreamento em área onde isso não ocorria	7	Aumento da poluição difusa no rio devido aos detritos da barragem	9
Mudança na paisagem natural diminuindo a beleza estética local	7	Diminuição da oferta de energia	9
Diminuição do turismo ecológico local	7	Degradação de áreas para deposição de resíduos sólidos (entulho de demolição)	9
Risco de interferência no patrimônio cultural	7	Aumento da população local pela chegada de trabalhadores e famílias	8
Impedimento a navegação e lazer no rio	7	Aumento da poluição sonora	8
Erosão das margens nos reservatórios	7	Alteração do escoamento do rio alterando padrão de sedimentação podendo causar assoreamento em área onde isso não ocorria	8
Interrupção da migração dos peixes	7	Mudança na paisagem natural diminuindo a beleza estética local	8
Alteração de níveis de turbidez	7	Transferência de populações indígenas	8
Aumento da poluição difusa no rio devido aos detritos da barragem	7	Erosão das margens nos reservatórios	8
Diminuição da oferta de energia	7	Risco de acidente e desmoronamento da barragem	8
Diminuição da arrecadação fiscal	7	Diminuição da arrecadação fiscal	8
Piora da qualidade do ar por movimentação de máquinas e poluição gerada pela queima de combustível	6	Aumento da população temporária na cidade	7
Insegurança da população pela movimentação sem ter havido ainda comunicação.	6	Piora da qualidade do ar por movimentação de máquinas e poluição gerada pela queima de combustível	7
Especulação imobiliária e invasão de áreas adjacentes	6	Insegurança da população pela movimentação sem ter havido ainda comunicação.	7
Insegurança da população quanto ao futuro	6	Especulação imobiliária e invasão de áreas adjacentes	7
Aumento da população local pela chegada de trabalhadores e famílias	6	Insegurança da população quanto ao futuro	7
Conflito entre população local e trabalhadores	6	Aumento de arrecadação da união	7

Redução na população com a possível retirada de pessoas que moram lá apenas para trabalhar na usina	6	Risco de interferência no patrimônio cultural	7
Aumento da população temporária na cidade	5	Redução na população com a possível retirada de pessoas que moram lá apenas para trabalhar na usina	7
Aumento de arrecadação da união	5	Conflito entre população local e trabalhadores	6
Aumento da oferta de emprego e poder aquisitivo da população	4	Aumento da oferta de emprego e poder aquisitivo da população	6
Criação de pólo de atração	4	Aumento de giro econômico local	5
Recuperação das atividades econômicas que foram interrompidas pela criação da usina	4	Criação de pólo de atração	5
Valorização da terra	3	Recuperação das atividades econômicas que foram interrompidas pela criação da usina	5
Aumento de giro econômico local	3	Injeção momentânea de dinheiro na economia (lotação de hotéis e pousadas, restaurantes, etc.)	4
Injeção momentânea de dinheiro na economia (lotação de hotéis e pousadas, restaurantes, etc.)	2	Valorização da terra	4

6. Considerações sobre os possíveis impactos mais significativos.

Para os impactos mais significativos e, portanto, aqueles que mais nos preocupam nesta fase preliminar, iremos sugerir agora uma série de medidas mitigadoras que irão amenizar ou compensar os impactos.

Lembramos que estes devem ser os impactos estudados de forma mais profunda. Assim sendo recomendamos a contratação de profissionais especializados em cada um destes impactos para que possam nos situar sobre a severidade destes impactos e sobre a opção quanto às medidas compensatórias que irão gerar maior benefício.

Tabela 16. Impactos mais relevantes respectivamente ligados as suas medidas mitigadoras.

Impacto	Medidas mitigadoras
Aumento de demanda por serviços públicos (saúde, escola, lazer)	Apoio à ONGS e doações às escolas públicas e hospitais locais
Extermínio e diminuição dos animais terrestres	Preservação dos animais encontrados em viveiros e transporte para regiões onde possam se adaptar
Aumento da poluição atmosférica por poeira e lançamento de gases	Regulagem e monitoramento das máquinas para regular os índices de emissão de gases
Alteração da atividade agrícola e da piscicultura causando desemprego	Reduzir área de intervenção e qualificar a população para empregos novos que surgirão com a implantação da usina
Migração de animais terrestres	Redução da área de desmatamento
Extinção de animais marinhos	Análise e retirada para transferência de todas as espécies lá presente para outras regiões onde possam procriar e dar andamento à sua espécie.
Alteração da umidade relativa	Reflorestar o entorno do reservatório a fim de diminuir a evaporação do reservatório diminuindo a incidência solar
Aumento do período de inundação dos manguezais	Melhorar a qualidade da água e desta forma o afogamento por maior período não será tão prejudicial.
Decomposição da biomassa submersa	
Extermínio dos peixes à jusante da barragem	Transferência das espécies para local de preservação ambiental.
Perda da biodiversidade aquática	Inventariar os tipos de espécie além de transferir para local de preservação ambiental
Perda de empregos e renda da população	Programas de incentivo a recolocação profissional como cursos de especialização em atividades onde há oferta de empregos.
Lançamento de resíduos à atmosfera	Controle da geração de resíduo, filtragem de gases lançados a atmosfera
Alteração no escoamento superficial direto aumentando probabilidade de cheias e inundações	Compensar com reflorestamento de áreas desmatadas no entorno aumentando a infiltração nestas áreas.
Degradação do solo da área de empréstimo e de seu entorno	Reflorestar e cultivar espécies nativas na área degradada após a retirada do material de empréstimo.
Instabilidade do solo	Controlar e medir a instabilidade prevenindo deslizamentos.

Contaminação do lençol freático	Controle permanente da qualidade da água do lençol e controle de lançamento de poluição no solo que pode infiltrar no lençol
Diminuição ou extinção da fauna aquática	Inventaria e transferir peixes que serão afetados para que possam reproduzir em local preservado.
Contaminação do solo por disposição de resíduos sólidos	Controle do local de lançamento do resíduo sólido
Diminuição do turismo ecológico local	Investir em áreas próximas onde há exploração deste tipo de turismo buscando a migração destes turistas para áreas próximas
Impedimento a navegação e lazer no rio	Estudar hipótese de eclusa de acordo com o volume de navegação do rio.
Interrupção da migração dos peixes	Analisar a possibilidade do uso de escada de peixes
Alteração de níveis de turbidez	Controle de transporte e deposição de sedimentos
Aumento da poluição difusa no rio devido aos detritos da barragem	Controle da qualidade da água
Diminuição da oferta de energia	Instalação de outras fontes de energia para compensar a necessidade da população e indústrias locais
Degradação de áreas para deposição de resíduos sólidos (entulho de demolição)	Controle da poluição do solo e controle da legalidade das áreas de deposição de resíduos

7. Estrutura proposta para o EIA e conteúdo de cada capítulo e seção.

1. Informações gerais do empreendimento
 - a. Objetivos e justificativa
 - b. Localização
 - c. Etapas de implantação
 - d. Fontes de recurso financeiro
 - e. Compatibilidade legal
 - f. Consultas públicas
2. Descrição do empreendimento
 - a. Discussão das alternativas
3. Diagnóstico ambiental
 - a. Área de estudo
 - b. Área de influência
 - c. Físico
 - d. Biológico
 - e. Antrópico
4. Impactos ambientais
 - a. Identificação

- b. Previsão
 - c. Análise de risco
 - d. Prognóstico ambiental com e sem o empreendimento
- 5. Medidas mitigadoras
- 6. Programa de gestão (acompanhamento dos indicadores)
- 7. Conclusão
- 8. Relatório de Impactos no Meio Ambiente (RIMA)
- 8. Formas de apresentação dos resultados.

Os resultados serão apresentados em forma de relatório de impacto no meio ambiente (RIMA) como determina a legislação vigente. Tal relatório deve ter linguagem informal que possa ser compreendida pela população leiga e que informe de forma resumida, os principais pontos levantados na avaliação e no próprio estudo de impacto ambiental (EIA).
- 9. Compromissos de consulta pública.

O empreendedor deve se comprometer a realizar audiências públicas com uma frequência adequada às necessidades demonstradas pela população e sua insegurança. As audiências devem explicar para a população o objetivo e as justificativas de implantação da usina assim como seus impactos positivos e negativos e ainda as medidas mitigadoras e compensatórias. Nestas audiências a população deve também ser encorajada a expor suas dúvidas e anseios para que o empreendedor, representado pela figura do articulador das audiências, possa acalmar a população evitando que a população seja influenciada por movimentos mal intencionados que visam prejudicar a instalação de usinas e barragens, assegurando o sucesso do empreendimento.

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Através do nosso estudo concluímos que há alguns lugares no Brasil onde pode ser utilizada a oscilação da maré para a geração de energia. Não só o local por nós selecionado como alguns lugares próximos a ele podem definitivamente utilizar esta forma de energia, tanto na concepção de pequenas centrais hidrelétricas como também com grande potencial gerador. A falta de integração desta região com a malha de distribuição energética do país é definitivamente um ponto a ser melhorado caso haja real interesse na área.

A fim de aprofundar o estudo realizado seria vital a elaboração de uma metodologia para realização de batimetria no local indicado. Isto porque a ausência de dados da região em questão tornou até mesmo o trabalho de viabilidade bastante incerto. Uma série de modelos pode ser usada, como uma ecossonda/GPS, que nos forneceria dados com discretização de escala adequada (1:5.000 por exemplo), para posterior modelagem matemática. Seria de vital importância seguir todas as normas da Marinha, respeitando a orientação para as linhas de sondagem para este tipo de análise.

A modelagem matemática da previsão de marés também é recomendada para elaboração do projeto básico. O uso do PACMARÉ (desenvolvido pelo Almirante A. S. Franco) com todos os componentes e harmônicos de maré nos permitirá obter uma maior previsão a partir das séries observadas. Com estes dados poderíamos obter níveis de maré previstos muito próximos da realidade que nos permitiriam fazer análise de potência firme precisa, relacionando de forma mais real os valores de lucro possíveis e relacioná-los assim aos custos. Os efeitos da ressonância, que dado a falta de dados precisos, não pode ser calculado de forma precisa, também pode ser resolvido com os dados obtidos através da modelagem. Esta é uma fase vital na evolução do projeto até mesmo para obtenção de financiamentos.

Os dados maregráficos são também de vital importância para elaboração deste tipo de projeto. Os dados por nós obtidos tratam de uma estação bastante distante do ponto de implantação da usina, embora fosse a estação mais próxima existente, não seria suficiente para um estudo de nível de projeto básico. Recomendamos que, na evolução do projeto haja a medição precisa, no ponto de implantação da barragem. Estas medições eliminariam as incertezas causadas pelos efeitos da ressonância, que foi motivo de estudo deste trabalho. Com as medições in loco todas as incertezas seriam minimizadas e o modelo poderia então funcionar com uma fonte de dados muito mais precisa, requisito necessário para a elaboração do projeto básico.

A potência obtida através do modelo de geração nos fornece um total de 59MW, funcionando em simples efeito. Considerando que uma residência consome aproximadamente 1kWh (0,001MWh), esta usina teria capacidade para suprir a necessidade de 59 mil residências. A cidade de Turiaçu tem aproximadamente 34 mil habitantes, o que resulta em algo próximo de 8.500 residências (4 habitantes por residência). Sendo assim, a usina teria capacidade de gerar energia para abastecer sete cidades do tamanho de Turiaçu.

A grande busca por investidores no mercado de PCHs (pequenas centrais hidrelétricas) no Brasil tem ocorrido por um motivo bastante simples. A partir do momento que se consegue licenciar uma PCH, há um compromisso do ONS (operador nacional do sistema) de comprar a energia gerada no chamado SPOT. Isto quer dizer que, o ONS compra a energia gerada (ou aquela sobressalente) para alimentar a malha energética brasileira por um valor superior àquele de mercado. Tal fato tem tornado a viabilidade econômica de uma PCH muito mais simples do que de uma usina convencional. Encaixam-se no grupo de PCHs usinas que geram até 30MW de potência instalada. Como este não é o caso desta usina, seu estudo econômico deverá ser mais complexo.

Um aspecto que ainda deve ser analisado para elaboração do projeto básico é a fundação do solo existente no local. Por ser um tipo de análise que deve ser verificada *in loco*, não nos coube nesta fase de viabilidade, mas deve ser talvez o principal estudo a ser realizado futuramente. A boa fundação irá nos assegurar a possibilidade de implantação da barragem projetada e, qualquer alteração que seja necessária se dará de acordo com a resistência encontrada no solo local.

A análise de impactos ambientais forneceu ao trabalho uma boa noção sobre os pontos que devem ser considerados mais relevantes. O fato da presença de manguezais e de tratar-se de uma área de proteção são os aspectos que mais nos preocupam e que, para aprofundamento do projeto, recomendamos a contratação de estudos feitos por especialistas na área. Tais estudos poderão embasar o Estudo de Impacto Ambiental (EIA) e conseqüentemente o Relatório de Impacto Ambiental (RIMA) para que a licença prévia seja obtida, seguida da licença de implantação e operação. Outro aspecto que deve ser considerado ainda neste âmbito é a obtenção da outorga para uso da água. Obtida junto a Agência Nacional de Águas (ANA) ela é fundamental para a obtenção da licença ambiental e sem ela, nem os estudos *in loco* serão permitidos.

Outra importante conclusão obtida com o trabalho é sobre o potencial do uso das turbinas de corrente (as *straflo*) para pequenas comunidades ribeirinhas. O enfoque social desta idéia nos motivou e certamente é uma boa recomendação para mitigar impactos ambientais causados por queima de combustíveis fósseis.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. FEITOSA, Antonio Cordeiro e SOUZA, Ulisses Denache. **Ocupação e uso da zona costeira do estado do maranhão, nordeste do Brasil**. In: XII Encontro de geógrafos da América Latina, 2009, Montevideo
2. LIMA, Shigeaki Leite; SAAVEDRA, Osvaldo; BARROS, Allan Kardec; CAMELO, Nelson José. **Projeto da Usina Marémotriz do Bacanga: Concepção e Perspectivas**. 2003
3. HARARI, Joseph; CAMARGO, Ricardo de; ALMEIDA, E. G.. **Como o mar pode mover o mundo**. Scientific American Brasil, Série Oceanos: origens, transformações e o futuro, São Paulo – SP- Brasil, p. 32-39, 01 outubro de 2009.
4. FERREIRA, Rafael Malheiro da Silva do Amaral. **Aproveitamento da energia das marés. Estudo de caso: Estuário do Bacanga**. Tese de pós-graduação apresentada à UFRJ, Rio de Janeiro – RJ, maio de 2007
5. DHN, Marinha do Brasil, Brasil www.mar.mil.br, acessado em abril de 2010
6. FERREIRA, Rafael Malheiro da Silva do Amaral; ESTEFEN, Segen. **Aproveitamento da energia das marés para a geração de eletricidade. Usina Marémotriz do Bacanga**. PCH News – agosto de 2008
7. PASCALICCHIO, Agostinho C. e LORA, Beatriz A. **A energia dos oceanos – energia maré motriz**. Universidade de São Paulo, Instituto de Eletrotécnica e Energia, Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia. Disciplina Recursos e Ofertas de Energia.
8. Tidal Power. *The Institution of Engineerign and Technology*. Disponível em <http://www.theiet.org/factfiles/energy/energy-generation.cfm>. Acesso em 05 jun. 2010.
9. Clark, P., Klossner, R., Kologe, L., **Tidal Energy**, Projeto final, College of Earth and Mineral Sciences, Penn State University, E.U.A., Novembro de 2003.
10. FUNAI, www.funai.gov.br/funai.htm, acessado em junho 2010.
11. Governo do estado do Amapá, <http://www.amapa.gov.br/>, acessado em junho de 2010
12. UFPA, <http://www.portal.ufpa.br/>, acessado em junho de 2010

13. Dados demográficos do IBGE, <http://www.ibge.gov.br/estadosat/>, acessado em junho de 2010
14. WIDELL, John e WEIR, Tony. **Renewable Energy Resources**. 2^a. edição. New York, EUA: Taylor & Francis, 2006.
15. GEOLOGY, <http://geology.com>, acessado em julho 2010
16. ALSTON, <http://www.power.alstom.com>, acessado em Ago 2010.
17. SEVMASH, <http://www.sevmash.ru>, acessado em Ago 2010
18. ANNAPOLISBASIn, <http://www.annapolisbasin.com/systmpl/tidalgeneratingstation/> Acessado em Ago 2010.
19. CLARK, Robert H. **Elements of Tidal Electric Engineering**, John Wiley & Sons Inc. EUA, 2007
20. SANCHÉZ, Luis Henrique **Avaliação de Impacto ambiental: conceitos e métodos**, 1^a. Edição, Oficina de Texto. São Paulo, 2006
21. Programa de planejamento e gestão territorial do Maranhão, www.ppgt.ma.gov.br, acessado em novembro de 2010.
22. GARMAN, Peter **Water Current Turbines**, ITDG Publishing, Londres, 1986
23. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), <<http://www.inpe.br/>> Acessado Out 2010
24. Marinha do Brasil. [HTTP://www.mar.mil.br](http://www.mar.mil.br). Acesso em Nov 2010.
25. MACINTYRE, Archibald Joseph **Máquinas Motrizes Hidráulicas**, Editora Guanabara Dois S.A., 1983, Rio de Janeiro

ANEXO I

Média mensal das diferenças de marés (máximas e mínimas) do último ano – Postos do Maranhão

Postos	Itaqui	Tutóia	São Luiz	Alumar	Ponta da Madeira
Maio/2009	4,7	2,4	4,6	4,7	4,5
Junho/2009	4,8	2,5	4,6	4,7	4,6
Julho/2009	4,6	2,4	4,5	4,7	4,5
Agosto/2009	4,7	2,4	4,6	4,7	4,5
Setembro/2009	4,7	2,4	4,6	4,7	4,3
Outubro/2009	4,7	2,5	4,6	4,8	4,4
Novembro/2009	4,7	2,4	4,4	4,7	4,3
Dezembro/2009	4,7	2,3	4,4	4,5	4,3
Janeiro/2010	5,1	2,7	4,9	5,0	4,6
Fevereiro/2010	4,8	2,6	4,6	4,8	4,6
Março/2010	4,8	2,5	4,6	4,7	4,6
Abril/2010	5,0	2,6	4,8	4,9	4,7

Tabela 17. Amplitude das marés - Fonte DHN - Marinha do Brasil em www.mar.mil.br

ANEXO II

Cálculo do rotor da turbina Kaplan

Para $A_m = 4,6\text{m}$

$$Q = 761,8 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$n = 100 \text{ rpm}$$

1. Potência útil P

$$P = \frac{1025 \cdot \eta \cdot Q \cdot A_m}{75}$$

Adotando $\eta = 91\%$ (como tabela demonstra)

$$P = \frac{1025 \cdot 0,91 \cdot 761,8 \cdot 4,6}{75} = 8.088,44 \text{ cv}$$

2. Velocidade específica

$$n_s = \frac{n \sqrt{P}}{A_m \sqrt[4]{H}} = \frac{100 \sqrt{8.088,44}}{4,6 \sqrt[4]{4,6}} = 914,6 \text{ rpm}$$

3. Dimensões principais do rotor

a. Diâmetro externo do rotor

$$D1 = 4,8 \sqrt[3]{\frac{Q}{n}} = 4,8 \sqrt[3]{761,8/100} = 9,4 \text{ m}$$

$$D1' = 5,5 \sqrt[3]{Q/n} = 5,5 \sqrt[3]{761,8/100} = 10,8 \text{ m}$$

4. Diâmetro do cubo central

$$d1 = (0,4 \text{ a } 0,5) \cdot D1' = 0,42 \cdot 10,8 = 4,54 \text{ m}$$

5. Seção livre de passagem de água pela turbina

$$S = (D^2 - d1^2) \cdot \frac{\pi}{4} = (10,8^2 - 4,54^2) \cdot \frac{\pi}{4} = 75,7 \text{ m}^2$$

6. Velocidade meridiana

$$V_m = \frac{Q}{S} = \frac{761,8}{75,7} = 10,06 \text{ m/s}$$

7. Passo entre as pás

$$t = \frac{\pi D_1 + d_1}{Z \cdot 2} = \frac{\pi 9,4 + 4,54}{4 \cdot 2} = 6,03 \text{ m}$$

8. Comprimento das pás

$$l = \frac{78}{ns^{2/3}} \cdot t = \frac{78}{914,6^{2/3}} \cdot 6,03 = 4,99 \text{ m}$$

9. Velocidade periférica

$$u = \frac{\pi D_1}{60} \cdot n = \frac{\pi 10,8}{60} \cdot 100 = 49,42 \text{ m/s}$$

10. Rendimento hidráulico

$$\varepsilon = \eta + 0,05 = 0,96 = 96\%$$

11. Componente periférica da velocidade absoluta

$$V_{u1} = \frac{\varepsilon \cdot g \cdot H}{u} = \frac{0,96 \cdot 9,81 \cdot 4,6}{49,42} = 0,87 \text{ m/s}$$

12. Traçado do diagrama das velocidades

a. Ângulo β_1

$$\beta_1 = \arctan\left(\frac{V_m}{u - V_{u1}}\right) = \arctan\left(\frac{10,06}{49,42 - 0,87}\right) = 12 \text{ graus}$$

b. Ângulo β_2

$$\beta_2 = \arctan\left(\frac{V_m}{u}\right) = \arctan\left(\frac{10,06}{49,42}\right) = 11,5 \text{ graus}$$

c. Ângulo β_3

$$\beta_3 = \arctan\left(\frac{V_m}{u - V_{u1}/2}\right) = \arctan\left(\frac{10,06}{49,42 - 0,87/2}\right) = 11,6 \text{ graus}$$

d. Velocidade relativa W_3

$$W_3 = \sqrt{\left(u - \frac{Vu}{2}\right)^2 + Vm^2} = \sqrt{\left(49,42 - \frac{0,87}{2}\right)^2 + 10,06^2} = 50,01 \text{ m/s}$$

13. Coeficiente de portança

$$u_1 = \frac{u}{\sqrt{H}} = \frac{49,42}{\sqrt{4,6}} = 23,07 \text{ m/s}$$

$$W_1 = \frac{W}{\sqrt{H}} = \frac{50,01}{\sqrt{4,6}} = 7,32 \text{ m/s}$$

$$C_a = \frac{2 \cdot g \cdot t \cdot \varepsilon}{l \cdot u_1 \cdot W_1 \left(1 - \frac{0,05}{\tan \beta_3}\right)} = \frac{2 \cdot 9,8 \cdot 6,03 \cdot 0,96}{4,99 \cdot 23,07 \cdot 7,32 \left(1 - \frac{0,05}{0,205}\right)} = 0,177$$

14. Ângulo de ataque

De acordo com o gráfico dado: $\alpha_1 = -3,1^\circ$

15. Ângulo do perfil

$$\beta_P = \beta_3 - \alpha_1 = 11,6 + 3,1 = 14,7 \text{ graus}$$