



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

NÁTALIE DA SILVA UCHÔA

ESTIMATIVA DO IMPACTO HÍDRICO DA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA
COMO ESTRATÉGIA DE PLANEJAMENTO PARA O CEARÁ 2050

FORTALEZA

2018

NÁTALIE DA SILVA UCHÔA

ESTIMATIVA DO IMPACTO HÍDRICO DA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA
COMO ESTRATÉGIA DE PLANEJAMENTO PARA O CEARÁ 2050

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Elétrica do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para a obtenção do grau de Engenharia Eletricista.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Cesar Marques de Carvalho.

Coorientador: Prof. Dr. João José Hiluy Filho.

FORTALEZA

2018

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- U19e Uchôa, Nátalie da Silva.
Estimativa do impacto hídrico da geração de energia elétrica como estratégia de planejamento para o Ceará 2050 / Nátalie da Silva Uchôa. – 2018.
43 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Elétrica, Fortaleza, 2018.
Orientação: Prof. Dr. Paulo Cesar Marques de Carvalho.
Coorientação: Prof. Dr. João José Hiluy Filho.
1. Ceará 2050. 2. Impacto Hídrico. 3. Consumo e geração de energia elétrica. 4. Sistemas de resfriamento. I. Título.

CDD 621.3

NÁTALIE DA SILVA UCHÔA

ESTIMATIVA DO IMPACTO HÍDRICO DA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA
COMO ESTRATÉGIA DE PLANEJAMENTO PARA O CEARÁ 2050

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Elétrica do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para a obtenção do grau de Engenharia Eletricista.

Aprovada em: __/__/_____.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Paulo Cesar Marques de Carvalho (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. João José Hiluy Filho (Coorientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Raimundo Furtado Sampaio
Universidade Federal do Ceará (UFC)

AGRADECIMENTOS

A Deus, por me dar forças nos momentos de insegurança e fraqueza.

À minha família, em especial minha mãe, Maria do Socorro, e meus irmãos, Marcela e Paulo, por sempre acreditarem na minha capacidade e me apoiarem, pois não chegaria até aqui sozinha.

Ao Henrique Moreira, por escutar meus desabafos nos momentos de tristeza e medo e por acreditar em mim mesmo quando eu não acreditava.

Ao professor Dr. Paulo Cesar Marques de Carvalho por idealizar esse trabalho e pela excelente orientação, sempre disponível para esclarecer dúvidas e dar sugestões, com muita atenção e simpatia.

Ao professor Dr. João José Hiluy Filho por contribuir com esse trabalho como coorientador, tirando dúvidas e fornecendo material que auxiliasse na pesquisa.

Aos participantes da banca examinadora por disporem de seu tempo para ajudar e dar sugestões que contribuíram muito com esse trabalho.

Aos professores Dr. Raimundo Furtado Sampaio, Dr. Bismarck Claire Torrico, Dr. Fabrício Gonzalez Nogueira e Ph.D. Fernando Luiz Marcelo Antunes por tanto terem contribuído na minha formação como futura engenheira eletricista com seus ensinamentos, e com quem cursei disciplinas que me fizeram gostar mais do curso.

Ao técnico Jorge Antônio Morais Silveira pelas conversas e conhecimentos que ele compartilhava comigo antes e depois das aulas de laboratório.

Aos colegas com quem trabalhei no estágio por me ensinarem tanto sobre a engenharia elétrica, além do que eu poderia ver na faculdade.

À Sâmia, amiga de infância, por sempre me escutar e aconselhar.

Às amigas Isabela e Jéssica por terem passado comigo por momentos difíceis durante a faculdade que se tornaram mais leves por causa da companhia delas.

“Mesmo que a vida possa parecer ruim, sempre há algo que você pode fazer e ter sucesso.” (Stephen Hawking).

RESUMO

No âmbito do planejamento estratégico para o desenvolvimento do estado do Ceará, o programa Ceará 2050, coordenado pela Universidade Federal do Ceará, tem entre suas metas melhorar o aproveitamento dos recursos hídricos no estado, investimento na produção de energias renováveis, entre outras. Dentro deste contexto, o presente TCC tem como objetivo analisar o impacto hídrico causado pela geração de energia elétrica necessária para suprir o aumento no consumo de eletricidade no ano de 2050. Avaliando o consumo de energia elétrica entre 2006 e 2017, é possível estimar a sua evolução até 2050 através de uma técnica matemática chamada método dos mínimos quadrados. Ao chegar a um valor aproximado de consumo em 2050, são propostos diferentes cenários de geração de eletricidade para suprir o aumento no consumo. É calculado o impacto hídrico baseando-se em valores acerca do consumo de água na produção de energia elétrica, em sua maior parte pelos sistemas de resfriamento de termoelétricas. Para um consumo de aproximadamente 28438 GWh, o maior volume de água utilizado seria se todo o acréscimo de 17014 GWh, em relação a 2017, fosse suprido por termoelétricas a carvão com torres de resfriamento úmidas, totalizando aproximadamente 44 milhões de m³ em um ano. Considerando uma margem de erro de 20% no consumo, esse volume de água está entre 29,44 milhões de m³ e 59 milhões de m³ em um ano. Enquanto o menor impacto hídrico seria caso a geração fosse por usinas solares fotovoltaicas, eólicas ou termoelétricas com sistemas de resfriamento a ar. Assim, o presente trabalho pretende agregar informação que auxilie nas decisões de planejamento de geração de energia elétrica no Ceará.

Palavras-chave: Ceará 2050; impacto hídrico; consumo e geração de energia elétrica; sistemas de resfriamento.

ABSTRACT

Within the scope of strategic planning for the development of Ceará, the Ceará 2050 program, coordinated by the Federal University of Ceará, has among its goals to improve the use of water resources, renewable energy production investments, among others. Within this context, the purpose of this TCC is to analyze the water impact caused by the generation of electricity necessary to supply the increase in electricity consumption in the year 2050. Evaluating the electricity consumption between 2006 and 2017, it is possible to estimate its evolution until 2050 through a mathematical technique called least squares method. When reaching an approximate value of consumption in 2050, different situations of electricity generation are proposed to supply the increase in consumption. The water impact is calculated based on the values of the water consumption of electric energy production, mainly by the thermoelectric cooling systems. For a consumption of approximately 28,438 GWh, the largest volume of water used would be if the total increase of 17,014 GWh, compared to 2017, would be supplied by coal power stations with cooling towers, totaling approximately 44 million m³ in one year. Considering a margin of error of 20% in consumption, this volume of water is between 29.44 million m³ and 59 million m³ in one year. While the lowest water impact would be if the generation were by solar photovoltaic, wind or thermoelectric plants with air cooling systems. Thus, the present work intends to aggregate information that assists in the planning decisions of electric power generation in Ceará.

Keywords: Ceará 2050; water impact; electricity consumption and generation; cooling systems.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Matriz Elétrica Brasileira 2018	14
Figura 2 - UTEs Acima de 100 MW no Nordeste e Bacias Hidrográficas da Região	16
Figura 3 - Combustíveis e Ciclos de Potência de Usinas Termoelétricas	18
Figura 4 - Ciclo Rankine	19
Figura 5 - Porto do Pecém II	20
Figura 6 - Ciclo Brayton	20
Figura 7 - Usina Termo Ceará	21
Figura 8 - Ciclo Combinado	22
Figura 9 - Enel Geração Fortaleza	22
Figura 10 - Usina Termelétrica Luiz Oscar Rodrigues de Melo	23
Figura 11 - Sistemas de Resfriamento de Usinas Termoelétricas	24
Figura 12 - Circulação Aberta de Água	24
Figura 13 - Circulação Semifechada à Água com Torres Úmidas	25
Figura 14 - Usina Piratininga	26
Figura 15 - Resfriamento a Ar Utilizando Condensador	27
Figura 16 - Usina Valley Energy Center	27
Figura 17 - Resfriamento a Ar Utilizando Torre Seca	28
Figura 18 - Usina Presidente Médici	28
Figura 19 - Sistema Híbrido	29
Figura 20 - Consumo Global de Água na Produção de Energia	30
Figura 21 - Estimativas do Consumo de Água para Geração de Eletricidade	32
Figura 22 - Evolução no Consumo de Energia Elétrica no CE entre 2006 e 2017	34
Figura 23 - Estimativa do Consumo de Energia Elétrica no CE até 2050	35
Figura 24 - Impacto Hídrico Causado pelo Aumento no Consumo de Energia Elétrica no CE até 2050	39

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Participação de Fontes na Geração Termoelétrica no Brasil (2017)	14
Tabela 2 - Indicadores de Uso de Água em UTEs no Ceará	16
Tabela 3 - Consumo de Água na Produção de Energia Elétrica para Diferentes Combustíveis, Tecnologias e Sistemas de Resfriamento	31
Tabela 4 - Consumo de Energia Elétrica no CE entre 2006 e 2017 (GWh)	33
Tabela 5 - Cenários de Impacto Hídrico Devido ao Aumento no Consumo de Eletricidade .	37

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CA	Circulação Aberta de Água
CC	Ciclo combinado
CE	Ceará
CGTF	Central Geradora Termelétrica Fortaleza
CIPP	Complexo Industrial e Portuário do Pecém
CO ₂	Dióxido de carbono
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CS	Consumo Específico de Água na Produção de Energia
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
FV	Fotovoltaica
GEE	Gases do Efeito Estufa
hab	Habitantes
IEMA	Instituto de Energia e Meio Ambiente
NA	Não se aplica
NO _x	Óxido de nitrogênio
PIB	Produto Interno Bruto
PR	Piscina de Resfriamento
SNIS	Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento
TG	Turbina a gás
TR	Torre de resfriamento úmida
TV	Turbina a vapor
UFC	Universidade Federal do Ceará
UTE	Usina Termoelétrica

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	Objetivos	12
1.1.1	<i>Objetivo geral</i>	12
1.1.2	<i>Objetivos específicos</i>	12
1.2	Estrutura do Trabalho	13
2	INTRODUÇÃO ÀS MATRIZES ELÉTRICAS BRASILEIRA E CEARENSE	14
2.1	Matriz Elétrica Brasileira	14
2.2	Matriz Elétrica Cearense e Perfil das Termoelétricas no Ceará	15
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	18
3.1	Ciclos de Potência de Usinas Termoelétricas	18
3.1.1	<i>Ciclo Rankine</i>	19
3.1.2	<i>Ciclo Brayton</i>	20
3.1.3	<i>Ciclo combinado</i>	21
3.1.4	<i>Motores de combustão interna</i>	23
3.2	Sistemas de Resfriamento	23
3.2.1	<i>Circulação aberta de água</i>	24
3.2.2	<i>Circulação semifechada de água com torres úmidas</i>	25
3.2.3	<i>Resfriamento a ar</i>	26
3.2.4	<i>Sistemas híbridos</i>	29
3.2.5	<i>Comparação entre os tipos de sistemas de resfriamento</i>	29
4	CONSUMO DE ÁGUA NA PRODUÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA	30
5	IMPACTO HÍDRICO PREVISTO DEVIDO À EVOLUÇÃO DO CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA NO CEARÁ	33
5.1	Evolução no Consumo de Eletricidade no Ceará entre 2006 e 2017	33
5.2	Estimativa do Consumo de Energia Elétrica no Ceará até 2050	34
5.3	Impacto Hídrico	36
6	CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS	40
6.1	Conclusão	40
6.2	Trabalhos Futuros	41

1 INTRODUÇÃO

Em maio de 2018 houve um seminário, realizado no Centro de Eventos de Fortaleza, chamado “O Ceará que será em 2050”, com o intuito de discutir e reunir estratégias de desenvolvimento para os próximos 30 anos no estado do Ceará (CE), levando em consideração questões sociais, econômicas e ambientais (PROJETO..., 2018).

A iniciativa, coordenada pela Universidade Federal do Ceará (UFC), pretende traçar estratégias para acelerar o desenvolvimento do estado até 2050 em cinco principais áreas de planejamento: valor para a sociedade, setores econômicos, capital humano, governança colaborativa e prestação social de serviços. Entre as metas estão melhor aproveitamento dos recursos hídricos, o estado liderando setores como produção de energia renovável e tecnologia, entre outras (CAVALCANTE, 2018).

Desde 2012 o estado passa por um período de seca e, segundo pesquisadores da UFC, estima-se que para 2040 o cenário é de aumento de demanda de água e mais conflitos pela disponibilidade hídrica (ALENCAR, 2018). Nesse contexto e considerando o programa de planejamento Ceará 2050, o presente trabalho se propõe a estimar a evolução no consumo de energia elétrica até 2050, baseando-se no crescimento do consumo entre 2006 e 2017, e calcular o impacto hídrico causado pela geração de eletricidade para suprir esse aumento.

1.1 Objetivos

1.1.1 *Objetivo geral*

Estimar o impacto hídrico causado pela geração de energia elétrica, devido à evolução no consumo de eletricidade em 2050.

1.1.2 *Objetivos específicos*

Os objetivos específicos são:

- a) estimar a evolução no consumo de energia elétrica no Ceará até 2050, com base em dados entre 2006 e 2017, através de uma ferramenta matemática chamada método dos mínimos quadrados;
- b) calcular o impacto hídrico da geração de energia elétrica considerando diferentes alternativas de suprimento, com base em pesquisas que mostram o

consumo específico de água na produção de energia elétrica por diversos tipos de usinas em m³/GWh.

1.2 Estrutura do Trabalho

No capítulo 2 são apresentadas as matrizes elétricas brasileira e cearense, bem como o perfil das usinas termoelétricas (UTES) no Ceará e a captação de água das maiores UTES do estado, comparando o consumo de água dessas usinas com o consumo humano.

No capítulo 3 é explicado o funcionamento básico das UTES, os principais ciclos de potência e sistemas de resfriamento, pois o maior consumo de água se dá nos sistemas de refrigeração de UTES.

No capítulo 4 é mostrado o consumo de água na produção de energia elétrica de acordo com combustível, tecnologia de geração e sistemas de resfriamento.

No capítulo 5 é feita a estimativa do crescimento do consumo de energia elétrica para os próximos 30 anos no Ceará, e são consideradas diferentes tecnologias de geração para suprir esse aumento no consumo, com o objetivo de calcular o impacto hídrico.

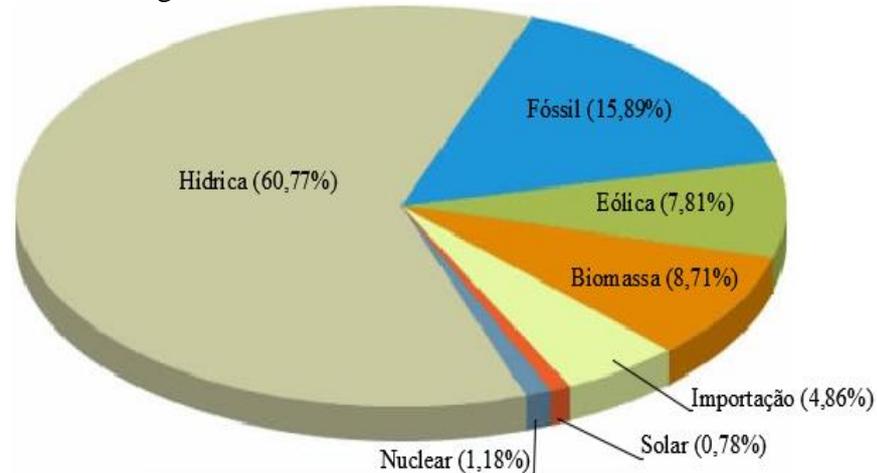
No quinto capítulo são apresentadas as conclusões e os trabalhos futuros.

2 INTRODUÇÃO ÀS MATRIZES ELÉTRICAS BRASILEIRA E CEARENSE

2.1 Matriz Elétrica Brasileira

A maior parte da matriz elétrica brasileira é composta por energias renováveis, sendo que cerca de 60% da geração de eletricidade é proveniente de usinas hidroelétricas. Logo em seguida vem a de origem fóssil, sendo as fontes, principalmente, carvão mineral, gás natural e petróleo (EPE, 2018). Mais detalhes podem ser observados na Figura 1.

Figura 1 - Matriz Elétrica Brasileira 2018



Fonte: Adaptada de (ANEEL, 2018)

Ainda que o uso de fontes de energia que causem o mínimo de impacto ambiental, como solar e eólica, esteja em crescimento no cenário nacional, essas fontes não são controladas, pois estão sujeitas às variações da irradiação solar e dos ventos, respectivamente. Portanto, na presente conjuntura, quando os reservatórios das hidroelétricas estão com o nível baixo, a principal alternativa é a utilização da termoeletricidade (CASTRO; BRANDÃO; VARDIERO, 2018).

Segundo a Empresa de Pesquisa Energética (EPE), em 2017 houve um aumento de 6% na geração termoelétrica no Brasil. Entre as fontes mais utilizadas estão o gás natural, a biomassa e o carvão (EPE, 2018), como pode-se ver na Tabela 1:

Tabela 1 - Participação de Fontes na Geração Termoelétrica no Brasil (2017)

Fonte	Porcentagem
Gás Natural	37,7%
Biomassa	29,5%
Carvão e derivados	12,9%
Derivados de Petróleo	10,8%
Nuclear	9,1%

Fonte: (EPE, 2018)

Segundo dados da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), no ano de 2018, o Brasil possuía mais de 43 GW de capacidade instalada de usinas térmicas de origem fóssil, nuclear e biomassa. São aproximadamente 26,7 GW de origem fóssil distribuídos entre 2439 usinas – 22 de carvão mineral, 167 de gás natural, 2249 de derivados de petróleo e uma proveniente de outros combustíveis fósseis. Tendo como fonte a biomassa são 559 usinas, totalizando 14,7 GW de capacidade, sendo a maioria de resíduos agroindustriais. De origem nuclear são apenas duas usinas, Angra I e Angra II, com potência total de quase 2 GW (ANEEL, 2018).

A geração de energia elétrica por meio da termoeletricidade ocasiona certa preocupação devido à emissão de gases do efeito estufa (GEE) que provém da utilização de combustíveis fósseis. Porém esse não é o único impacto ambiental causado pelas usinas termoeletricas (UTES), sendo um importante impacto o elevado consumo de água. No Brasil, a maioria das usinas usa sistemas de refrigeração a água, o que pode ser preocupante, principalmente em regiões que sofrem com a escassez hídrica, como o Ceará (IEMA, 2016).

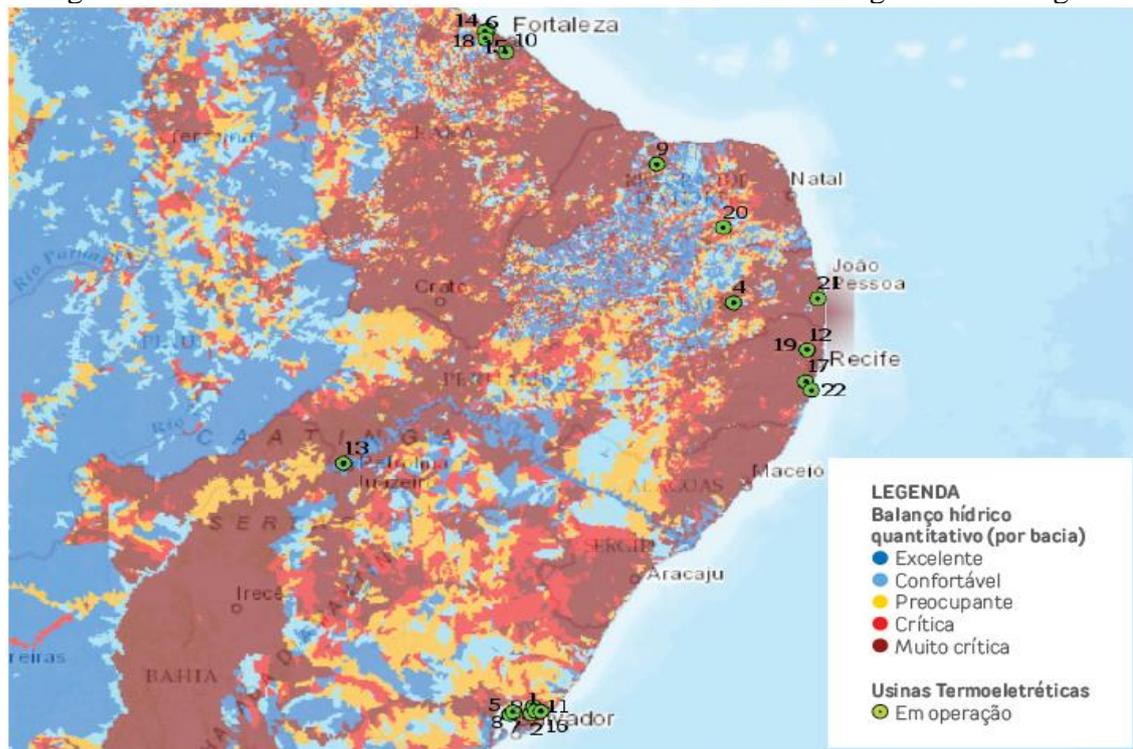
2.2 Matriz Elétrica Cearense e Perfil das Termoeletricas no Ceará

A maior parte da matriz elétrica do estado é proveniente de usinas termoeletricas (52,32%) e eólicas (47,53%). Em operação são 36 usinas termoeletricas, em que os combustíveis principais são o gás natural, óleo diesel e carvão mineral, totalizando mais de 2 GW de potência (ANEEL, 2018).

O Instituto de Energia e Meio Ambiente (IEMA) fez uma pesquisa sobre a vazão de água utilizada em usinas termoeletricas no Brasil, que utilizam combustíveis fósseis e com potência maior que 100 MW, totalizando 70 empreendimentos. O intuito era verificar os sistemas de resfriamento e analisar a eficiência deles de acordo com a captação e a perda de água. As pesquisas foram feitas com base em imagens de satélite e informações disponibilizadas pelos *sites* das usinas termoeletricas, pois dados sobre os sistemas de resfriamento das usinas não são de acesso ao público (IEMA, 2016).

Na pesquisa feita pelo IEMA foram analisadas cinco usinas no Ceará: Enel Geração Fortaleza, Maracanaú I, Porto do Pecém I, Porto do Pecém II e Termoceará. A Figura 2 mostra as UTES na região Nordeste com capacidade acima de 100 MW, bem como o estado das bacias hidrográficas da região. Os números indicam a usina a que se refere na Tabela 2 (sendo consideradas no presente trabalho, apenas as localizadas no Ceará).

Figura 2 - UTEs Acima de 100 MW no Nordeste e Bacias Hidrográficas da Região



Fonte: (IEMA, 2016)

Percebe-se que no Ceará, a situação das bacias hidrográficas próximas às usinas é de preocupante a muito crítica. Segundo dados do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS), o consumo médio de água no Ceará é 129,5 l/hab.dia (SNIS, 2018). Esse dado é utilizado para comparar a captação de água das UTEs com o consumo humano, conforme a Tabela 2.

Tabela 2 - Indicadores de Uso de Água em UTEs no Ceará

Mapa	Usina	Capacidade Instalada (MW)	Situação da Região	Captação (m ³ /h)	Captação (1000 hab.)	Perdas (m ³ /h)	Perdas (1000 hab.)
6	Enel Fortaleza	326,60	Muito Crítica	311,97	57,82	242,64	44,97
10	Maracanaú I	168,00	Muito Crítica	Volume extremamente baixo. Tecnologia de geração não demanda grandes sistemas de resfriamento.			
14	Porto do Pecém I	720,00	Muito Crítica	2052,78	380,44	1800,69	333,72
15	Porto do Pecém II	365,00	Crítica	1040,25	192,79	912,50	169,11
18	Termoceará	220,00	Muito Crítica	198,00	36,69	154,00	28,54

Fonte: Adaptada de (IEMA, 2016)

Das cinco usinas analisadas no Ceará, quatro necessitam de consumo de água para seus sistemas de resfriamento, apesar de estarem em regiões em que a situação dos recursos hídricos é crítica ou muito crítica (IEMA, 2016).

As UTEs do Complexo Portuário do Pecém têm autorização para captar até 70 milhões de litros de água por dia do açude Castanhão, o que daria para abastecer cerca de 600 mil habitantes, equivalente a três vezes a população da cidade de Maracanaú (ALTO..., 2017). No ano de 2018, esse açude, que é o principal reservatório hídrico da capital Fortaleza, entrou em operação com apenas 3% da sua capacidade, a pior situação desde 2002 (COM SECA..., 2018).

Sendo o Ceará um estado que apresenta períodos de pouca chuva, é importante o estudo dos sistemas de refrigeração das usinas, bem como dos ciclos termodinâmicos para que a geração de energia elétrica não cause problemas socioeconômicos em relação ao consumo de água na região.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

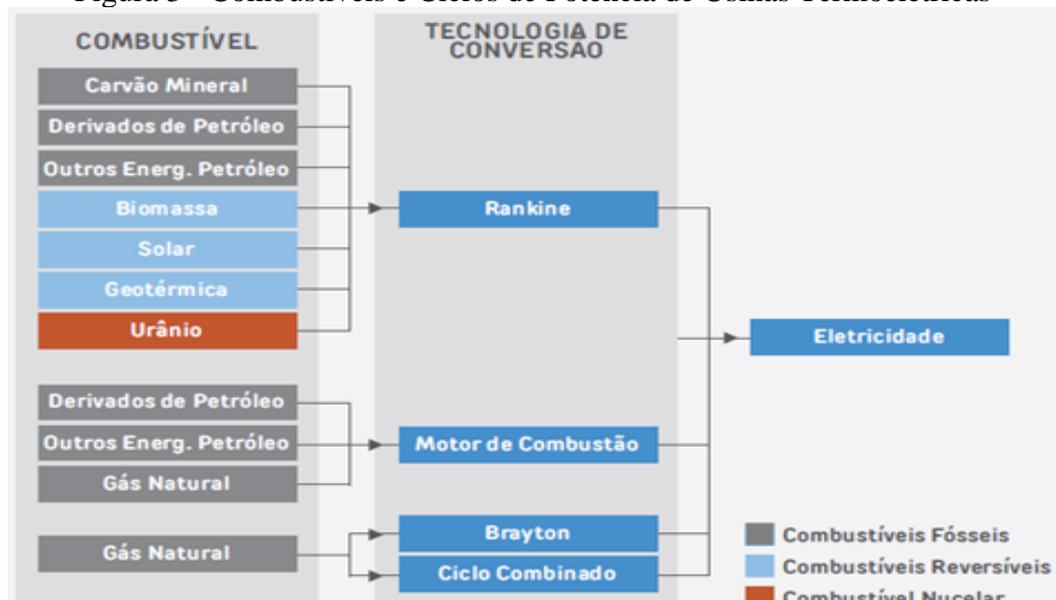
As usinas termoeletricas têm como princípio básico de funcionamento a conversão de energia térmica em energia mecânica, a qual aciona uma turbina acoplada a um gerador elétrico. Existem diversos combustíveis utilizados, sendo os principais: carvão mineral, petróleo, gás natural e nuclear (BORGES NETO; CARVALHO, 2012). O gás natural, que tem a maior participação na geração termoeletrica brasileira (ver Tabela 1), emite menos dióxido de carbono (CO₂) que outros combustíveis fósseis, e as usinas que o utilizam como fonte térmica podem ser acionadas para o atendimento das demandas de ponta (EPE, 2016).

A eficiência desse tipo de usina depende principalmente da quantidade de calor rejeitada pelo sistema, ou seja, quanto menor a parcela de energia térmica convertida em eletricidade, menor a eficiência da usina (IEMA, 2016). Os principais fatores que influenciam na quantidade de calor perdido são os ciclos de potência e os sistemas de resfriamento.

3.1 Ciclos de Potência de Usinas Termoeletricas

Os quatro principais e mais utilizados ciclos de potência de UTEs são: Rankine, Brayton, ciclo combinado e motor a combustão (IEMA, 2016). A Figura 3 mostra qual o ciclo mais apropriado para cada tipo de combustível e a seguir será estudado mais detalhadamente cada um dos quatro principais ciclos a fim de se obter um maior embasamento para o estudo dos sistemas de refrigeração.

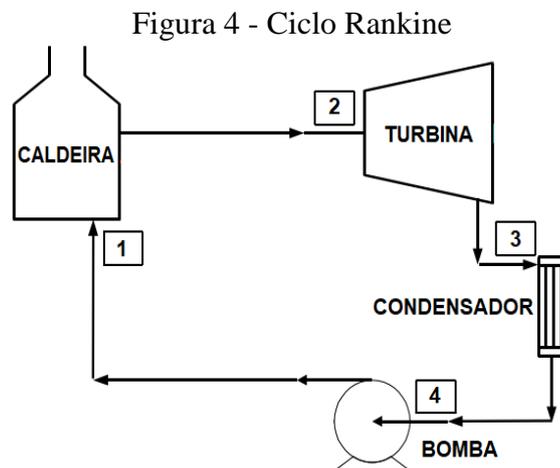
Figura 3 - Combustíveis e Ciclos de Potência de Usinas Termoeletricas



Fonte: (IEMA, 2016)

3.1.1 Ciclo Rankine

O ciclo Rankine é o ciclo padrão de potência a vapor, onde são utilizadas turbinas a vapor, que são máquinas rotativas de combustão externa. Nesse tipo de máquina a mistura ar/combustível não entra em contato com o fluido de trabalho, que geralmente é água desmineralizada (EPE, 2016). Nesse ciclo, vapor de água é produzido em uma caldeira (1), a pressão constante, através da queima de um combustível; então o vapor é expandido na turbina (2) que está acoplada a um gerador elétrico; após passar pela turbina, o vapor segue para um condensador (3) onde calor é liberado para o meio ambiente, utilizando como fluido refrigerante água e/ou ar; o fluido condensado é bombeado (4) de volta a caldeira (IEMA, 2016). A Figura 4 resume o princípio de funcionamento do ciclo Rankine.



Fonte: Adaptada de (FRANKLIN, s.a.)

A eficiência de usinas termoeletricas que operam com o ciclo Rankine está entre 25 e 45%, sendo que do calor produzido a partir da queima do combustível, 10 a 15% é perdido na chaminé e de 45 a 55% no condensador (IEMA, 2016).

No Ceará, um exemplo de usina operando em ciclo Rankine é a Porto do Pecém II (Figura 5), instalada no Complexo Industrial e Portuário do Pecém (CIPP) em São Gonçalo do Amarante, que utiliza carvão mineral como combustível e possui capacidade instalada de 365 MW (ENEVA, s.a.).

Figura 5 – Porto do Pecém II

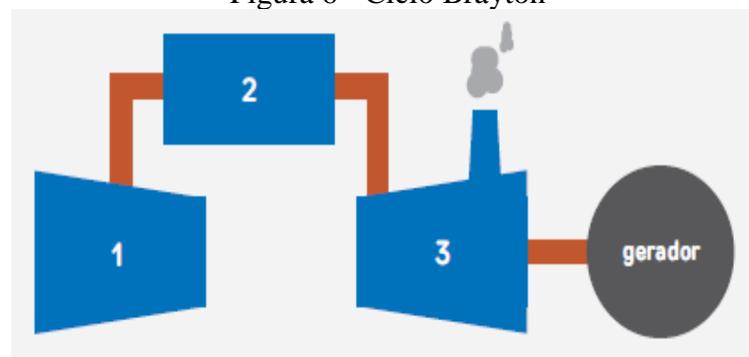


Fonte: (ENEVA, 2018)

3.1.2 Ciclo Brayton

As turbinas a gás baseiam-se no ciclo Brayton, em que o ar entra em um compressor (1), onde ocorre aumento da pressão e da temperatura; o ar aquecido segue para a câmara de combustão (2) onde acontece aumento de temperatura a pressão constante, ocasionando expansão nos gases; esses acionam a turbina que está acoplada a um gerador elétrico (3) (EPE, 2016). Os gases quentes que acionam a turbina são liberados na atmosfera, que constitui a fonte fria, eliminando a necessidade de sistemas de resfriamento presentes no ciclo Rankine (IEMA, 2016). O esquema básico de funcionamento do ciclo Brayton pode ser observado na Figura 6.

Figura 6 - Ciclo Brayton



Fonte: (IEMA, 2016)

Por conta da ausência de sistemas de resfriamento para condensar vapor nesse ciclo, as usinas que o utilizam são pouco dependentes do consumo de água. Exceto os casos em que esse tipo de usina utiliza injeção de água ou vapor na turbina a gás para aumentar a

potência gerada, além de reduzir a emissão de óxidos de nitrogênio (NO_x). Um estudo feito em relação ao consumo de água em ciclos de potência indica que a injeção de vapor em turbinas a gás demanda cerca de $0,94 \text{ m}^3/\text{MWh}$ de água (IEMA, 2016).

Outra exceção são as usinas que utilizam resfriamento evaporativo nas turbinas a gás para evitar perda de potência em condições de baixa umidade e temperatura elevada. A reposição de água para esse caso está entre $0,02$ e $0,04 \text{ m}^3/\text{MWh}$. Sendo que a uma temperatura de 42°C e umidade relativa de 10%, a evaporação de água é da ordem de $0,06 \text{ m}^3/\text{MWh}$ (IEMA, 2016).

Uma usina operando com ciclo Brayton tem uma eficiência de no máximo 39%, sendo mais vantajoso trabalhar-se com ciclo combinado (IEMA, 2016).

Um exemplo de usina operando com ciclo Brayton no Ceará é a Usina Termoceará que possui 220 MW de capacidade instalada (PETROBRAS, s.a.). A vista aérea dessa usina pode ser vista na Figura 7.

Figura 7 - Usina Termoceará

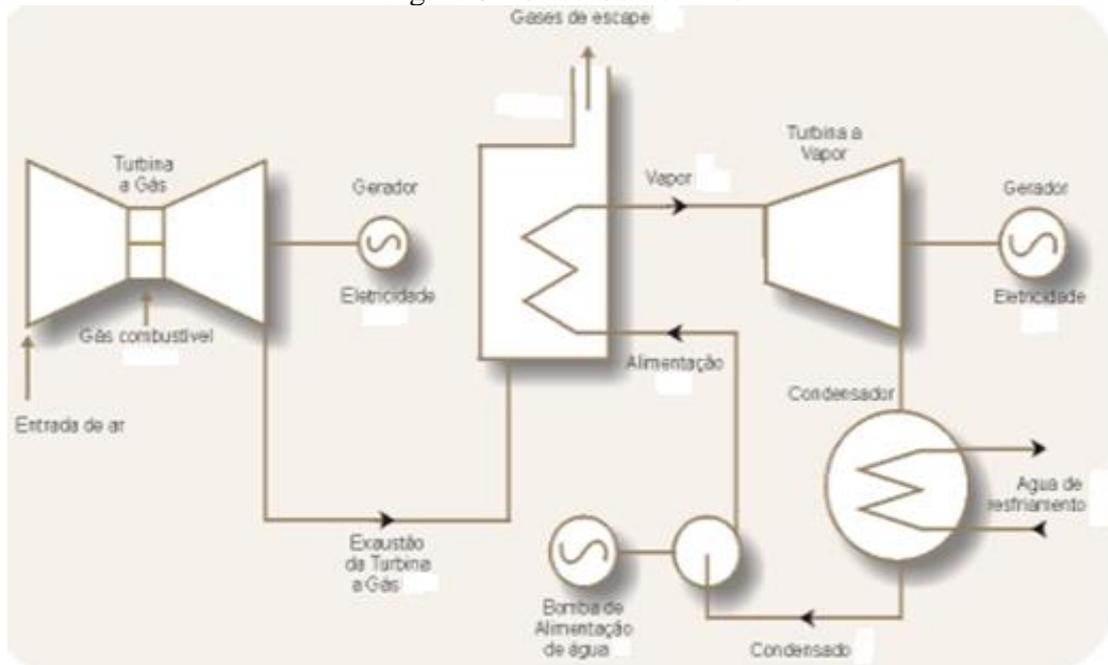


Fonte: (PETROBRAS, s.a.)

3.1.3 *Ciclo combinado*

A combinação de um ciclo simples de turbina a gás (ciclo Brayton) com um ciclo simples a vapor (ciclo Rankine) resulta no chamado ciclo combinado. De forma que os gases liberados a alta temperatura da turbina a gás serão a fonte para produzir o vapor da turbina a vapor, não necessitando de queima de combustível adicional. Dessa forma, a eficiência do sistema é aumentada, estando entre 55 e 58%, com perspectivas de atingir até 63% (EPE, 2016). A Figura 8 mostra um exemplo de ciclo combinado.

Figura 8 - Ciclo Combinado



Fonte: Adaptada de (TERMELÉTRICAS..., 2013)

Um exemplo de usina operando a ciclo combinado no Ceará é a Enel Geração Fortaleza (antiga Central Geradora Termelétrica Fortaleza – CGTF) que integra o CIPP. Possui uma capacidade de geração de 326,6 MW (ENEL, s.a.). Essa usina pode ser observada na Figura 9.

Figura 9 – Enel Geração Fortaleza



Fonte: (ZARFENAS, 2007)

3.1.4 Motores de combustão interna

Nos motores de combustão interna, o combustível é queimado internamente, onde a conversão de energia térmica em mecânica se dá através de um mecanismo contendo pistão, biela e virabrequim (LUZ, 2013). Esses motores são mais utilizados em sistemas descentralizados para a geração de energia elétrica. Da mesma forma que acontece com as turbinas a gás no ciclo Brayton, esse tipo de usina não possui dependência significativa de água para resfriamento (IEMA, 2016).

A Figura 10 mostra a Usina Termelétrica Luiz Oscar Rodrigues de Melo, localizada em Linhares no Espírito Santo (ES), que possui vinte e quatro grupos geradores estacionários acionados por motores de combustão interna, com capacidade total instalada de 205 MW (LINHARES, s.a.).

Figura 10 - Usina Termelétrica Luiz Oscar Rodrigues de Melo

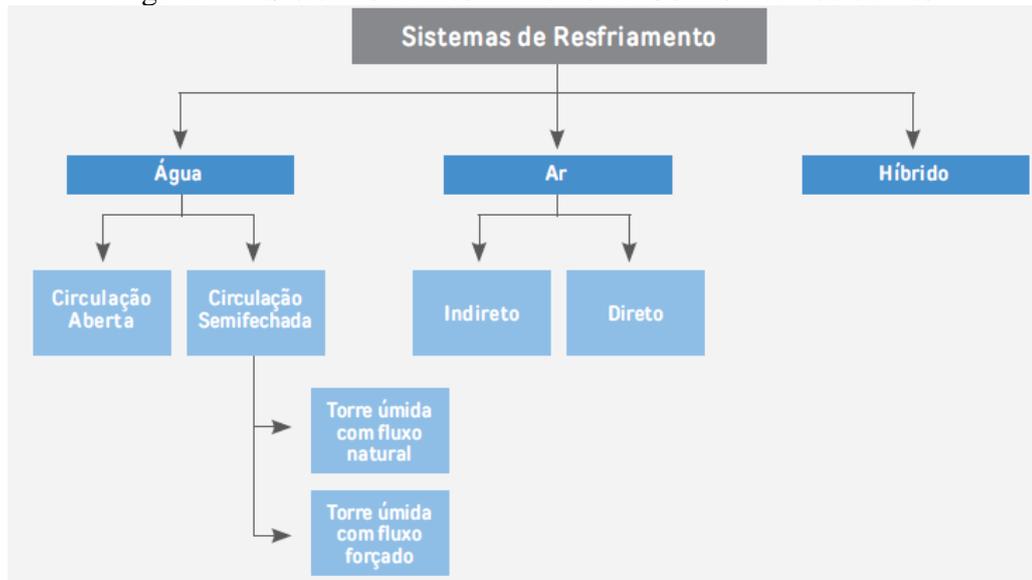


Fonte: (LINHARES, s.a.)

3.2 Sistemas de Resfriamento

Nos ciclos Rankine e combinado é necessária a presença de sistemas de resfriamento do vapor d'água, podendo o calor ser transferido para a água (sistemas úmidos) ou para o ar (sistemas a seco). Os principais tipos são: resfriamento a água em circulação aberta e semifechada, resfriamento a ar e resfriamento híbrido (IEMA, 2016). A Figura 11 resume os principais tipos de resfriamento utilizados nas usinas termoeletricas.

Figura 11 - Sistemas de Resfriamento de Usinas Termoelétricas

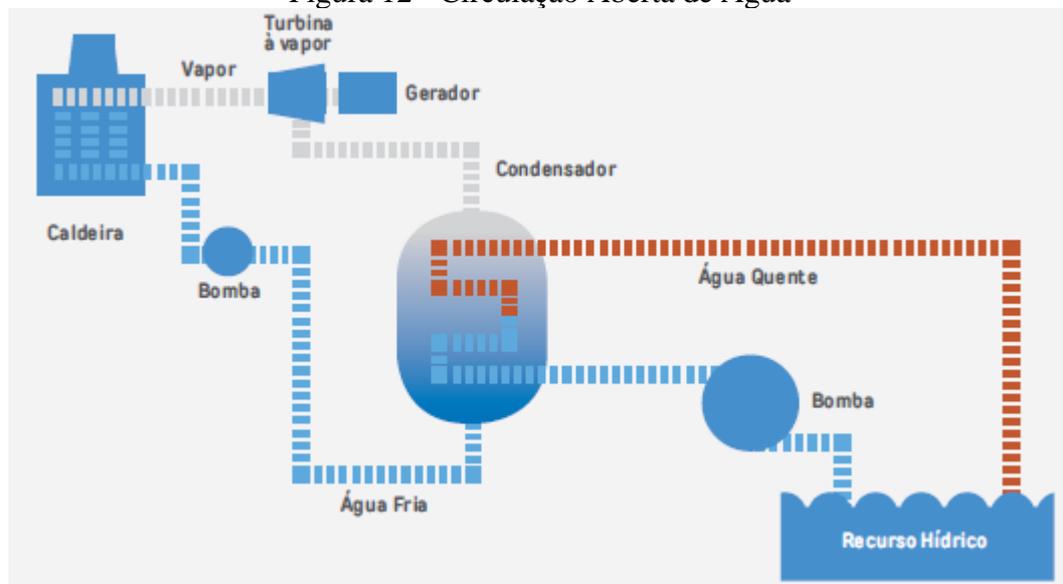


Fonte: (IEMA, 2016)

3.2.1 Circulação aberta de água

No sistema aberto, a água é retirada de um reservatório hídrico (natural ou não), bombeado ao condensador e devolvida à sua fonte. Estima-se que a vazão de água utilizada em usinas a carvão, operando em ciclo Rankine, esteja entre 76 e 189 m³/MWh (FRANCISCO, 2018). Para a operação em ciclo combinado, essa vazão está entre 40 e 120 m³/MWh. Como a água de resfriamento volta com maior temperatura ao reservatório (entre 8 e 17°C), há uma perda na vazão da ordem de 2% devido à evaporação (IEMA, 2016). A Figura 12 mostra o esquema de funcionamento da circulação aberta.

Figura 12 - Circulação Aberta de Água



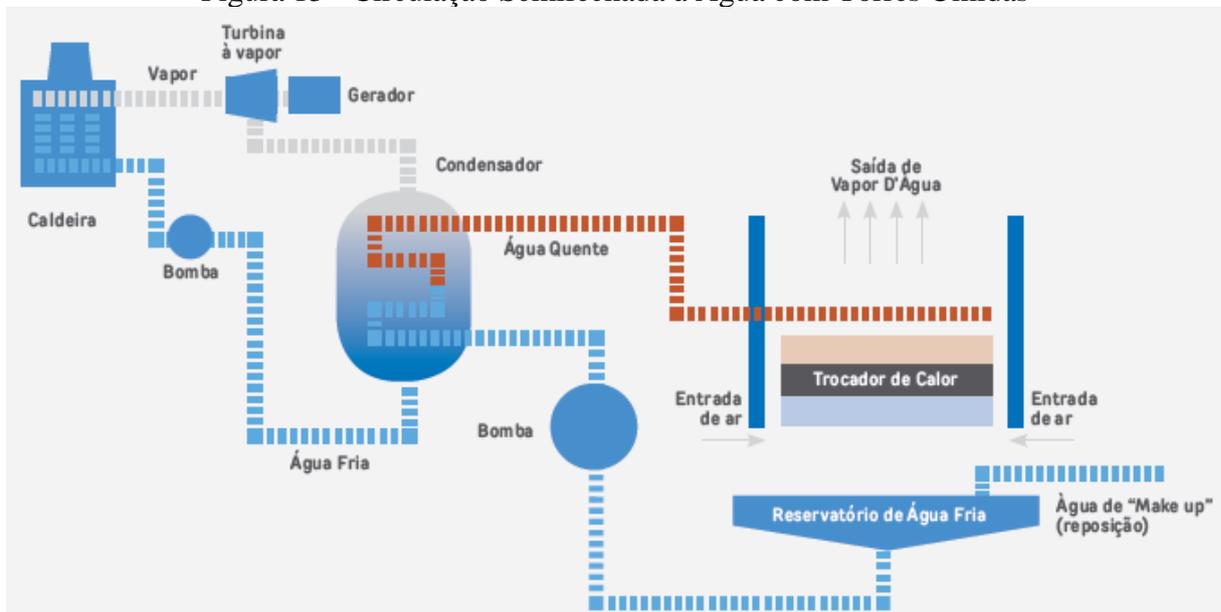
Fonte: (IEMA, 2016)

Esse sistema de resfriamento é o mais simples (menor quantidade de equipamentos), com menor custo de manutenção e maior eficiência na troca de calor entre a água captada e o vapor. Porém, esse sistema tem uma grande desvantagem, a poluição térmica, que é o aumento da temperatura da água de uma fonte hídrica natural, devido à descarga de água quente proveniente do condensador (FRANCISCO, 2018). Segundo a Resolução nº 430 de 13 de maio de 2011 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), os efluentes lançados devem estar abaixo de 40 °C, sendo que no limite da zona de mistura, a variação da temperatura do corpo receptor não deve ultrapassar 3°C (MMA, 2011).

3.2.2 Circulação semifechada de água com torres úmidas

No sistema com circulação semifechada de água com torres úmidas, a torre dissipa o calor da água utilizando corrente de ar ascendente e então a água é circulada novamente. A vazão captada está na faixa de 2,0 a 5,0 m³/MWh para usinas operando em ciclo Rankine, e de 0,9 a 2,5 m³/MWh para ciclo combinado. Entre 70 e 80% dessa vazão é perdida devido à evaporação, entre outras causas. Portanto, não é indicada sua instalação em locais com escassez hídrica (IEMA, 2016). Na Figura 13 observa-se o esquema desse sistema.

Figura 13 - Circulação Semifechada à Água com Torres Úmidas



Fonte: (IEMA, 2016)

O esquema mostrado na Figura 13 é de uma torre úmida com tiragem natural, ou seja, o movimento do ar é causado apenas pela diferença de densidade do ar na entrada e na saída da torre. A altura desse tipo de torre pode chegar até 170 m. Também há torres com

tiragem forçada, em que a circulação do ar é provocada por ventiladores. Essas torres não necessitam ser tão altas, já que o fluxo do ar não é dependente da densidade, e geralmente não ultrapassam 30 m (IEMA, 2016).

Na Figura 14 observa-se a Usina Piratininga, localizada em São Paulo, que possui potência instalada de 190 MW, e suas torres de resfriamento (PETROBRAS, s.a.).

Figura 14 - Usina Piratininga



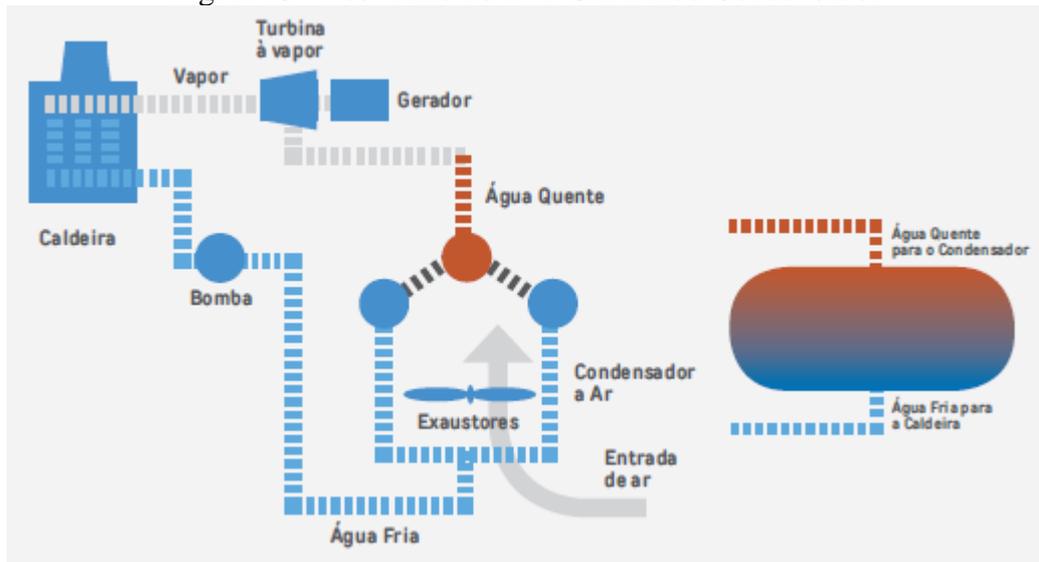
Fonte: (PETROBRAS, s.a.)

3.2.3 Resfriamento a ar

No sistema de resfriamento a ar, utiliza-se convecção e radiação como base para a refrigeração, podendo ser um sistema direto (condensadores a ar) ou indireto (torre seca). Como o fluido utilizado é o ar, não há perdas de água e não é necessária a vazão de reposição. Além disso, existe uma maior flexibilidade na escolha do local de implantação da usina, pois não possui a necessidade de estar próxima a uma fonte hídrica. Porém esse sistema também tem muitas desvantagens, como o maior custo de instalação e operação e menor eficiência na transferência de calor se comparado ao sistema a água (FRANCISCO, 2018).

No sistema direto, o vapor proveniente da turbina é resfriado utilizando ventiladores para criar o fluxo de ar em volta do condensador. O vapor condensado é armazenado em um tanque e depois volta à caldeira (FRANCISCO, 2018). Na figura 15 é possível observar esse sistema de resfriamento.

Figura 15 - Resfriamento a Ar Utilizando Condensador



Fonte: (IEMA, 2016)

Na Figura 16 tem-se um exemplo de usina termoeletrica que utiliza resfriamento com condensadores a ar: a *Valley Energy Center* em Wawayanda, Nova Iorque – Estados Unidos, com 680 MW de capacidade e ciclo combinado (FRANCISCO, 2018).

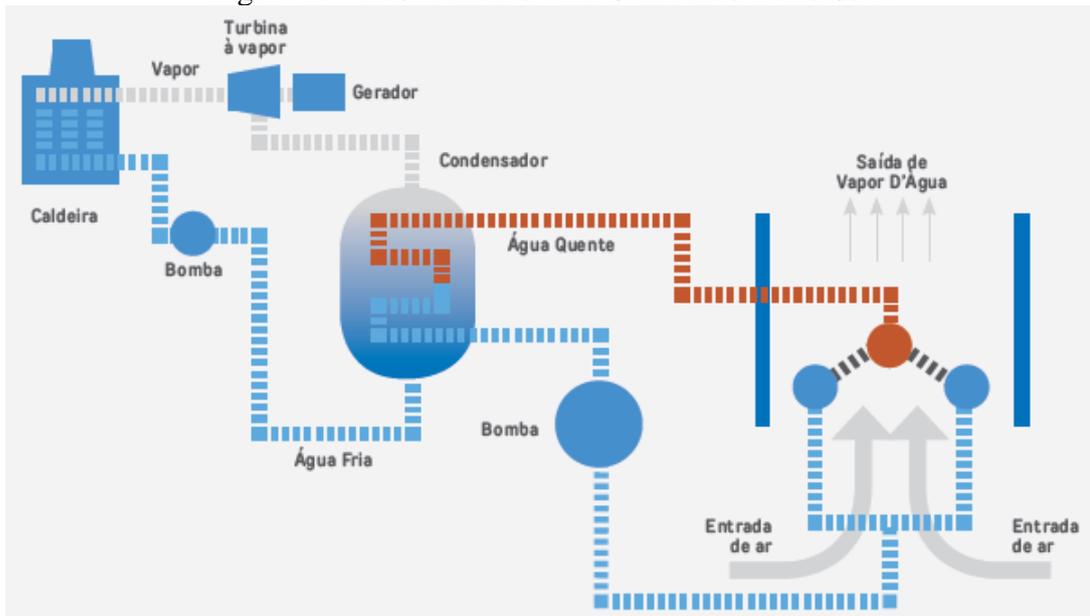
Figura 16 – Usina Valley Energy Center



Fonte: (AWALT, 2017)

No sistema indireto, é utilizada água como fluido auxiliar para resfriar o vapor que sai da turbina. Em seguida, a água é resfriada em uma torre seca e retorna para o ciclo termodinâmico (IEMA, 2016). A Figura 17 exemplifica esse sistema de resfriamento.

Figura 17 - Resfriamento a Ar Utilizando Torre Seca



Fonte: (IEMA, 2016)

Um exemplo de resfriamento a ar com sistema indireto está no Brasil, a Usina Presidente Médici, em Candiota – Rio Grande do Sul, que é a mais antiga usina a carvão do país (IBAMA, 2016). Essa é a única usina termoeétrica a utilizar resfriamento a ar no Brasil (Figura 18) (IEMA, 2016).

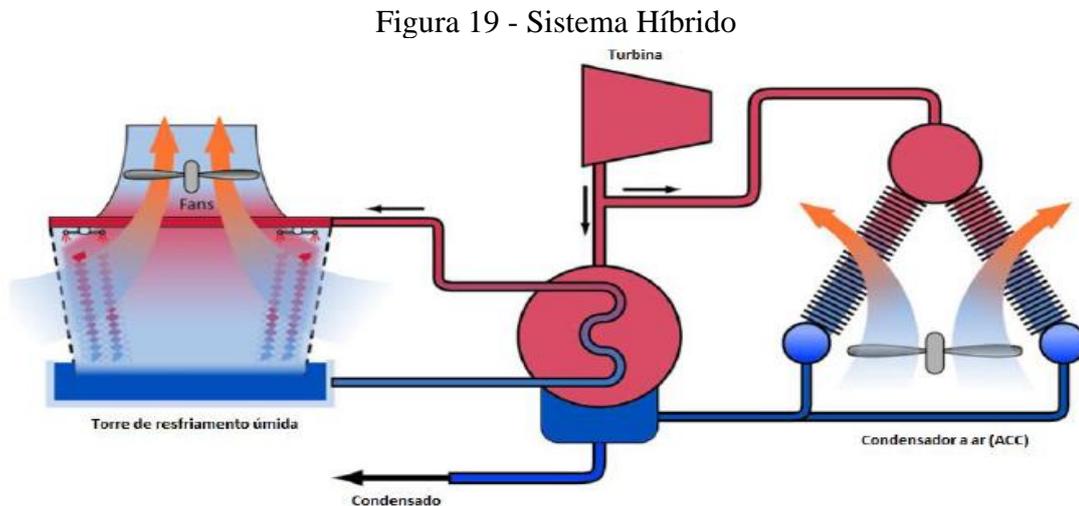
Figura 18 - Usina Presidente Médici



Fonte: (IBAMA, 2016)

3.2.4 Sistemas híbridos

Os sistemas híbridos operam com equipamentos para resfriamento a água e a ar, podendo trabalhar em conjunto ou separadamente. Em geral, são projetados para operar com o resfriamento a ar, utilizando o sistema úmido apenas durante períodos mais quentes (FRANCISCO, 2018). O sistema não é muito utilizado por apresentar custos muito elevados ao comparar-se com os demais tipos de resfriamento (IEMA, 2016). A Figura 19 mostra um esquema de uma termoelétrica utilizando sistema híbrido.



3.2.5 Comparação entre os tipos de sistemas de resfriamento

Os sistemas de resfriamento a ar possuem maior custo de implementação ao comparar-se com os que utilizam resfriamento a água, podendo aumentar entre 4 e 15% o custo da usina. Os custos de operação dependem de muitos fatores, como cobrança do uso da água e custo do sistema de tratamento de água. Mas uma grande vantagem dos sistemas a seco é a diminuição considerável do impacto ambiental. Isso é um fator muito importante, principalmente em regiões que sofrem com a escassez hídrica, como o estado do Ceará (IEMA, 2016).

É importante ressaltar que para usinas com mesma capacidade, o sistema de resfriamento terá maior influência no uso de água do que na eficiência da usina. Mas para plantas de mesma capacidade e mesmo sistema de resfriamento, a eficiência tem efeito considerável sobre o consumo de água. Sendo assim, um aumento na eficiência reduz a quantidade de calor rejeitada no condensador, diminuindo assim o uso de água no sistema de resfriamento (IEMA, 2016).

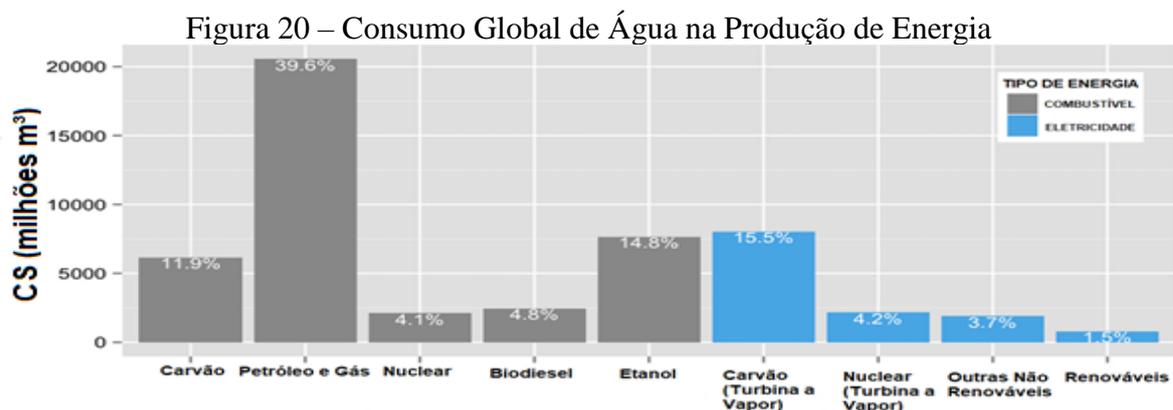
4 CONSUMO DE ÁGUA NA PRODUÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

Para a produção de recursos energéticos é necessária a utilização de água, incluindo extração e processamento de combustível, bem como geração de eletricidade. Dados de 2014 indicam um consumo de água para a produção de energia em 150 países de 52 bilhões m³, anualmente. A quantidade e a qualidade da água demandada variam significativamente de acordo com o tipo de energia e a tecnologia empregada no seu processamento (SPANG *et al.*, 2014).

Para avaliar esse impacto é utilizado o conceito de pegada hídrica, que consiste no volume de água usado na produção de bens e serviços, direta ou indiretamente. Há três tipos de pegadas hídricas: a verde, que provém da água da chuva armazenada no solo; a azul, que é proveniente de recursos hídricos superficiais ou subterrâneos; e a cinza, que é o volume necessário para diluir poluentes até que a água afetada esteja com qualidade aceitável (WATER..., s.a.).

Na análise do consumo da água para produção de energia é empregado um indicador chamado consumo específico de água na produção de energia (CS). O CS tem um conceito parecido com o da pegada hídrica, mas é mais focado na pegada hídrica azul, mais especificamente no uso de água por processos e tecnologias na produção de energia. A presente pesquisa é dedicada à produção de energia elétrica, sendo excluída a perda de água por evaporação nos reservatórios de usinas hidroelétricas. Também não foi incluída a água gasta na fabricação de equipamentos, ou na construção de usinas (SPANG *et al.*, 2014).

A eletricidade é responsável por cerca de 24,9% do consumo de água na produção de energia (CS) em escala global, o que representa 12895 milhões de m³ de água (SPANG *et al.*, 2014). Na Figura 20 é apresentado o CS total mundial dividido em categorias de combustível e eletricidade.



Fonte: Adaptada de (SPANG *et al.*, 2014)

O consumo de água na geração de energia elétrica varia significativamente de uma tecnologia para outra, em relação ao tipo de combustível e o tamanho da usina. A maior parte do gasto de água na geração de eletricidade está nos sistemas de resfriamento de usinas termoelétricas, devido ao seu alto calor específico, a água é um ótimo condutor de calor e um fluido com boas características para ser utilizado em sistemas de resfriamento. Algumas usinas utilizam água do mar ou o ar para resfriar o vapor que sai das turbinas, mas a grande maioria usa água potável (SPANG *et al.*, 2014). Na Tabela 3 encontra-se o consumo de água em m³/GWh, de acordo com o combustível, tecnologia e sistema de resfriamento.

Tabela 3 – Consumo de Água na Produção de Energia Elétrica para Diferentes Combustíveis, Tecnologias e Sistemas de Resfriamento

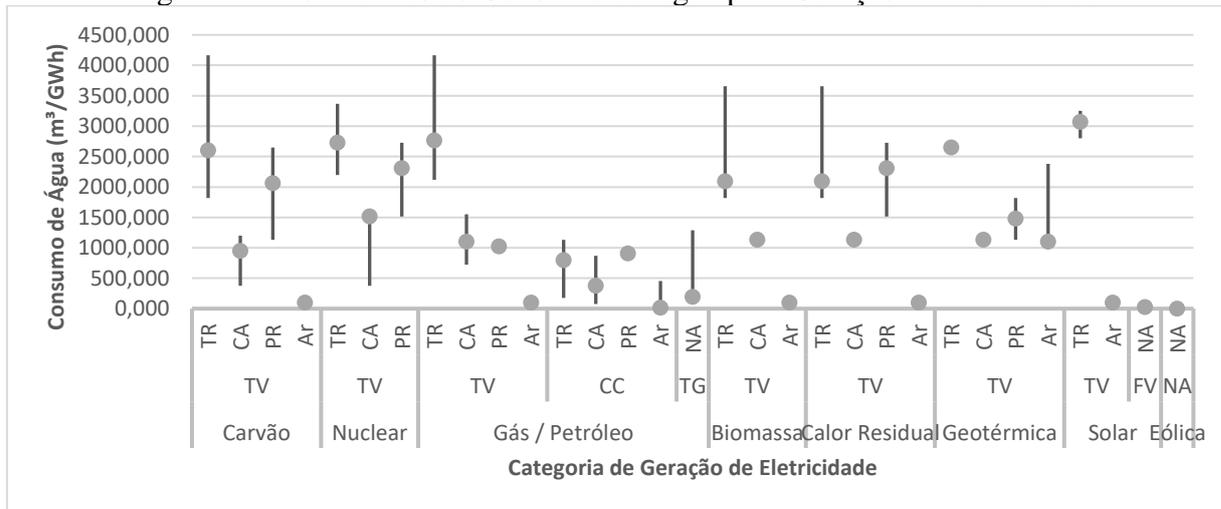
Categoria da Geração de Eletricidade			Fator de Capacidade	Consumo de Água (m ³ /GWh)		
Combustível	Tecnologia (1)	Resfriamento (2)		Estimativa (3)	Mínimo	Máximo
Carvão	TV	TR	0,85	2599,198	1817,999	4165,197
		CA	0,85	946,799	378,000	1198,799
		PR	0,85	2062,798	1133,999	2649,598
Nuclear	TV	Ar	0,85	97,200	97,200	97,200
		TR	0,90	2725,198	2195,998	3369,597
		CA	0,90	1515,599	378,000	1515,599
Gás Natural/ Petróleo	TV	PR	0,90	2307,598	1515,599	2725,198
		TR	0,85	2764,798	2120,398	4165,197
		CA	0,85	1097,999	719,999	1551,599
		PR	0,85	1022,399	1022,399	1022,399
	CC	Ar	0,85	97,200	97,200	97,200
		TR	0,85	795,599	176,400	1133,999
		CA	0,85	378,000	75,600	871,199
Biomassa	TV	PR	0,85	907,199	907,199	907,199
		Ar	0,85	14,400	14,400	453,600
		NA	0,85	190,800	190,800	1288,799
		TR	0,68	2091,598	1817,999	3653,997
Calor Residual	TV	CA	0,68	1133,999	1133,999	1133,999
		Ar	0,68	97,200	97,200	97,200
		TR	0,68	2091,598	1817,999	3653,997
Geotérmica	TV	CA	0,68	1133,999	1133,999	1133,999
		PR	0,68	2307,598	1515,599	2725,198
		Ar	0,68	97,200	97,200	97,200
		TR	0,84	2649,598	2649,598	2649,598
Solar	TV	CA	0,84	1133,999	1133,999	1133,999
		PR	0,84	1475,999	1133,999	1817,999
		Ar	0,84	1097,999	1022,399	2383,198
Eólica	FV	TR	0,32	3067,198	2800,798	3254,397
		Ar	0,32	97,200	97,200	97,200
Eólica	NA	NA	0,20	21,600	3,600	97,200
		NA	0,39	0,000	0,000	3,600

Fonte: Adaptada de (SPANG *et al.*, 2014)

- (1) Tipos de tecnologia de geração: TV (Turbina a Vapor), CC (Ciclo Combinado), TG (Turbina a Gás), FV (Fotovoltaica), NA (Não se Aplica).
- (2) Tipos de Resfriamento: TR (Torre de Resfriamento úmida), CA (Circulação Aberta de Água), PR (Piscina de Resfriamento).
- (3) Estimativas Baseadas na mediana.

Na Figura 21 são apresentados os dados da Tabela 3 representados graficamente.

Figura 21 - Estimativas do Consumo de Água para Geração de Eletricidade



Fonte: Adaptada de (SPANG *et al.*, 2014)

Percebe-se que na maioria dos casos, o consumo de água é maior em usinas que utilizam sistemas de refrigeração com torres de resfriamento do que naquelas que usam circulação aberta de água ou piscina de resfriamento. Porém, sistemas com circulação aberta de água retiram entre 20 e 50 vezes mais água da natureza do que aqueles com torres. Ainda que boa parte do volume de água captado seja devolvido à natureza, esse tipo de sistema é vulnerável a localidades onde há escassez hídrica (SPANG *et al.*, 2014).

Os sistemas a seco (a ar) consomem um volume de água consideravelmente menor se comparado aos úmidos, porém são menos eficientes, havendo uma perda na eficiência de cerca de 2%. Já as usinas solares FV e eólicas consomem pouca água, sendo geralmente para lavagem das placas FV ou das pás do aerogerador (SPANG *et al.*, 2014).

Analisando os dados da Tabela 3 e da Figura 21, nota-se que as tecnologias de geração de energia elétrica que mais consomem água são as de usinas termoeletricas, havendo variação entre o combustível utilizado e sistema de resfriamento. Por isso se faz necessário um estudo mais detalhado dos sistemas de refrigeração desse tipo de usina e como o uso da água pode afetar a região em que a central está localizada.

5 IMPACTO HÍDRICO PREVISTO DEVIDO À EVOLUÇÃO DO CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA NO CEARÁ

Nesse capítulo é apresentada a estimativa do consumo de energia elétrica no estado do Ceará até 2050, prevendo diferentes cenários de geração para suprir esse aumento previsto no consumo. O estudo proposto identifica o impacto hídrico causado pela geração de eletricidade, com base nos dados do consumo de água para produção de energia elétrica com uso de diferentes combustíveis, tecnologias e sistemas de resfriamento.

5.1 Evolução no Consumo de Eletricidade no Ceará entre 2006 e 2017

A primeira etapa do estudo proposto consistiu no levantamento dos dados de consumo de energia elétrica do Ceará entre os anos de 2006 e 2017. A seguir os dados de consumo foram estratificados por tipo de consumidor, a fim de se obter a taxa de crescimento anual para que se possa estimar o consumo para os próximos anos. Na Tabela 4 é mostrado o consumo de eletricidade no CE em setores importantes (residencial, industrial e comercial), durante os anos citados.

Tabela 4 – Consumo de Energia Elétrica no CE entre 2006 e 2017 (GWh)

Ano	Industrial	Residencial	Comercial	Outros	Total
2006	1931	2255	1261	1532	6979
2007	2034	2317	1330	1618	7299
2008	2047	2456	1424	1695	7623
2009	2072	2608	1511	1727	7918
2010	2224	2949	1685	2019	8876
2011	2313	3032	1712	1971	9028
2012	2383	3357	1883	2401	10025
2013	2498	3751	2043	2517	10809
2014	2456	4021	2183	2696	11357
2015	2407	3933	2254	2731	11326
2016	2698	4129	2318	2769	11914
2017	2383	4075	2260	2706	11424

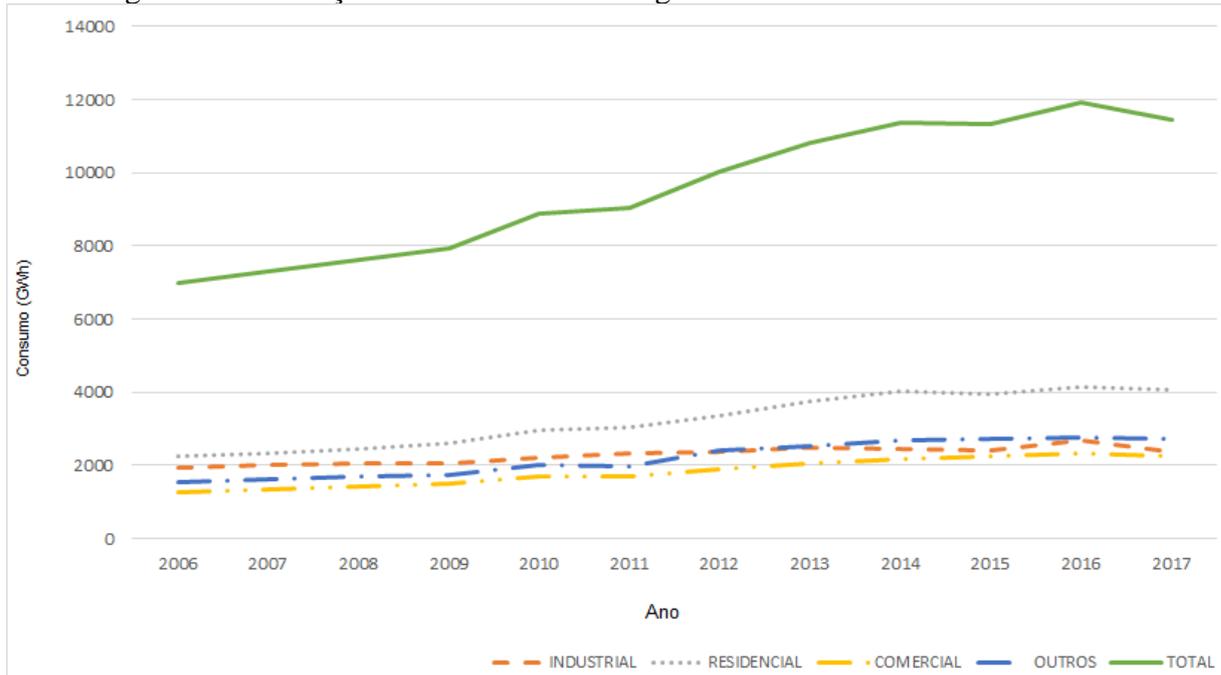
Fonte: (COSTA *et al.*, 2018; EPE, 2018)

Conforme pode ser observado na Tabela 4, a evolução no consumo de eletricidade, na maioria das vezes, acompanha o crescimento da economia no estado. Por exemplo, no ano de 2015 houve queda no consumo de energia elétrica em relação a 2014, sendo que em 2015 ocorreu um decréscimo de 3,48% no Produto Interno Bruto (PIB) do Ceará (VARELA, 2018). Entre 2002 e 2015 a economia no estado cresceu, em média, 3,5%

(CRESCIMENTO..., 2018), e, observando a Tabela 4, nota-se que entre 2006 e 2014 o consumo aumentou, acompanhando a ascensão da economia no período.

No gráfico da Figura 22 é apresentada a evolução no consumo de energia elétrica no Ceará entre 2006 e 2017 por tipo de consumidor e a tendência de crescimento do consumo total.

Figura 22 – Evolução no Consumo de Energia Elétrica no CE entre 2006 e 2017



Fonte: (COSTA *et al.*, 2018; EPE, 2018)

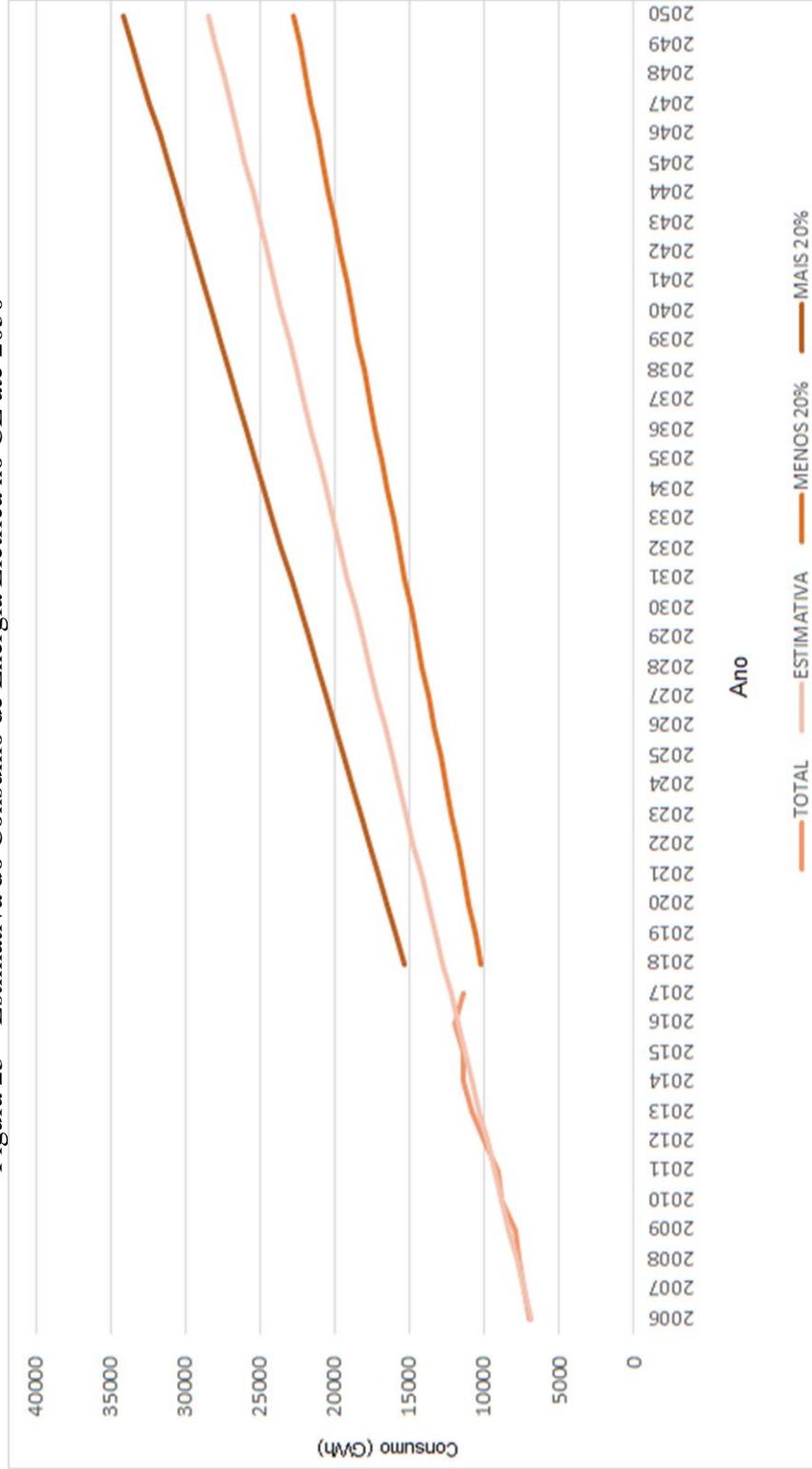
5.2 Estimativa do Consumo de Energia Elétrica no Ceará até 2050

Levando em consideração os dados de consumo de energia elétrica entre 2006 e 2017, utilizou-se a técnica de otimização matemática chamada método dos mínimos quadrados para gerar as retas de estimativa de consumo até o ano de 2050 com sua margem de erro, mostradas no gráfico da Figura 23. A Equação 1 é a equação da reta obtida pelo método dos mínimos quadrados.

$$\text{Consumo de energia elétrica no ano} = 490,7063 \times \text{Ano} - 9,7751 \times 10^5 \quad (1)$$

Na Figura 23 também se observam retas que representam os valores calculados através da equação 1 com uma margem de erro de mais ou menos 20%.

Figura 23 – Estimativa do Consumo de Energia Elétrica no CE até 2050



Fonte: elaborada pelo autor.

A partir da análise da reta de projeção do consumo até 2050, apresentada na Figura 23, estima-se que o consumo será de aproximadamente 28438 GWh. Este dado caracteriza um crescimento de 148,93% do consumo em relação ao ano de 2017. Considerando uma margem de erro de 20%, nesse ano o consumo previsto pode variar entre 22750 GWh e 34125 GWh, ou seja, um crescimento entre 99,15% e 198,72%.

5.3 Impacto Hídrico

Como citado anteriormente, em 2017 houve um consumo de 11424 GWh e a estimativa de consumo médio para 2050 é de 28438 GWh, totalizando um aumento no consumo de energia elétrica de 17014 GWh, que representa um crescimento percentual de 148,93%. A partir dessa estimativa, é possível prever o impacto hídrico no estado, definido como o volume de água utilizado pelas usinas de geração de energia elétrica em determinado período. O volume de água é calculado de acordo com a Equação 2, como sendo o produto da geração de eletricidade necessária para suprir o aumento no consumo (GWh), pelo CS (m^3/GWh).

$$\text{Impacto hídrico (m}^3\text{)} = \text{CS (m}^3\text{/GWh)} \times \text{Energia elétrica gerada (GWh)} \quad (2)$$

O presente estudo foi realizado considerando os seguintes diferentes cenários de abastecimento (e sistemas de resfriamento) para o estado:

- a) 100% do aumento de geração de eletricidade fornecido por UTEs a carvão;
- b) 100% por UTEs a gás natural;
- c) 50% a carvão e 50% a gás natural;
- d) abastecimento por usinas eólica e solar;
- e) semelhante ao cenário atual: 50% termoeletricas e 50% eólicas.

Na Tabela 5 são apresentados os resultados dos estudos dos impactos realizados para os diferentes cenários supracitados, considerando diferentes tecnologias e sistemas de resfriamentos.

Tabela 5 – Cenários de Impacto Hídrico Devido ao Aumento no Consumo de Eletricidade

Combustível	Tecnologia	Resfriamento	Impacto hídrico (10 ⁶ m ³)
100% Carvão	TV	TR	44,22
		CA	16,11
		PR	35,10
		Ar	1,65
100% Gás Natural / Petróleo	TV (1)	TR	47,04
		CA	18,68
		PR	17,40
		Ar	1,65
	CC	TR	13,54
		CA	6,43
		PR	15,44
		Ar	0,25
50% Carvão	TG	NA	3,25
	TV	TR	22,11
		CA	8,05
		PR	17,55
50% Gás Natural / Petróleo	TV (1)	TR	23,52
		CA	9,34
		PR	8,70
		Ar	0,83
	CC	TR	6,77
		CA	3,22
		PR	7,72
		Ar	0,12
100% Solar	TG	NA	1,62
	20% TV	TR	10,44
		Ar	0,33
100% Eólica	80% FV	NA	0,29
	NA	NA	0
50% Solar	10% TV	TR	5,22
		Ar	0,17
	40% FV	NA	0,15
50% Eólica	NA	NA	0

Fonte: elaborada pelo autor.

- (1) Apesar de aparecer a combinação de gás natural com turbina a vapor, esse arranjo não é muito utilizado porque o poder calorífico desse combustível é baixo, não sendo viável tecnicamente queimar e gerar vapor.

Conforme pode ser observado na Tabela 5 e no Gráfico da Figura 24, o maior impacto hídrico seria causado caso o suprimento se desse completamente por UTEs a carvão,

operando com turbina a vapor e utilizando torres úmidas no sistema de resfriamento. Para a geração no ano 2050 de 17014 GWh de energia elétrica, essas usinas necessitariam consumir 44,22 milhões de m³ de água em um ano, ou seja, mais de 120 milhões de litros de água por dia. Percebe-se que os piores impactos hídricos são causados por usinas que utilizam turbina a vapor e torres de resfriamento úmidas.

No atual panorama de abastecimento hídrico do Ceará, as possibilidades que requerem menor volume de água são as que não utilizam sistemas de resfriamento a água, UTEs a gás natural com turbina a gás ou ciclo combinado e resfriamento a ar, ou usinas eólicas e solares FV, ou ainda combinações entre essas tecnologias de geração. Para a solar, foi considerada a maior parte sendo suprida por FV, pois as que operam com turbina a vapor (heliotérmicas) ainda não possuem investimento no Ceará em 2018.

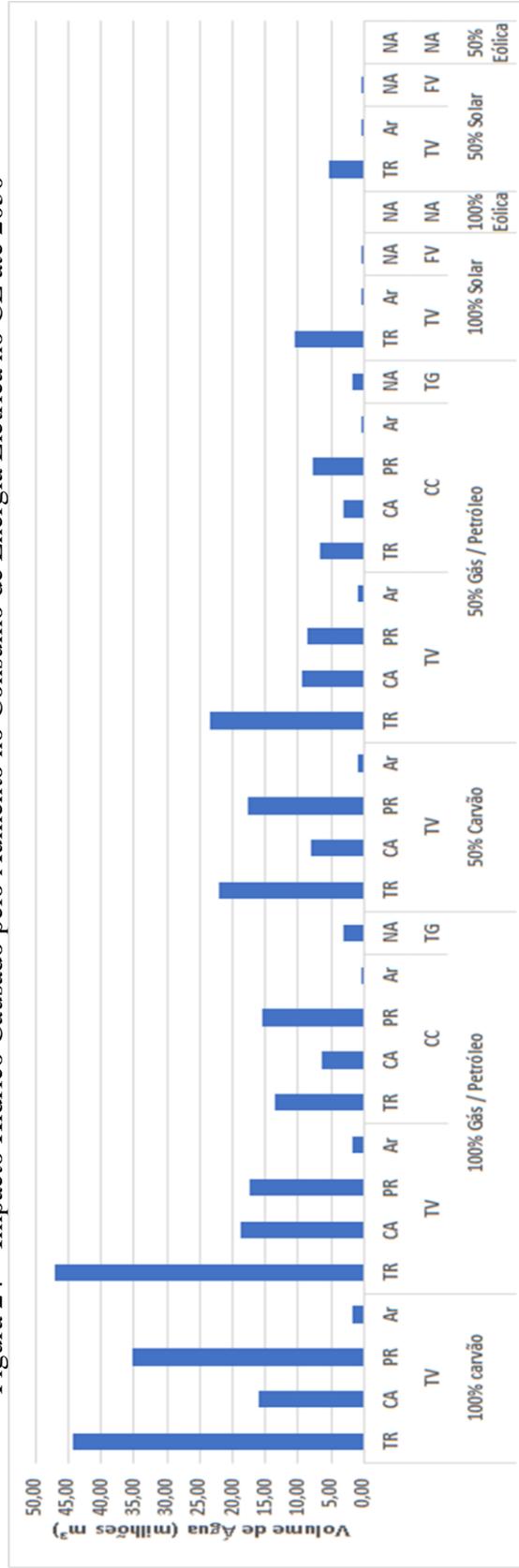
As UTEs com turbina a gás, apesar de não possuírem sistema de resfriamento, consomem água para outros propósitos (ver capítulo 3), porém em menor quantidade se comparada às que utilizam refrigeração a água, e causariam baixo impacto hídrico caso todo o aumento do consumo fosse fornecido por esse tipo de planta. Uma situação semelhante a atual, que é 50% do suprimento por eólica e 50% por UTEs (considerando usina a carvão com torre de resfriamento úmida), demanda um volume de água que ultrapassa 20 milhões de m³ em um ano.

Há interesse por parte do governo do estado em buscar investimentos para instalação de pelo menos duas termoelétricas no CE, cada usina com capacidade de 1 GW de potência. A estratégia é fazer do estado um grande polo de entrada de gás natural, o que impulsionaria outros setores da economia, como a indústria. Porém, especialistas cearenses não concordam com a ideia, alegando que se deve investir mais em projetos de energias renováveis (QUINTELA, 2018).

Do ponto de vista da situação hídrica do estado, investir em geração de energia elétrica por fontes renováveis causa menos impactos, como mostra o presente estudo. Por outro lado, a instalação de novas UTEs que sejam dependentes do consumo de água poderia causar mais conflitos em relação à disponibilidade hídrica do Ceará.

Na Figura 24 é apresentado o Gráfico ilustrando os resultados dos impactos do consumo obtidos a partir dos dados dos diferentes cenários, tecnologias e sistemas de resfriamentos apresentados na Tabela 5.

Figura 24 – Impacto Hídrico Causado pelo Aumento no Consumo de Energia Elétrica no CE até 2050



Fonte: elaborada pelo autor.

6 CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

6.1 Conclusão

As usinas termoeletricas podem ter um consumo considerável de água dependendo do sistema de resfriamento. Ao decidir a localização dessas plantas, deve ser levada em consideração a situação das bacias hidrográficas da região, pois acontece de haver empreendimentos localizados em lugares em que a situação das fontes hídricas não é adequada, o que pode causar conflitos entre vários setores, como irrigação, abastecimento público e indústria.

Em 2018, as usinas do CIPP têm autorização para retirar 70 mil m³ de água por dia do açude Castanhão, o que equivale a 25,55 milhões de m³ por ano. O estudo proposto indica que se todo o acréscimo de 17.014 GWh no consumo de energia elétrica previsto para o Ceará em 2050 for suprido por usinas que utilizam torres de resfriamento úmidas, como UTEs a carvão, serão necessários adicionalmente em torno de 44 milhões de m³ de água em um ano, ou mais de 120 mil m³ por dia. Considerando uma margem de erro de 20% no consumo, esse valor pode variar entre 29,44 milhões de m³ e 59 milhões de m³ em um ano. Esse volume de água foi calculado avaliando apenas o aumento previsto no consumo, não considerando a quantidade de água já consumida pelas usinas existentes em 2018. Somando o volume estimado com o que já é retirado, serão aproximadamente 190 mil m³ de água por dia.

Considerando o atual quadro de abastecimento hídrico do Ceará, conclui-se que não é viável o estado implantar apenas usinas que utilizam torres de resfriamento úmidas, como UTEs a carvão, tendo em vista aumentar em mais de duas vezes o volume de água consumido pela geração de eletricidade proporcionado por essa tecnologia.

A alternativa pode ser o uso de fontes de geração de energia elétrica que consumam quantidades baixas de água, como solar fotovoltaica e eólica. Conforme os resultados da pesquisa, também é observado que causam baixo impacto hídrico usinas que usam resfriamento a seco (a ar) e UTEs a gás natural.

Usinas de dessalinização também poderiam ser uma possibilidade para as UTEs retirarem água sem que houvesse conflitos entre outros setores que necessitam de abastecimento hídrico.

Assim, pretende-se que o presente estudo auxilie no planejamento da geração de energia elétrica do estado, como uma contribuição para o programa Ceará 2050, mostrando situações sob uma perspectiva do impacto hídrico.

6.2 Trabalhos Futuros

Como continuação do trabalho realizado, indica-se que sejam propostos outros cenários de geração de energia elétrica para o estado até 2050, além das mencionadas no presente estudo (usinas termoelétricas, solares e eólicas).

Seria interessante também fazer um paralelo com pesquisas que mostram previsões da situação hídrica do estado futuramente, ou ainda possibilidades de abastecimento hídrico para as usinas que não afetassem diretamente outros setores que também necessitam do consumo de água.

REFERÊNCIAS

- ALENCAR, Kevin. **O cenário do abastecimento hídrico de Fortaleza.** Agência UFC. Fortaleza, CE. 10 mai. 2018. Disponível em: < <http://www.agencia.ufc.br/qual-o-cenario-para-o-abastecimento-hidrico-de-fortaleza/>>. Acesso em: 28 nov. 2018.
- ALTO consumo de água na termelétrica do Pecém agrava ainda mais a crise hídrica. **Tribuna do Ceará.** Fortaleza, CE. 18 fev. 2017. Disponível em: < <http://tribunadoceara.uol.com.br/noticias/ceara/alto-consumo-de-agua-na-termeletrica-do-pecem-agrava-ainda-mais-a-crise-hidrica/>>. Acesso em: 27 set. 2018.
- ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. **Matriz de Energia Elétrica.** BIG – Banco de Informações de Geração. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/OperacaoCapacidadeBrasil.cfm>>. Acesso em: 18 nov. 2018.
- ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. **Matriz de Energia Elétrica.** BIG – Banco de Informações de Geração. Capacidade de Geração no Estado. Disponível em: < <http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/ResumoEstadual/CapacidadeEstado.cfm>>. Acesso em: 18 nov. 2018.
- AWALT, J. **Millennium’s Appeal Reaps Unexpected Benefits.** Pipeline & Gas Journal. Houston, Texas. Vol. 244, no. 12, dez. 2017. Disponível em: <<https://pgjonline.com/magazine/2017/december-2017-vol-244-no-12/features/millennium-s-appeal-reaps-unexpected-benefits>> Acesso em: 09 ago. 2018.
- BORGES NETO, Manuel Rangel; CARVALHO, Paulo. **Geração de Energia Elétrica: fundamentos.** 1. ed. São Paulo. Érica, 2012.
- CASTRO, Nivalde de; BRANDÃO, Roberto; VARDIERO, Pedro. **Novo papel das termoeletricas na matriz elétrica brasileira.** GESEL – Grupo de Estudos do Setor Elétrico – UFRJ. 19 jan. 2018. Disponível em: <<http://www.anacebrasil.org.br/noticias/novo-papel-das-termoeletricas-na-matriz-eletrica-brasileira/>>. Acesso em: 01 ago. 2018.
- CAVALCANTE, Irna. **Fortaleza elege as suas prioridades para o Ceará 2050.** O Povo. Fortaleza, CE. 17 mai. 2018. Disponível em: <<https://www.opovo.com.br/jornal/economia/2018/05/fortaleza-elege-as-suas-prioridades-para-o-ceara-2050.html>>. Acesso em: 05 nov. 2018.
- COM SECA intensa há seis anos, Ceará usará água do mar para consumo. **Diário de Pernambuco.** Recife, PE. 21 mar. 2018. Disponível em: < http://www.diariodepernambuco.com.br/app/noticia/brasil/2018/03/21/interna_brasil,745833/com-seca-intensa-ha-seis-anos-ceara-usara-agua-do-mar-para-consumo.shtml>. Acesso em: 10 ago. 2018.
- COSTA, A. R.; BUSSON, B. O.; CARNEIRO, B. A.; LIMA, C. W.; OLIVEIRA FILHO, E. R.; V. NETO, F. T.; NASCIMENTO, J. W.; LIMA, M. A.; CARVALHO, P. C.; MARSYLLE, P. A.; DIAS, P. H.; ARAÚJO, P. H.; LOPES, R. M.; SOUZA, W. F. Análise da sustentabilidade da geração de eletricidade do Ceará. **Revista Tecnologia Fortaleza,** Fortaleza, 2018.
- CRESCIMENTO médio do PIB do Ceará está acima do índice do Nordeste e Brasil. **G1 CE.** Fortaleza, CE. 02 jan. 2018. Disponível em:

<<https://g1.globo.com/ce/ceara/noticia/crescimento-medio-do-pib-do-ceara-esta-acima-do-indice-do-nordeste-e-brasil.ghtml>>. Acesso em: 09 nov. 2018.

ENEL. **Informações Gerais**. Disponível em:

<<https://www.enel.com.br/pr/investidores/GeracaoFortaleza/InformacoesGerais.html>>. Acesso em: 08 ago. 2018.

ENEVA. **Pecém II**. Disponível em: <<http://www.eneva.com.br/nossos-negocios/geracao-de-energia/>>. Acesso em: 09 nov. 2018.

EPE - Empresa de Pesquisa Energética. **Anuário Estatístico de Energia Elétrica**. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/anuario-estatistico-de-energia-eletrica>>. Acesso em: 08 out. 2018.

EPE - Empresa de Pesquisa Energética. **Balço Energético Nacional 2018**. Relatório Síntese: Ano base 2017. Rio de Janeiro, RJ. Maio de 2018.

EPE - Empresa de Pesquisa Energética. **Energia Termelétrica: Gás Natural, Biomassa, Carvão, Nuclear**. Rio de Janeiro – RJ. 2016. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-173/Energia%20Termel%C3%A9trica%20-%20Online%2013maio2016.pdf>>. Acesso em: 07 ago. 2018.

EPE - Empresa de Pesquisa Energética. **Matriz Energética e Elétrica**. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>>. Acesso em: 01 ago. 2018.

FRANCISCO, Renata Vitor Chaves da Silva Guimarães. **Análise da Utilização de Água por Sistemas de Resfriamento em Termelétricas Brasileiras Movidas a Carvão Mineral, Gás Natural e Combustível Nuclear**. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2018. Disponível em: <https://repositorio.unifei.edu.br/xmlui/bitstream/handle/123456789/1268/dissertacao_2020180.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 09 ago. 2018.

FRANKLIN, Erick de Moraes. **Ciclos de Potência a Vapor: Ciclo Rankine**. Faculdade de Engenharia Mecânica. UNICAMP. Disponível em: <http://www.fem.unicamp.br/~franklin/ES672/pdf/turbina_vapor_ciclo.pdf>. Acesso em: 07 ago. 2018.

IBAMA - Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis. **Ibama embarga usina a carvão em Candiota (RS) e aplica multa de R\$ 75 milhões**. 14 set. 2016. Disponível em: <<http://www.ibama.gov.br/noticias/58-2016/187-ibama-embarga-usina-a-carvao-em-candiota-rs-e-aplica-multa-de-r-75-milhoes>>. Acesso em: 09 ago. 2018.

IEMA - Instituto de Energia e Meio Ambiente. **Série Termoeletricidade em Foco: Uso de Água em Termoelétricas**. São Paulo, SP. Novembro de 2016.

LINHARES Geração. **A UTE LORM**. Disponível em: <<http://www.lgsa.com.br/a-usina/>>. Acesso em: 24 nov. 2018.

LUZ, Maria Laura Gomes Silva. **Motores a Combustão Interna**. UFPEL. 2013. Disponível em: <<https://wp.ufpel.edu.br/mlaura/files/2013/01/Apostila-de-Motores-a-Combust%C3%A3o-Interna.pdf>>. Acesso em: 08 ago. 2018.

MMA - Ministério do Meio Ambiente. **Conselho Nacional do Meio Ambiente**. Resolução nº 430, 13 mai. 2011. Disponível em:
<<http://www2.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=646>>. Acesso em: 18 nov. 2018.

PETROBRÁS. **Piratininga**. Disponível em: <<http://www.petrobras.com.br/pt/nossas-atividades/principais-operacoes/termeletricas/piratininga.htm>>. Acesso em: 09 ago. 2018.

PETROBRÁS. **Termoceará**. Disponível em: <<http://www.petrobras.com.br/pt/nossas-atividades/principais-operacoes/termeletricas/termoceara.htm>>. Acesso em: 04 set. 2018.

PROJETO Ceará 2050 busca acelerar o desenvolvimento. **Diário do Nordeste**. Fortaleza, CE. 15 mai. 2018. Disponível em:
<<http://diarionordeste.verdesmares.com.br/cadernos/negocios/projeto-ceara-2050-busca-acelerar-o-desenvolvimento-1.1938561>>. Acesso em: 27 set. 2018.

QUINTELA, Samuel. **Governo do Estado planeja atrair duas novas termelétricas**. Diário do Nordeste. Fortaleza, CE. 16 nov. 2018. Disponível em:
<<http://diarionordeste.verdesmares.com.br/editorias/negocios/governo-do-estado-planeja-atrair-duas-novas-termeletricas-1.2002463>>. Acesso em: 21 nov. 2018.

SNIS – Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento. **Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos – 2016**. Brasília, fev. 2018. Disponível em:
<<http://www.snis.gov.br/diagnostico-agua-e-esgotos/diagnostico-ae-2016>>. Acesso em: 25 nov. 2018.

SPANG, E. S.; MOOMAW, W. R.; GALLAGHER, K. S.; KIRSHEN, P. H.; MARKS, D. H. The water consumption of energy production: an international comparison. **Environmental Research Letters**, v. 9, out. 2014.

TERMELETRICAS: Ciclo Combinado. **Gasnet**, 2013. Disponível em:
<<http://www.gasnet.com.br/termeletricas/ciclo.asp>>. Acesso em: 08 ago 2018.

VARELA, Átila. **Após dois anos em queda, economia cearense cresce 1,87%**. O Povo. Fortaleza, CE. 21 mar. 2018. Disponível em:
<<https://www.opovo.com.br/jornal/economia/2018/03/apos-dois-anos-em-queda-economia-cearense-cresce-1-87.html>>. Acesso em: 09 nov. 2018.

WATER Footprint Network. **What is a water footprint?** Disponível em:
<<http://waterfootprint.org/en/water-footprint/what-is-water-footprint/>>. Acesso em: 18 set. 2018.

ZARFENAS. **Central Geradora Termelétrica de Fortaleza**. 13 mar. 2007. Disponível em:
<http://br.geoview.info/central_geradora_termelétrica_fortaleza,1310259p>. Acesso em: 24 nov. 2018.