



UNIVERSIDADE DA INTEGRAÇÃO INTERNACIONAL DA LUSOFONIA AFRO-  
BRASILEIRA - UNILAB  
INSTITUTO DE ENGENHARIA E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL - IEDS  
ENGENHARIA DE ENERGIAS

FRANCISCO WELLINGTON MARTINS DA SILVA

**IMPACTOS DA SECA NA GESTÃO HÍDRICA E ENERGÉTICA DA BACIA  
DO SÃO FRANCISCO**

REDENÇÃO/CE

2020

FRANCISCO WELLINGTON MARTINS DA SILVA

**IMPACTOS DA SECA NA GESTÃO HÍDRICA E ENERGÉTICA DA BACIA  
DO SÃO FRANCISCO**

Trabalho de conclusão de Curso apresentada ao Instituto de Engenharia e Desenvolvimento Sustentável, da Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira – UNILAB, como requisito obrigatório para obtenção do título Engenheiro de Energias

Orientador: Dr. Luiz Martins de Araújo  
Junior

Co-Orientador: Dr. Cleiton da Silva  
Silveira

REDENÇÃO/CE

2020

Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira  
Sistema de Bibliotecas da UNILAB  
Catalogação de Publicação na Fonte.

---

Silva, Francisco Wellington Martins da.

S586i

Impactos da seca na gestão hídrica e energética da bacia do São Francisco / Francisco Wellington Martins da Silva. - Redenção, 2020.

65f: il.

Monografia - Curso de Engenharia de Energias, Instituto de Engenharias e Desenvolvimento Sustentável, Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira, Redenção, 2020.

Orientador: Prof. Dr. Luiz Martins de Araújo Junior.

Coorientador: Prof. Dr. Cleiton da Silva Silveira.

1. Secas. 2. São Francisco, Rio. 3. Gestão hídrica. 4. Energia elétrica - Produção. I. Prof. Dr. Silveira, Cleiton da Silva. II. Título.

CE/UF/BSCA

CDD 621.3121

---

FRANCISCO WELLINGTON MARTINS DA SILVA

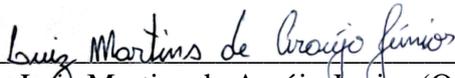
**IMPACTOS DA SECA NA GESTÃO HÍDRICA E ENERGÉTICA DA BACIA  
DO SÃO FRANCISCO**

Trabalho de conclusão de Curso apresentada ao Instituto de Engenharia e Desenvolvimento Sustentável da Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira – UNILAB, como requisito obrigatório para obtenção do título Engenheiro de Energias

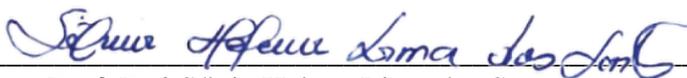
Orientador: Dr. Luiz Martins de Araújo Junior  
Co-Orientador: Dr. Cleiton da Silva Silveira

Aprovada em: **30/10/2020.**

BANCA EXAMINADORA

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Luiz Martins de Araújo Junior (Orientador)  
Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira (UNILAB)

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Cleiton da Silva Silveira (Co-Orientador)  
Universidade Federal do Ceará(UFC)

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr.<sup>a</sup> Sílvia Helena Lima dos Santos  
Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira (UNILAB)

  
\_\_\_\_\_  
Msc. João Dehon de Araújo Pontes Filho  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Dedico este trabalho a minha família,  
em especial ao meu tio José Chaves  
'Ti Zeca' (*in memorian*) e minha Vó  
Stella (*in memorian*) como símbolo  
de gratidão por tudo que fizeram por  
mim.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço pelo dom da vida, pela a harmonia perfeita da natureza que me torna tão pequeno no meio da imensidão do Universo, orquestrado por um Ser Especial e inexplicável;

Aos meus pais;

Aos meus irmãos;

Aos meus sobrinhos e afilhados;

Aos meus professores orientadores professor Dr. Luiz e Dr. Cleiton;

A todos meus amigos de curso, Arini, Romário, Guet, Isabel, Filinto, etc em especial “os veteranos”: Julito e Lamba, meus irmão que a vida me deu, os quais dividi muitos momentos de alegria e tristeza também;

A Ivyna, uma pessoa muito especial, que a conheci e mudou minha vida;

A todos os meus amigos e colegas que compartilhei República em Redenção/CE (Carlos Augusto, Lulu, Hiaty, Manu, Itamar, Pedro, Romarim, Raul, Jack, Alice, Felipe etc;

Aos meus amigos professores Leonardo Esteves, Ramilson Luz (*in Memoriam*) e Marlene.

A todos meus professores e funcionários do IEDS-UNILAB os quais tenho muita admiração e respeito.

A Unilab por me proporcionar uma educação de qualidade;

Ao grupo de pesquisa CLIPE, em especial ao Duarte Junior;

A Funcap, CAPES, FUNCEME grandes instituições que financiaram projetos que participei ao longo do meu curso;

A SOMA ENERGIA por me proporcionar qualificação profissional e ter dado a oportunidade de aplicar meus conhecimentos.

## RESUMO

A análise de dados hidrológicos é essencial para o enfrentamento de problemas relacionados a secas. O presente trabalho tem por objetivo avaliar os impactos da seca na gestão hídrica nos reservatórios da bacia do São Francisco e consequentemente mostrar as influências na geração de energia elétrica no Nordeste Brasileiro com base em análise do Índice de Escoamento Padronizado (Standardized Runoff Index-SRI), duração e estado de severidade das secas, índices climáticos etc. Para isso utilizou-se a série histórica de vazões de 1931 a 2016 dos aproveitamentos hidroelétricos da bacia do São Francisco, calculou-se o índice anual SRI. Fez-se o cálculo da duração, severidade e intensidade de eventos de secas com base no índice de SRI mensal menor que -0,79 da série considerada. Fez-se também o cálculo da Energia Natural Afluenta (ENA) e a relacionou aos eventos de secas, bem como, aos índices climáticos de Oscilação Decadal do Pacífico (ODP) e Oscilação Multidecadal do Atlântico (OMA). As análises do SRI mostraram forte predominância de estado de secas severas nos anos a partir de 2010 para a maioria dos reservatórios da Bacia do São Francisco, o que impactou diretamente na produção de ENA (no mesmo período a ODP e a OMA estavam em fase positiva). No período em que detectou-se estado emergencial e uma maior severidade de secas, a produção de ENA era menor. Este trabalho torna-se importante porque permite uma avaliação da vulnerabilidade da produção de energia da Bacia do São Francisco, assim como assistência na preparação e resposta aos impactos gerados.

**Palavras-chave:** SRI. ENA. Secas. Severidade. São Francisco.

## ABSTRACT

The analysis of hydrological data is essential to address drought-related problems. The present work aims to evaluate the impacts of droughts on the management of so much water in the reservoirs of the São Francisco basin and consequently show the influences on electricity generation in Northeastern Brazil based on an analysis of the Standardized Runoff Index (SRI), duration and state of the severity of droughts, climate indices, etc. For this purpose, the historical series of flows from 1931 to 2016 of the hydroelectric plants of the São Francisco basin was used, and the annual SRI index was calculated. The duration, severity and intensity of drought events were calculated based on the monthly SRI index of less than -0.79 of the considered series. The Natural Affluent Energy (NAE) was also calculated and related to drought events, as well as to the Decadal Pacific Oscillation (PDO) and Multidecadal Atlantic Oscillation (MOA) climatic indices. SRI analyses showed a strong predominance of severe drought conditions in the years from 2010 onwards for most reservoirs in the San Francisco Basin, which directly impacted NAE production (in the same period the ODP and WCO were in a positive phase). During the period when emergency and more severe droughts were detected, NAE production was lower. This work becomes important because it allows an assessment of the vulnerability of energy production in the San Francisco Basin, as well as assistance in preparing and responding to the impacts generated.

**Keywords:** SRI. NAE. Drought. Severity. São Francisco

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1 - ZONA DE CONVERGÊNCIA INTERTROPICAL-ZCIT MOSTRADA ATRAVÉS DAS IMAGENS DO SATÉLITE METEOSAT-7 .....	18
FIGURA 2 - ZONA DE CONVERGÊNCIA DO ATLÂNTICO SUL -ZCAS .....	18
FIGURA 3 – ÍNDICE ANUAL DA OSCILAÇÃO DECADAL DO PACÍFICO (ODP) DE 1931 A 2014 .....	21
FIGURA 4 - OSCILAÇÃO DECADAL DO PACÍFICO .....	21
FIGURA 5 - ÍNDICE ANUAL DA OSCILAÇÃO MULTIDECADAL DO ATLÂNTICO (OMA) DE 1856 A 2016 .....	22
FIGURA 6 - UNIDADES HIDROGRÁFICAS DA BACIA SÃO FRANCISCO.....	27
FIGURA 7 - DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DAS USINAS DA BACIA DO RIO SÃO FRANCISCO..	28
FIGURA 8 - REGIÃO DE ESTUDO- BACIA DO SÃO FRANCISCO .....	30
FIGURA 9 - CARACTERIZAÇÃO DA SEVERIDADE E DURAÇÃO E INTENSIDADE DOS EVENTOS DE SECA.....	33
FIGURA 10 - ÍNDICE DE ESCOAMENTO PADRONIZADO (SRI): COMPLEXO PAULO AFONSO	36
FIGURA 11 - ÍNDICE DE ESCOAMENTO PADRONIZADO (SRI): PAULO AFONSO .....	36
FIGURA 12 - ÍNDICE DE ESCOAMENTO PADRONIZADO (SRI): SOBRADINHO .....	37
FIGURA 13 - ÍNDICE DE ESCOAMENTO PADRONIZADO (SRI): QUEIMADO.....	37
FIGURA 14 - ÍNDICE DE ESCOAMENTO PADRONIZADO (SRI): RETIRO BAIXO .....	38
FIGURA 15 - ÍNDICE DE ESCOAMENTO PADRONIZADO (SRI): TRÊS MARIAS .....	38
FIGURA 16 - ÍNDICE DE ESCOAMENTO PADRONIZADO (SRI): XINGÓ.....	39
FIGURA 17 - ÍNDICE DE ESCOAMENTO PADRONIZADO (SRI): MOXOTÓ (APOLÔNIO SALES) .....	40
FIGURA 18 - ÍNDICE DE ESCOAMENTO PADRONIZADO (SRI): ITAPARICA (LUIZ GONZAGA) .....	40
FIGURA 19 - PERCENTUAL DE RESERVATÓRIOS DA BACIA DO SÃO FRANCISCO E SEU ESTADO DE SECA.....	41
FIGURA 20 - DURAÇÃO E SEVERIDADE DAS SECAS -APOLÔNIO SALES E PAULO AFONSO	42
FIGURA 21 - DURAÇÃO E SEVERIDADE DAS SECAS - ITAPARICA.....	43
FIGURA 22 - DURAÇÃO E SEVERIDADE DAS SECAS - QUEIMADO .....	44
FIGURA 23 - DURAÇÃO E SEVERIDADE DAS SECAS- RETIRO BAIXO .....	45
FIGURA 24 - DURAÇÃO E SEVERIDADE DAS SECAS - SOBRADINHO.....	46
FIGURA 25 - DURAÇÃO E SEVERIDADE DAS SECAS - XINGÓ .....	47

FIGURA 26 - DURAÇÃO E SEVERIDADE DAS SECAS - TRÊS MARIAS.....	48
FIGURA 27 - ENERGIA NATURAL AFLUENTE (ENA) BACIA DO SÃO FRANCISCO- PERÍODO DE 1931 A 2016 .....	48
FIGURA 28 - DURAÇÃO E SEVERIDADE DAS SECAS - COMPLEXO PAULO AFONSO .....	64
FIGURA 29 - DURAÇÃO E SEVERIDADE DE SECA - TRÊS MARIAS INCREMENTAL.....	64
FIGURA 30 - DURAÇÃO E SEVERIDADE DE SECA - ITAPARICA INCREMENTAL.....	65
FIGURA 31 - DURAÇÃO E SEVERIDADE DE SECA - SOBRADINHO INCREMENTAL.....	65

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1: LIMIARES DOS ÍNDICES SRI E SPI COM E SUAS DEVIDAS CATEGORIAS E ESTADOS .....	32
TABELA 2: PRODUTIVIDADE ( $MW_{MED}/M^3/S$ ) DOS APROVEITAMENTOS DA BACIA DO SÃO FRANCISCO .....	34
TABELA 3: DURAÇÃO E SEVERIDADE DE SECA - APOLÔNIO SALES .....	57
TABELA 4: DURAÇÃO E SEVERIDADE DE SECA - COMPLEXO PAULO AFONSO .....	57
TABELA 5: DURAÇÃO E SEVERIDADE DE SECA - PAULO AFONSO .....	58
TABELA 6: DURAÇÃO E SEVERIDADE DE SECA - ITAPARICA .....	58
TABELA 7: DURAÇÃO E SEVERIDADE DE SECA - ITAPARICA INCREMENTAL .....	59
TABELA 8: DURAÇÃO E SEVERIDADE DE SECA- QUEIMADO .....	60
TABELA 9: DURAÇÃO E SEVERIDADE DE SECA - RETIRO BAIXO.....	60
TABELA 10: DURAÇÃO E SEVERIDADE DE SECA - SOBRADINHO .....	61
TABELA 11: DURAÇÃO E SEVERIDADE DE SECA - SOBRADINHO INCREMENTAL .....	61
TABELA 12: DURAÇÃO E SEVERIDADE DE SECA - TRÊS MARIAS .....	62
TABELA 13: DURAÇÃO E SEVERIDADE DE SECA - TRÊS MARIAS INCREMENTAL .....	62
TABELA 14: DURAÇÃO E SEVERIDADE DE SECA - XINGÓ .....	63

## **LISTA DE SIGLAS**

**ANA-** Agência Nacional de Águas  
**BEN -** Balanço Energético Nacional  
**BHSF-** Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco  
**CEMIG-** Companhia Energética de Minas Gerais  
**CHESF-** Companhia Hidroelétrica do São Francisco  
**CPTEC-** Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos  
**EIA-** Energy Information Administration  
**ENA -** Energia Natural Afluente  
**ENA-** Energia Natural Afluente  
**ENSO -** El Niño- South Oscillation  
**EMBRAPA-** Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária  
**ENSO-** El Niño -Oscilação Sul  
**GEE-** Gases de Efeito Estufa  
**INPE-** Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais  
**IPEA-** Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada  
**MME-**Ministério de Minas e Energias  
**MW-** Mega Watts  
**NEB-** Nordeste Brasileiro  
**ODP -** Oscilação Decadal do Pacífico  
**OMA-** Oscilação Multidecal do Atlântico  
**ONS -** Organizador Nacional de Sistemas  
**SIN –** Sistema Interligado Nacional  
**SPI-** Standardized Precipitation Index  
**SRI-** Standardized Runoff Index  
**TSM-** Temperatura da Superfície do Mar  
**UHE-** Usina Hidroelétrica  
**ZCAS -** Zona de Convergência do Atlântico Sul  
**ZCIT -** Zona de Convergência Intertropical

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	13
2	OBJETIVOS.....	14
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	15
3.1	Breve Histórico das secas no Nordeste Brasileiro (NEB) .....	15
3.1.1	<i>Escalas de planejamento</i> .....	16
3.2	Variabilidade Climática no Nordeste.....	17
3.2.1	<i>Variabilidade Sazonal</i> .....	17
3.2.1.1	<i>Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) e Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS)</i> .....	17
3.2.2	<i>Variabilidade Interanual</i> .....	18
3.2.2.1	<i>El Niño -Oscilação Sul (ENSO)</i> .....	19
3.2.2.2	<i>Dipolo do Atlântico</i> .....	20
3.2.3	<i>Variabilidade Decadal e Multidecadal</i> .....	20
3.2.3.1	<i>Oscilação Decadal do Pacífico (ODP)</i> .....	20
3.2.3.2	<i>Oscilação Multidecadal do Atlântico (OMA)</i> .....	22
3.3	Recursos hídricos e a Geração de Energia.....	23
3.4	Índices de Secas .....	24
3.5	Risco Climático e o setor hidro energético.....	25
4	CARACTERIZAÇÃO DA BACIA DO RIO SÃO FRANCISCO .....	27
5	METODOLOGIA.....	30
5.1	Região de Estudo .....	30
5.2	Dados Utilizados.....	30
5.3	Cálculo dos Indicadores hidrológicos: Standardized Precipitation Index (SPI), Standardized Runoff Index (SRI).....	31
5.4	Cálculo da Duração e Severidade das Secas.....	33
5.5	Cálculo da Energia Natural Afluente (ENA) .....	34
6	RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	35
6.1	Análise dos índices de seca.....	35
6.1.1	<i>Análise do índice de escoamento normalizado Standardized Runoff Index (SRI)</i> 35	
6.2	Análise da duração e Severidade das Secas.....	41
6.3	Análise dos impactos da seca na vazão e variabilidade da ENA.....	48
7	CONCLUSÃO.....	50
8	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	51
9	APÊNDICES .....	57

## 1 INTRODUÇÃO

A seca é um fenômeno natural que pode assumir características extremas e que é originado essencialmente por uma afetação temporária das condições de precipitação. A seca distingue-se dos restantes fenômenos extremos, pelo o seu desenvolvimento que se dar de forma lenta e quase imperceptível, podendo atingir proporções mais significativas e lentas do que qualquer outro fenômeno extremo, como por exemplo as cheias (Cunha, 2008). Os riscos naturais como as secas estão diretamente relacionadas ao desenvolvimento econômico. É impossível pensar em produção de energia sem pensar na disponibilidade de água. As secas são responsáveis por prejuízos avultados para diversos setores da economia. Ao contrário da maioria dos riscos naturais, com ocorrência instantânea e pontual, as secas ocorrem em duração maior, atingi uma certa extensão espacial, esses são fatores determinantes para o seu estudo e caracterização (SANTOS, 1998)

No Brasil é comum associar seca à Região Nordeste. Albuquerque (2019) destaca em seu trabalho que, as secas têm surgido com certa frequência nas regiões Norte (na Amazônia em 2005 a seca atingiu mais de 914 comunidades) e Sul (no ano de 2005 a seca causou grandes impactos na produção agrícola e pecuária, além de problemas no abastecimento em alguns municípios).

A intervenção humana sobre o meio ambiente resultou em diversas mudanças no clima e nas condições de vida em escala global. Por essa razão são feitos estudos hidrológicos, pois estes são utilizados para avaliar o efeito dessas ações antrópicas sobre os recursos hídricos, realizar previsões sobre o que pode ocorrer no futuro e quais medidas podem ser adotadas para evitar ou reduzir as consequências negativas para o bem-estar da humanidade. Assim é importante entender a dinâmica dos recursos hídricos em função de eventos de Secas.

Em termos de gerenciamento, planejamento energético e tomada de decisão Silveira (2014) apresenta as múltiplas escalas temporais (longo, médio, curto e curtíssimo prazo) na variabilidade do clima as quais condicionam o risco associado à ocorrência de eventos extremos hidrológicos (cheias e secas) para um local ou região.

Nas últimas décadas, as diferentes tecnologias de modelagem de fenômenos naturais têm evoluído rapidamente, propiciando a oportunidade de se ampliar seus conhecimentos sobre a natureza e compreender seus processos físicos e biológicos. Considerando estes avanços, torna-se necessária a busca pelo desenvolvimento de

sistemas de previsão/projeção, incluindo informações oferta e demanda de energia para melhorar a qualidade da previsão. Tendo em conta o crescimento da população e o desenvolvimento tecnológico contínuo no qual exigem uma demanda de energia cada vez maior (DIAS, 2005).

Há a necessidade de uma política mais eficiente de combate à seca, não consistindo apenas em medidas mitigadoras, mas contendo plano de preparação que englobe monitoramento, prevenção, avaliação da vulnerabilidade dos setores e regiões, assim como assistência na preparação e resposta aos impactos gerados (MILWEE, 2000). Diante dessa temática é importante analisar os eventos de secas para criar ações para reduzir os impactos causados por elas. De acordo com (Paulo et al., 2004) metodologias de avisos antecipados das secas se afigura promissora na perspectiva de implementar em tempo as medidas de mitigação de secas.

O trabalho apresenta um estudo das secas no Nordeste e uma análise, por meio de índices climáticos, das condições de seca nos reservatórios do Nordeste, considerando uma série histórica de 1931 a 2016. As análises estão inclusas em uma escala temporal de médio prazo. A partir dessas informações é possível tomar decisões afim de garantir um bom gerenciamento do uso da Água. Outro aspecto importante desse trabalho é a geração de recursos humanos para atuação em diversos aspectos do desenvolvimento social e conseqüentemente para oferta e demanda de energia provinda de fontes renováveis.

## 2 OBJETIVOS

### **Objetivo Geral**

- Analisar os impactos da seca nos reservatórios da bacia do São Francisco e verificar as conseqüências na produção de Energia Natural Afluentes no Nordeste Brasileiro.

### **Objetivo Específico**

- Calcular os índices escoamento normalizado- *Standardized Runoff Index* (SRI) para série histórica de 1931 a 2016 dos reservatórios da Bacia do São Francisco;
- Verificar o SRI anual para todos os reservatórios da bacia do São Francisco e sua relação com o estado de Secas;

- Apontar os eventos de secas com base em sua duração e severidade e associar à eventos climáticos;
- Calcular e analisar a série de 1931 a 2016 de Energia Natural Afluyente (ENA) dos reservatórios da bacia do São Francisco e verificar sua relação como a duração e severidade de secas.

### **3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

#### **3.1 Breve Histórico das secas no Nordeste Brasileiro (NEB)**

A seca é um fenômeno que, apesar de ocorrer de forma lenta, gera muitos impactos, com perdas e custos muito elevados. Nas últimas décadas esse fenômeno tem se tornado cada vez mais frequente. Seus efeitos têm mostrado a vulnerabilidade e a falta de medidas preventivas dos governos locais e da sociedade para lidar com este problema. (Albuquerque, 2019).

A seca é um fenômeno resultante das baixas precipitações por períodos prolongados, da ordem de meses ou até anos, durante o qual a precipitação diminui consideravelmente em relação ao valor climatologicamente esperado ou apropriado (Palmer, 1968).

As condições adversas do Nordeste, incluindo as secas periódicas, retardaram muito o início da ocupação portuguesa da Região. Até a primeira metade do século XVII o domínio das áreas secas do interior do Nordeste de Pernambuco ao Ceará era dos índios (CAMPOS, 2001).

A seca na região Nordeste no ano de 2012 tomou proporções imensas, tão grandes quanto as grandes secas já registradas no ano de 1777-1779 e a do ano de 1888 que ficou conhecida como “a seca dos três oitos”. (SANTOS, 2012).

Calcula-se que a cada 100 anos há entre 18 e 20 anos com secas intensas. O século XX foi um dos mais drásticos, registrando 27 anos de estiagem, em que se destaca o período de 1903/1904. Já nos anos de 1979/1984 ocorreu a mais prolongada e abrangente seca da história do Nordeste, observando-se ainda estiagens intensas em 1993, 1998, 2001 e está atual, que vem desde 2012 (EMPRAPA, 2020).

A seca de 2011-2013 que atingiu o Nordeste é considerada pelo Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC), do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), como a mais intensa das quatro décadas recentes (NOBREGA,2015). Nos últimos anos, a ocorrência de um período de estiagem severa na região Nordeste (2012 a 2016) causou impactos no fornecimento de energia elétrica. Os baixos níveis dos

reservatórios acarretaram danos em setores importantes da sociedade. Foi necessário acionar as usinas termelétricas o que elevou o preço da energia em função do uso de combustíveis em seu funcionamento (ONS, 2016).

As secas são os mais devastadores perigos meteorológicos do século XX, tendo extensa cobertura e impactos adversos significativos na agricultura regional, recursos hídricos e meio ambiente. As secas também são um dos desastres naturais mais caros do mundo, causando uma média US\$ 6 a US\$ 8 bilhões em danos globais anualmente e afetando muito mais pessoas do que outros desastres (Wilhite, 2000).

As secas no nordeste brasileiro não correspondem à mera estiagem. A rigor, elas constituem um complexo fenômeno socioeconômico, no qual as oscilações de volume e distribuição temporal das precipitações pluviométricas redundam em desorganização da atividade econômica (COSTA, 2012). A porção semi-árida da região Nordeste do Brasil é particularmente vulnerável às variações climáticas; a periodicidade das secas compromete principalmente a agricultura de subsistência que, na maior parte, se constitui de plantios em sistema de sequeiro- agricultura que não utiliza irrigação (FILHO, 2009).

A seca e a convivência com ela dependem mais do que nunca de questões técnicas e planejamento, deixando de ser uma questão de interesses políticos para se tornar o que sempre foi – um fenômeno físico que pode ser estudado, compreendido e atualmente minimizado em muitos dos seus efeitos mais danosos (COSTA, 2012).

### ***3.1.1 Escalas de planejamento***

Muitos autores apresentam como critério de planejamento as escalas temporais de curto, médio e longo prazo (SILVEIRA, 2014; SILVA, 2017). Fenômenos climáticos como o El Niño, La Niña, Oscilação Decadal do Pacífico, Oscilação Multidecadal do Atlântico e eventos de cheias e secas, etc. podem ser observados a nível temporal e associadas às escalas de planejamento.

As escalas de temporais para o planejamento energético em curto prazo como descrito por Silveira (2014) é em nível operacional que se refere a atividades repetitivas executadas em horas, meses. A exemplo tem-se os sistemas de monitoramento hidrológico, abertura ou não das comportas de uma hidroelétrica.

A médio prazo o planejamento se dar em um intervalo de meses a anos. Como descritos por Silveira (2014) e Ramos (2011). Nessa escala de planejamento faz-se uma representação detalhada do processo estocástico de vazões afluentes dos reservatórios.

Nessa escala de planejamento é feito uma análise mais significativa, são feitos estudos de vazão, volume de reservatórios, etc.

No planejamento a longo prazo considera-se a operação com um horizonte de vários anos à frente, de três anos a algumas décadas, em virtude disso necessita que sejam inseridos, em caráter estratégico, a variabilidade do clima e as mudanças climáticas (MOTA, 2010; SILVEIRA, 2014). Ações como construções de hidroelétricas, Pequenas Centrais Hidroelétricas- PCH's etc. já podem ser pensadas nessa etapa.

As variabilidade e mudanças climáticas ocorrem em diversas escalas de tempos, seja ela a curto, médio ou longo prazo, diante disso faz-se necessário entendermos a dinâmica dos recursos hídricos para que seja tomada decisões assertivas de modo mitigar os problemas ocasionado por eventos adversos como as secas e conseqüentemente pela falta d'água para a geração de energia e outros fins.

## **3.2 Variabilidade Climática no Nordeste**

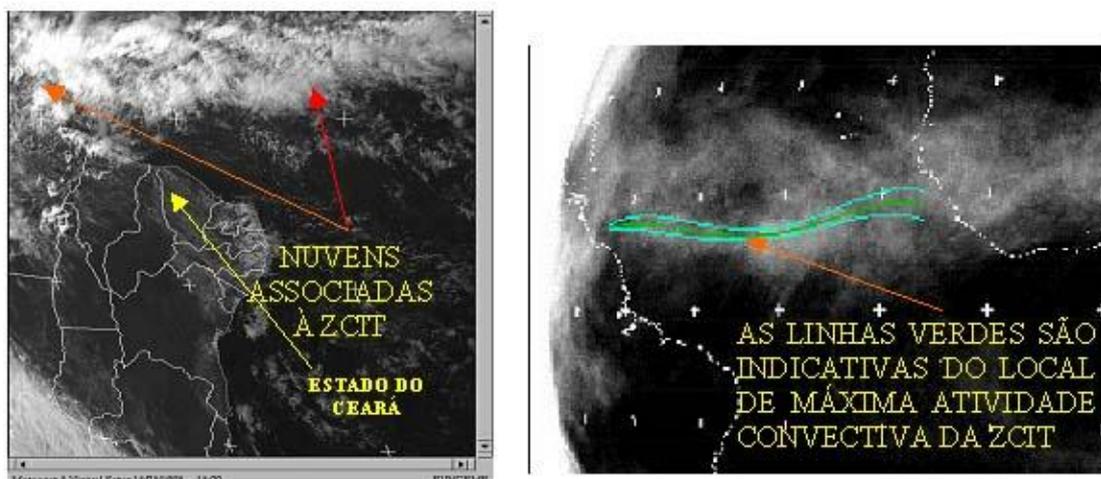
### **3.2.1 Variabilidade Sazonal**

A variabilidade Sazonal está associada às variações climáticas em escala de meses e/ou por estação do ano. É possível verificar uma relação direta nas precipitações e vazões das bacias do SIN com alguns sistemas meteorológicos como a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) e a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) (SILVA, 2017; LAZARO, 2011 e SILVEIRA, 2014) nessa escala tempo.

#### **3.2.1.1 Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) e Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS)**

Segundo a Fundação Cearense de Meteorológica de Recursos Hídricos-FUNCEME a ZCIT é uma banda de nuvens que circunda a faixa equatorial do globo terrestre (Figura 1), formada principalmente pela confluência dos ventos alísios do hemisfério norte com os ventos alísios do hemisfério sul. De maneira simplista, pode-se dizer, que a convergência dos ventos faz com que o ar, quente e úmido ascenda, carregando umidade do oceano para os altos níveis da atmosfera ocorrendo a formação das nuvens. Perturbações advindas do oceano Atlântico Tropical, associadas à ZCIT ou na forma de ondas do leste alteram as condições de tempo nas regiões Norte e Nordeste (Lázaro, 2015).

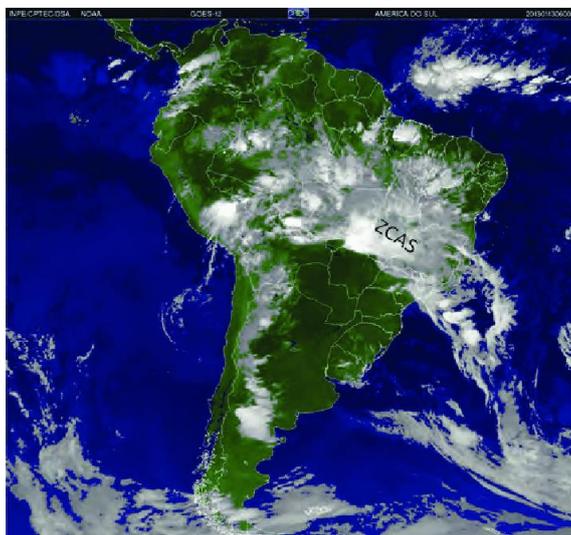
**Figura 1** - Zona de Convergência Intertropical-ZCIT mostrada através das imagens do satélite METEOSAT-7



Fonte: FUNCEME

Na América do Sul, convencionou-se chamar Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) a banda de nebulosidade com orientação NW/SE, se estendendo do sul da região Amazônica até o oceano Atlântico Sul, e que persiste sobre a região durante pelo menos quatro dias e fornece precipitação abundante, porém não regularmente distribuída, em sua área de atuação (Quadro, 1994)

**Figura 2** - Zona de Convergência do Atlântico Sul -ZCAS



Fonte: Domínio Público

### 3.2.2 Variabilidade Interanual

A variabilidade Interanual está associada as variações climáticas em escala anual. Nessa escala de tempo a variabilidade das precipitações e consequentemente das

vazões, das bacias do SIN estão associadas à fenômenos como o EL NIÑO, LA NIÑA e o Dipolo do Atlântico, como descrito por Silveira (2014) e Silva, (2017).

### 3.2.2.1 *El Niño -Oscilação Sul (ENSO)*

O El Niño é o aquecimento anormal do Oceano Pacífico Equatorial que, combinado com o enfraquecimento dos ventos alísios na mesma região, provoca mudanças na circulação atmosférico (FREIRE, 2011). A La Niña é um fenômeno que se caracteriza por ser oposto ao El Niño, ou seja, é o resfriamento das águas do Oceano Pacífico Equatorial, por esse motivo é conhecido como episódio frio (OLIVEIRA, 2001). Os eventos de El Niño e La Niña têm uma tendência a alternar-se a cada 3,2 anos. Porém, de um evento ao seguinte, o intervalo pode variar de 1 a 10 anos. A intensidade dos eventos varia bastante de caso a caso. O El Niño mais intenso, segundo as medições da ATSM, ocorreu em 1982-83 e em 1997-98. Algumas vezes, os eventos El Niño e La Niña são intercalados por condições normais. (COSTA, 2012)

O Nordeste do Brasil (NEB) é uma das regiões em que se observa a ocorrência de El-Niño/Oscilação Sul (ENOS) (Kousky et al, 1984). O fenômeno de El Niño está associado as fases quente e La Niña associado as fases frias. Isso reflete diretamente no regime de chuvas na região Semiárida do Brasil. Em fases de El-Niño há uma menor possibilidade de ocorrências de chuvas, enquanto em fases de La Niña há uma maior possibilidade de ocorrência de chuvas.

Existe uma relação direta de causa e efeito entre o fenômeno El Niño e as secas no Nordeste do Brasil, pelo menos no prolongamento do período seco além do normal. A mudança anômala na circulação da atmosfera superior e a conseqüente alteração na dinâmica dos centros de altas e baixas pressões, bem como na modificação das células do ar atmosférico, constituem mecanismos que explicam a ocorrência das grandes secas no Nordeste do Brasil. (COSTA, 2012)

Muitos autores (SILVA, 2017; SILVEIRA, 2014; OLIVEIRA, 2001; FERREIRA, 2011) defendem os fenômenos de El Niño e La Niña como um dos principais responsáveis pelo regime de precipitação nas regiões Semiárida do Brasil( NE brasileiro). Vianello et al (2001), aponta que a ocorrência dos fenômenos El Niño e La Niña está associada com secas e enchentes no NEB. Paula (2010) descreve que também há alterações climáticas nas Região Sul como conseqüência do El Niño, representando assim um fator preponderante na Erosividade das chuvas na região de Santa Maria.

### **3.2.2.2 *Dipolo do Atlântico***

Este fenômeno, segundo Souza, (1997), caracteriza-se pela manifestação simultânea de anomalias de TSM configurando-se espacialmente com sinais opostos sobre as Bacias Norte e Sul do Atlântico Tropical. O padrão térmico inverso gera o aparecimento de um gradiente térmico meridional e inter-hemisférico sobre o Atlântico Equatorial (Wagner, 1996), o qual exerce influências no deslocamento norte-sul da ZCIT.

Moura, (2000) relacionou a precipitação no setor leste do Nordeste do Brasil (NEB) com a Temperatura da Superfície do Mar (TSM) nos oceanos Atlântico (área do Dipolo) e Pacífico, no período de 1945 a 1985. Nobrega, (2016) identificou tendências nas temperaturas da superfície do mar nos oceanos Atlântico Norte, Atlântico Sul, Pacífico Leste e Pacífico Central e a relação com a variabilidade temporal da precipitação em Pernambuco.

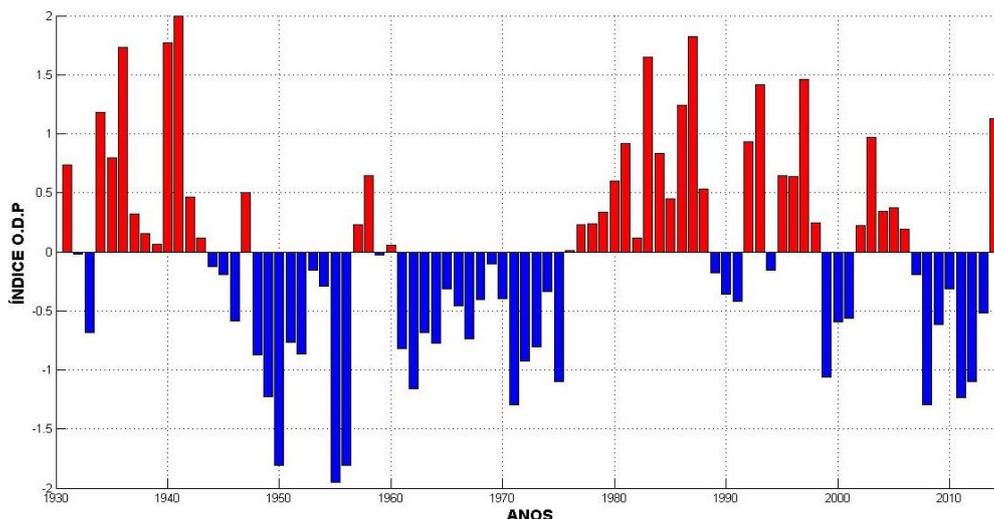
### **3.2.3 *Variabilidade Decadal e Multidecadal***

A variabilidade Decadal e Multidecadal estão associadas às variações climáticas em escala de tempo maior, ciclos com duas ou três décadas para a variabilidade decadal e ciclos com pouco mais de sete décadas para a variabilidade Multidecadal.

#### **3.2.3.1 *Oscilação Decadal do Pacífico (ODP)***

Oscilação Decenal do Pacífico (PDO) é uma variação da anomalia da temperatura da superfície do Pacífico de 40 a 50 anos com 2 fases de cerca de 20 a 30 anos. (Climatologia, 2020). A Figura 3 mostra as variações das temperaturas, os índices de ODP positivos relacionam-se a fase quente e índices negativos de ODP relacionam-se com a fase fria.

**Figura 3** – Índice anual da Oscilação Decadal do Pacífico (ODP) de 1931 a 2014

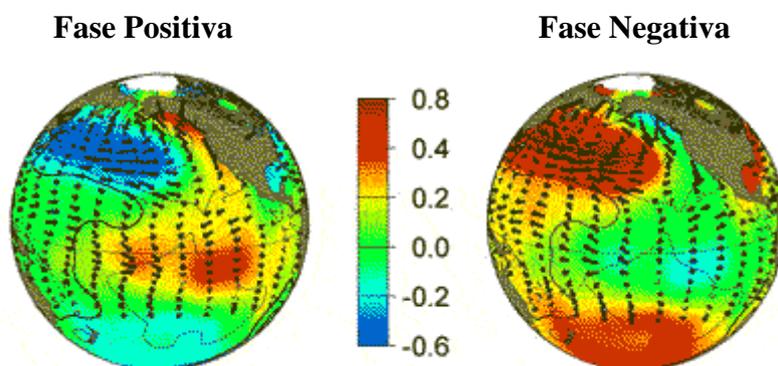


**FONTE:** Elaborado pelo autor com os dados disponíveis em:  
< <http://research.jisao.washington.edu/pdo/PDO.latest> >

O Nordeste do Pacífico durante a fase quente (positiva) tornam-se mais frias do que o normal. Mas a temperatura do oceano ao longo do oeste da América do Norte é quente, assim como ao longo do equador da América Central às Ilhas Marquesas (Climatologia, 2020). Tudo isso cria anomalias semelhantes ao El Niño. Autores como Silva, (2017), Silveira, (2014) observaram ocorrência de El Niño no período da fase quente da PDO. Ver **Figura 4**.

Na fase fria (negativa), o DOP se parece com um arco de água quente que vai do Norte ao Sul do Pacífico, passando perto do Japão, e que envolve uma grande área de água fria perto do equador. Esta fase é o oposto da anterior que, portanto, tem efeitos opostos, semelhantes a La Niña. Ver Figura 4.

**Figura 4** - Oscilação Decadal do Pacífico



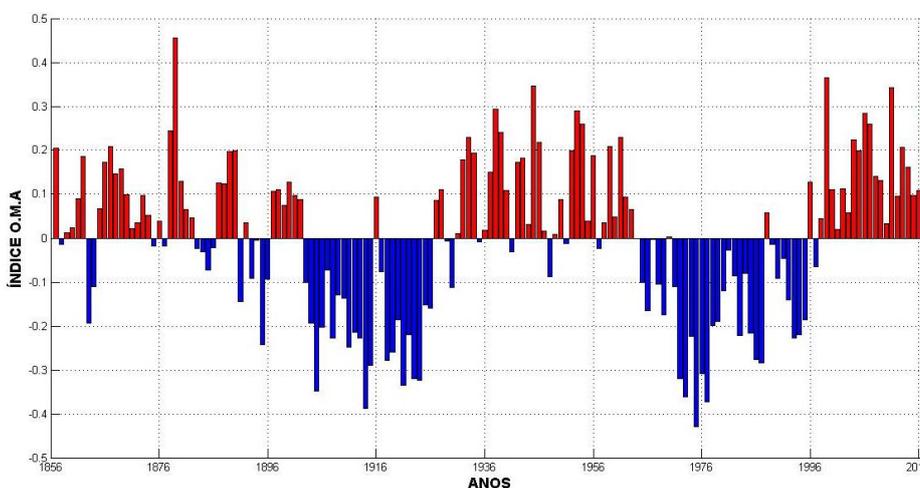
**FONTE:** <http://la.climatologie.free.fr/enso/enso-pdo3.htm#pdo/>

Streck (2009) verificou em seu trabalho a associação da variabilidade interdecadal da chuva em Santa Maria, RS, com a Oscilação Decadal do Pacífico. Garcia (2006) analisou a variabilidade climática do Sistema de Monção da América do Sul (SMAS), assim como suas relações com as fases da Oscilação Decadal do Pacífico (ODP). Silva e Galvêncio et al (2011) investigaram a influência de oscilações climáticas sobre regiões da bacia hidrográfica do rio São Francisco. Silva (2013) investigou em seu trabalho como a ODP exerce influência sobre a variabilidade pluviométrica da sub-bacia hidrográfica do Baixo São Francisco, situada na região Nordeste do Brasil.

### 3.2.3.2 Oscilação Multidecadal do Atlântico (OMA)

A OMA é uma oscilação de baixa frequência que ocorre na TSM do Atlântico Norte, essas oscilações predominam entre o equador (Golfo do México) e a Groelândia geralmente em torno de 0°N a 70°N. A mesma apresenta duas fases, a fria e a quente, com uma duração característica temporal de 20 a 40 anos cada fase (SOUSA et al., 2008). Ver Figura 5.

**Figura 5** - Índice anual da Oscilação Multidecadal do Atlântico (OMA) de 1856 a 2016



**FONTE:** Elaborado pelo autor com os dados disponíveis em:  
<ftp://ftp.ncdc.noaa.gov/pub/data/paleo/treering/reconstructions/amo-gray2004.txt>

Dantas (2012) verificou em seu trabalho a influência das Oscilações Decadais do Pacífico e Multidecadais do Atlântico nos índices extremos de precipitação e temperatura do ar da Amazônia Ocidental. Siqueira (2012) analisou e avaliou a dinâmica do clima existente na América do Sul por meio de dados de índices climáticos, incluindo os índices

de Oscilação Multidecadal do Atlântico (OMA). Minuzzi (2014) mostra em seu trabalho que alguns autores associam o comportamento de eventos extremos nas regiões interioranas do sul do Brasil, com outros modos de variabilidade climática. Considerando que um aumento (diminuição) das chuvas extremas estariam em associação com a fase negativa (positiva) da Oscilação Multidecadal do Atlântico. Silva (2013) analisou as influências das ocorrências simultâneas de OMA sobre as cotas do rio São Francisco.

### **3.3 Recursos hídricos e a Geração de Energia**

De todos os recursos naturais a água é a mais utilizada pelo homem. É difícil pensar em desenvolvimento econômico e sustentável sem não a mensurar. A água é um bem precioso, o seu uso é muito importante para a nação, tendo diferentes destinos. A água pode ser usada para gerar energia. Por sua vez a energia é usada para fornecer água para as populações em seus mais diversos aspectos e necessidades (ANA, 2015; SILVA, 2017)

A insuficiência na oferta de água para os diversos usos ou falta de água de boa qualidade geram efeitos diretos no dia-a-dia da população e na economia do país e têm exigido grande atenção na busca de alternativas para o enfrentamento dos problemas (ANA, 2015). Muitos impactos socioambientais e econômicos, por exemplo, em setores: da agricultura (irrigação, criação de animais, produção de alimentos etc); do comércio (navegação, etc.); da indústria, além do abastecimento humano e, principalmente, para a geração de energia elétrica são causados pela falta de água. (ANA, 2015; SILVA 2017). Tanto a água como a energia são essenciais para a equidade social, integridade do ecossistema e sustentabilidade (SILVA,2017)

Quando se tem reduções na vazão dos rios, impactadas pela alteração do regime pluviométrico, por meio de secas prolongadas, ou mesmo pelo uso dos outros usuários ocasiona a diminuição do potencial de geração de energia elétrica por meio das hidrelétricas. Nessa situação, as grandes centrais hidroelétricas são despachadas de forma que se utiliza as termoelétricas para complementar a oferta de energia e assim suprir a demanda da sociedade (IPEA, 2011). As usinas termoelétricas, em seus processos industriais, produzem grandes quantidades de gases do efeito estufa impactando ainda mais alterações climáticas e contribuindo para o aquecimento global.

Para atender às necessidades humanas atuais, 81,3% da energia utilizada no planeta é gerado a partir da queima de combustíveis fósseis, com petróleo, gás natural e

carvão são as principais fontes. É conhecido que esse tipo de geração de energia resultou na emissão de gases de efeito estufa (GEE) e que o acúmulo de poluentes na atmosfera é uma das causas prováveis das mudanças climáticas observadas (IEA, 2010)

Por ser um dos usuários da água, o setor de energia elétrica tem a responsabilidade e o dever de planejar a utilização deste recurso como insumo para a produção de eletricidade de forma racional, otimizada e colocando-se no contexto dos demais usuários do mesmo (MME, 2007).

A energia elétrica no Brasil é gerada por várias fontes, com participação significativa de fontes renováveis. Em um sistema de produção de energia elétrica com base em recursos renováveis, como é o caso do Brasil, onde as hidroelétricas, compõem a maior parcela de geração de eletricidade, é fundamental criarmos estratégias para dimensionar e otimizar custos com a sua implementação.

A energia hidrelétrica é uma fonte de energia renovável limpa, que não consome, mas apenas usa a água e a disponibiliza novamente para outros usos, atualmente usada na maior parte do mundo para complementar as necessidades de eletricidade. (Ogochukwu, 2012).

O planejamento do sistema elétrico brasileiro tenta dimensionar a demanda e a oferta das configurações futuras de energia elétrica no país. Para tanto, é preciso mensurar necessidades energéticas futuras, bem como ajuste de cronogramas de entrada de empreendimentos de geração. Desta forma informações que possibilitem um maior entendimento dos aspectos que afetam a geração de energia podem trazer consigo um maior conhecimento sobre risco em tomada de decisões.

### **3.4 Índices de Secas**

Vários índices têm sido desenvolvidos objetivando quantificar os aspectos climatológicos das secas, os quais objetivam medir o quanto a precipitação, para um dado período de tempo, tem se desviado da normal climatológica. Embora nenhum dos principais índices seja inerentemente superior aos demais para todas as circunstâncias, alguns índices são melhores ajustáveis do que outros para certos usos (ALMEIDA, 2017). A adoção de índices de seca auxilia na previsão e monitoramento dos períodos de seca através da determinação da intensidade, duração e a frequência com que este fenômeno ocorre. (Mendes C.A.B *et al*, 2019). O método mais simples e eficaz para avaliar a seca é usar índices de seca, que são medidas quantitativas que caracterizam os níveis de seca assimilando dados de variáveis relacionadas em um único valor numérico (Zargar et al.,

2011). Os índices de seca variam de acordo com o grau de complexidade. Os mais simples são apenas desvios da precipitação em relação à sua média climatológica, enquanto os mais complexos incorporam as condições de umidade do solo (ALMEIDA, 2017).

Índices de secas são frequentemente utilizados na comunidade científica (McKee et al., 1993), e estão relacionados ao estudo do clima. A exemplo o índice normalizado de precipitação o *Standardized Precipitation Index* (SPI) e o índice de escoamento normalizado *Standardized Runoff Index* (SRI), que permite observar os limiares, categorias e assim classificar o estado de seca de uma determinada região. Baseia-se na distribuição de probabilidades da precipitação e pode ser calculado em diferentes escalas de tempo (PEREIRA, 201X).

Júnior (2018) usou dados de vazões pluviais para o cálculo do *Standardized Precipitation Index* (SPI) e *Standardized Runoff Index* (SRI). Shukla, S. e A. W. Wood (2008), usaram o Índice de Escoamento Padronizado para caracterizar a seca hidrológica. WU (2018) utilizou o Índice de Escoamento Padronizado não paramétrico (SRI) para investigar as características temporais da seca hidrológica em 17 captações do Loess Plateau na China durante o período de 1961 a 2013. Shen (2015) fez um estudo de um modelo hidrológico distribuído em larga escala, Capacidade de Infiltração Variável (CIV) acoplado ao Índice de Escoamento Padronizado modificado (SRI) para avaliação da seca na bacia do rio Weihe, noroeste da China.

Em escalas de tempo mensal a sazonal, o SRI é um complemento útil do SPI para retratar os aspectos hidrológicos de seca. Assim como SPI, o SRI permite sua aplicação para diferentes escalas temporais (CUNHA, 2008).

Nesse contexto, os índices de seca têm se tornado uma das ferramentas mais adequadas para entender e enfrentar a escassez hídrica (JÚNIOR, 2018). Portanto, o monitoramento, previsão e caracterização de secas são de grande importância na gestão dos recursos hídricos e mitigação de desastres.

### **3.5 Risco Climático e o setor hidro energético**

O desenvolvimento de um país está diretamente ligado ao consumo e produção de energia. E o fornecimento de energia depende da água. O fornecimento de água depende da energia (IEA, 2020). O Brasil dispõe de uma matriz elétrica de origem predominantemente renovável, com destaque para a fonte hídrica que responde por 64,9% da oferta interna (BEN, 2019). A interdependência entre água e energia deve se

intensificar nos próximos anos, com implicações significativas para a segurança energética e hídrica (IEA, 2020).

Fatores como a disponibilidade de água nos reservatórios para os mais diversos usos associados à variabilidade climatológica, torna-se preponderantes para a garantia da produção de energia. Cada recurso enfrenta demandas e restrições crescentes em muitas regiões, como consequência do crescimento econômico e populacional e das mudanças climáticas (IEA,2020).

Segundo Santos (1998) as consequências das secas podem ser diretas ou indiretas. Entre as consequências diretas destacam-se os déficit no fornecimento de água para o abastecimento humano, prejuízos na agricultura como falta d'água para irrigação e dessedentação de animais, indústria, restrições na navegação devido ao nível baixo dos rios, e consequências indiretas como Incêndios florestais, aumento da concentração de poluentes nos meios hídricos devido à demora na auto depuração, ocasionando um má qualidade da águas, erosão, dentre outros.

O uso sustentável da água implica na conservação dos recursos naturais, deve ser ambientalmente amigável, as tecnologias devem ser apropriadas, a viabilidade econômica deve ser assegurada e a aceitabilidade social é fundamental. Deste modo será possível usar a água em qualquer atividade humana, econômica ou social mantendo as condições para o seu uso pelas gerações vindouras (PEREIRA, 2020).

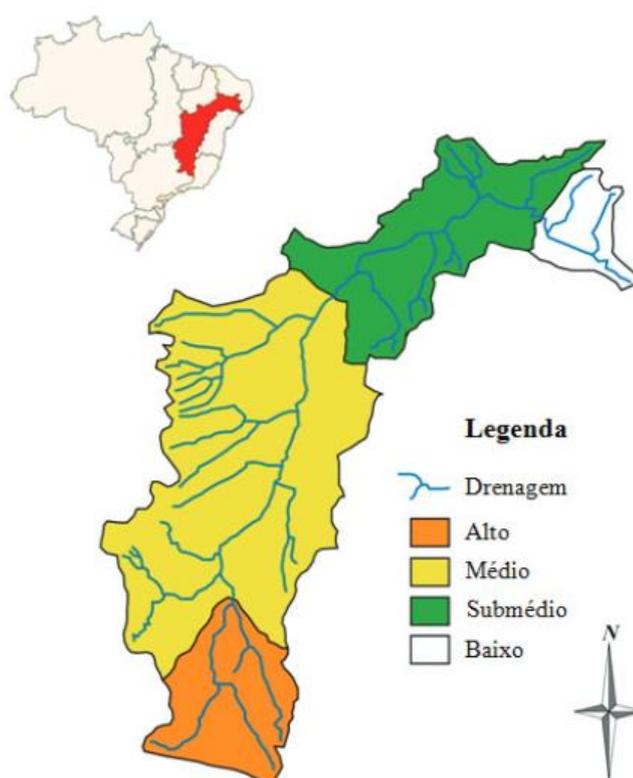
O estudo das Secas se faz necessário para o contexto Hidro Energético. É preciso criar estratégias e planejamento para o uso e disponibilidade da água, de modo a tornar-se capaz de lidar com um futuro incerto. A inserção de tecnologias que possibilitem um maior entendimento dos aspectos que afetam a geração de energia, associada à vontade política são alguns dos fatores que trazem soluções reais à medida que se cria esforços para acompanhar as necessidades de uma população que cresce exponencialmente (SILVA, 2017).

#### 4 CARACTERIZAÇÃO DA BACIA DO RIO SÃO FRANCISCO

A bacia hidrográfica do rio São Francisco estende-se pelas regiões Nordeste, Sudeste e Centro-Oeste do Brasil. O rio São Francisco carinhosamente chamando de “VELHO CHICO” nasce na Serra da Canastra e percorre cerca de 2.700 Km pelos os Estados do Distrito Federal, Minas Gerais, Goiás, Pernambuco, Alagoas, Bahia e Sergipe e deságua no Oceano Atlântico no Nordeste brasileiro. A Bacia do São Francisco, com área de drenagem de aproximadamente 639.219 km<sup>2</sup>, representando 7,5% do território brasileiro (ANA, 2002). A Bacia do São Francisco possui 36 afluentes mais importantes, dentre os quais apenas 19 são perenes destacando-se, pela margem direita, os Rios Pará, Paraopeba, Velhas e Verde Grande e, pela margem esquerda, os Rios Abaeté, Paracatu, Urucuia, Pandeiros, Carinhanha, Corrente e Grande (Pereira, S. P; Pruski, F. F; et al, 2007). Onde percorrem, principalmente, em áreas de relevo do tipo planalto.

A Região Hidrográfica do São Francisco se divide em quatro unidades hidrográficas: Alto São Francisco, Médio São Francisco, Sub-médio São Francisco e Baixo São Francisco (ANA, 2015). Ver Figura 6 de acordo com Soares (2013).

**Figura 6 - Unidades hidrográficas da Bacia São Francisco**

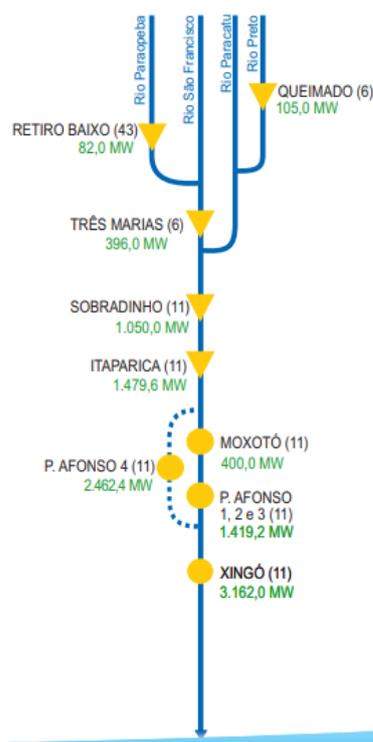


**FONTE:** SOARES, 2013

Seus principais usos são a pesca, irrigação e geração de energia. O potencial hidrelétrico da bacia é de 25.795 MW, dos quais são aproveitados 10.473 MW, distribuídos principalmente nas usinas Três Marias, Queimado, Sobradinho, Itaparica (passou a se chamar Luiz Gonzaga em homenagem ao "rei do baião nordestino), Complexo Paulo Afonso e Xingó (SOARES, 2013).

Os aproveitamentos de Queimado, Retiro Baixo, Três Marias, Sobradinho e Itaparica (Luiz Gonzaga) são com reservatórios, enquanto os aproveitamentos de Moxotó, Complexo Paulo Afonso e Xingó são aproveitamentos a fio d'água<sup>1</sup>. As usinas hidroelétricas são construídas em um sistema de cascata (no leito de um mesmo rio). As operações das usinas à montante interferem diretamente nas operações das usinas à jusante, logo, é preciso que o planejamento seja feito de maneira integrada, aumentando sua complexidade.

**Figura 7** - Diagrama esquemático das Usinas da bacia do Rio São Francisco.



FONTE: ONS, 2020

A Usina Hidrelétrica (UHE) Retiro Baixo é um construído no baixo curso do rio Paraopeba entre municípios mineiros de Curvelo e Pompéu . A área inundada pelo

<sup>1</sup> Uma usina a fio d'água aproveita a vazão natural do rio que, por sua vez, depende das chuvas, condição que torna esse modelo vulnerável. (CABRAL, 2013)

reservatório é de 22,58 km<sup>2</sup>, para uma potência instalada de 82 MW, em duas unidades Kaplan de eixo vertical, com potência unitária de 41 MW ( ANEEL, 2017). As águas da usina de Retiro baixo desaguam na usina hidroelétrica de três marias.

Construída na cidade de mesmo nome, a UHE Três Marias está instalada no Rio São Francisco e é o primeiro grande empreendimento hidráulico de múltiplas finalidades realizado no Brasil. A usina conta com 6 unidades geradoras, e seu reservatório tem 1.054,6 km<sup>2</sup> de área. (CEMIG, 2020).

Segundo a CHESF (2020) a UHE de Queimado é está localizada no Rio Preto, na divisa entre os estados de Goiás e Minas Gerais, Brasil. A usina conta com três unidades geradoras. As Usinas Hidrelétricas de Sobradinho e Luiz Gonzaga estão instaladas no rio São Francisco, com área de drenagem de 498.968 km<sup>2</sup> e 592.479 km<sup>2</sup>, bacia hidrográfica da ordem de 630.000 km e 30.000 km<sup>2</sup>, respectivamente.

Formado pelas usinas de Paulo Afonso I, II, III, IV e Apolonio Sales (Moxotó), o Complexo de Paulo Afonso produz 4 milhões, 279 mil e 600 kW. Energia gerada a partir da força das águas da cachoeira de Paulo Afonso, um desnível natural de 80 metros do rio São Francisco. (CHESF, 2020)

A UHE de Xingó também instalada no São Francisco, com área de drenagem de 609.386 km<sup>2</sup>, bacia hidrográfica da ordem de 630.000 km<sup>2</sup>, com extensão de 3.200 km, desde sua nascente na Serra da Canastra em Minas Gerais, até sua foz em Piaçabuçu/AL e Brejo Grande/SE. (CHESF, 2020)

O volume de água transportada pelo rio São Francisco tem uma grande importância, em relação a história, economia e ao desenvolvimento das populações ribeirinhas. Ao longo do seu curso, o volume transportado tem um grande potencial hídrico utilizado por projetos de irrigação e na geração de energia elétrica. (SILVA; BRITO, 2018).

Rica em recursos naturais, a bacia do São Francisco abriga uma diversidade de culturas, locais históricos, sítios arqueológicos e importantes centros urbanos, que, associados à imensidão do rio e às belezas naturais da região, oferecem um grande potencial para o desenvolvimento do turismo, uma atividade ainda pouco explorada (SOARES, 2013).

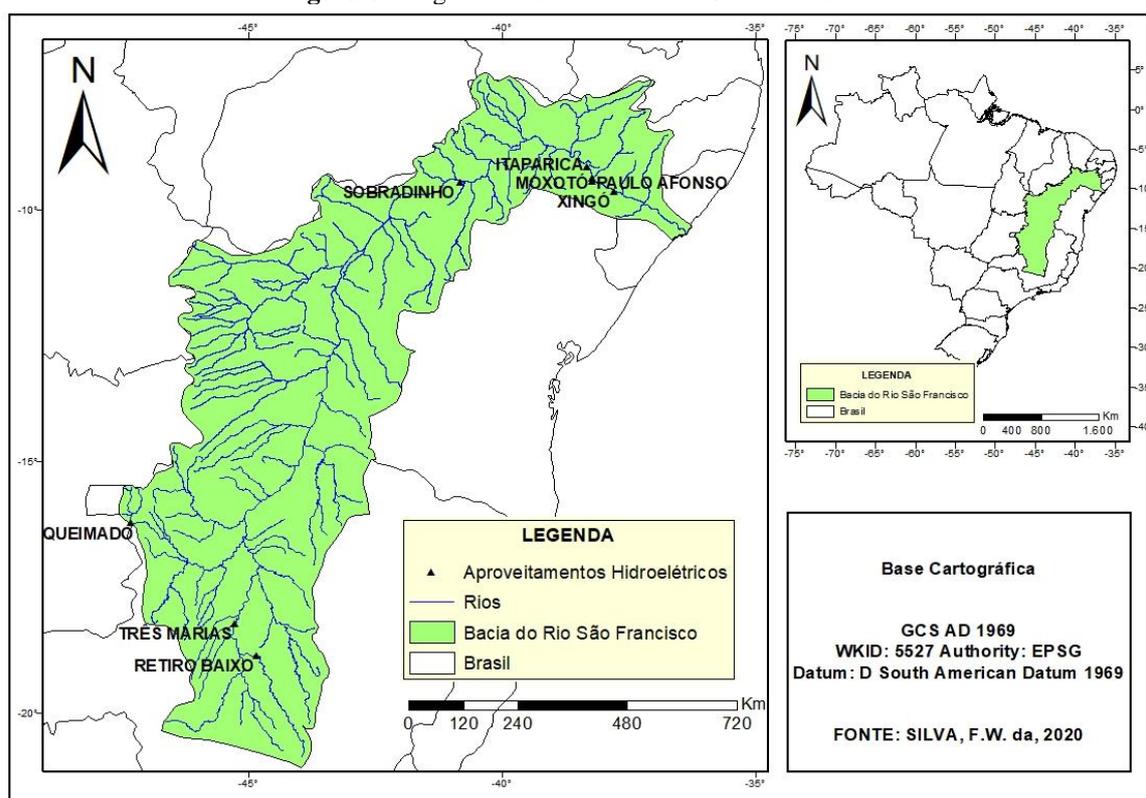
A Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco (BHSF) tem grande importância para o país, não só pelo volume de água transportado em uma região semiárida, mas também pelo potencial hídrico passível de aproveitamento energético e abastecimento hídrico na região Nordeste (VILAR, 2020).

## 5 METODOLOGIA

### 5.1 Região de Estudo

A região de estudo corresponde a bacia do Rio São Francisco e seus respectivos aproveitamentos hidroelétricos: Retiro Baixo, Três Maria, Queimado, Sobradinho, Luiz Gonzaga (Itaparica), Moxotó (Apolônio Sales), Paulo Afonso e Complexo, e Xingó. A **Figura 8** mostra a disposição espacial dos aproveitamentos.

**Figura 8** - Região de Estudo- Bacia do São Francisco



Fonte: Autor

### 5.2 Dados Utilizados

Foram utilizados séries históricas de vazões ( $m^3/s$ ) dos reservatórios das usinas da Bacia do São Francisco do período de 1931 a 2016 disponibilizados pelo Operador Nacional do Sistema (ONS). Utilizou-se dados de produtividade ( $MW_{med}/m^3/s$ ), também disponibilizado pelo ONS.

Utilizou-se dados de índices climáticos, como o índice anual da Oscilação Multidecadal do Atlântico (OMA) através do NOAA (*NOAA.Climate.gov*) e a ODP

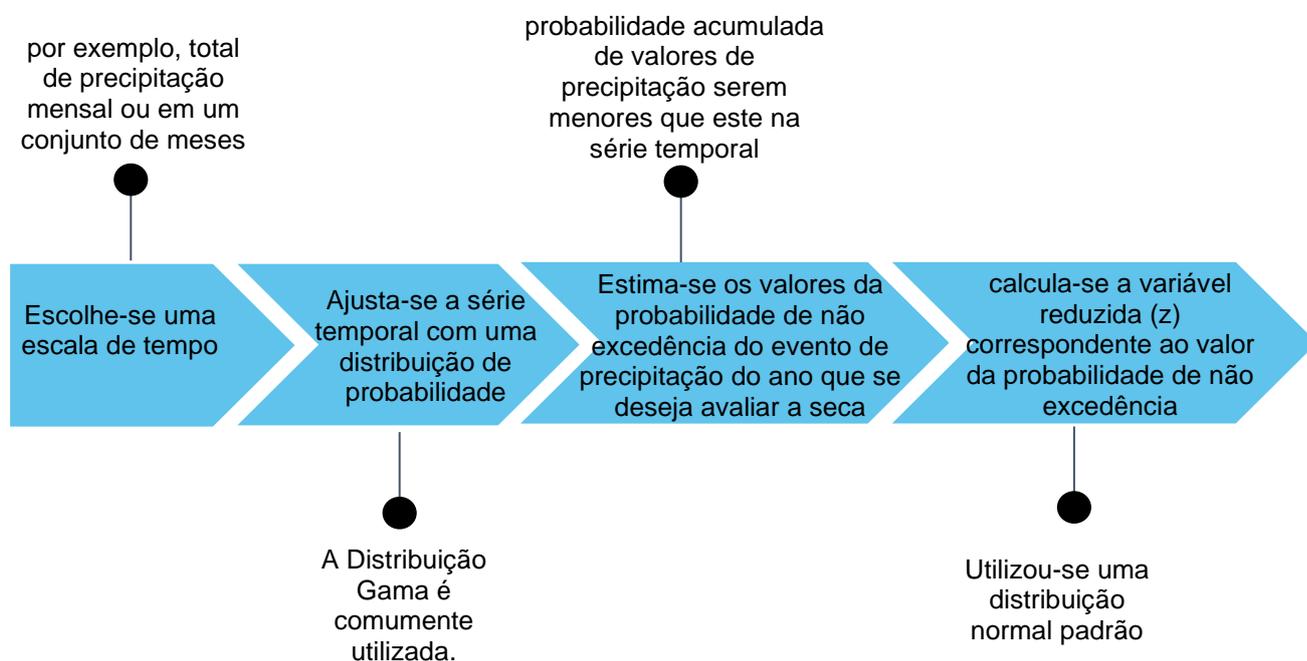
disponibilizados em <http://research.jisao.washington.edu/pdo/PDO.latest> para os anos da série estudada de 1931 a 2016.

### 5.3 Cálculo dos Indicadores hidrológicos: *Standardized Precipitation Index (SPI)*, *Standardized Runoff Index (SRI)*

Nesse trabalho utilizou-se as séries de vazões das séries históricas de 1931 a 2016 de todos os reservatórios da Bacia do Rio São Francisco para o cálculo do SRI. A seguir McKee *et al.* (1993, 1995), apresenta o passo-a-passo para o cálculo do SPI, que por sua vez, é similar ao cálculo do SRI. Enquanto o cálculo do SPI utiliza-se séries de precipitação no SRI utiliza-se séries de vazão naturalizada.

O índice normalizado de precipitação *Standardized Precipitation Index (SPI)*, desenvolvido por McKee *et al.* (1993, 1995), baseia-se na distribuição de probabilidade da precipitação e pode ser calculado em diferentes escalas de tempo. Tendo em vista o índice ser normalizado, permite adequada comparação para diferentes locais.

Para o cálculo do SPI McKee *et al.* (1993, 1995), descreve os seguintes passos:



**FONTE:** McKee *et al.* (1993, 1995), elaborado pelo autor

Os procedimentos descritos no fluxograma serão detalhados a seguir para o cálculo do SRI:

Escolheu-se uma escala de tempo anual das vazões de 1931 a 2016. Para o ajuste da série temporal utilizou-se, como distribuição de probabilidade, a função Gama no ajuste dos dados, definida pela **Equação 1**:

$$f(x) = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} x^{\alpha-1} e^{-\frac{x}{\beta}}, x > 0 \quad (1)$$

Onde:

$\alpha > 0$  é o parâmetro de forma;

$\beta > 0$  o parâmetro de escala;

$x$  é a variável aleatória em estudo (vazões) e

$$\Gamma(x) = \int_0^\infty y^{\alpha-1} e^{-y} dy \quad \text{é a função gama.} \quad (2)$$

A distribuição gama, **Equação 1**, só está definida para  $x > 0$ , logo quando um dado mês apresenta valores nulos, faz-se necessário o uso de uma transformação da distribuição de probabilidade acumulada, dada pela **Equação 3**:

$$F(x) = q + (1 - q) G(x) \quad (3)$$

Onde:

$G(x)$  é conhecida como função gama incompleta, que é a função de distribuição estimada a partir dos valores não nulos da série de dados utilizada;

$q$  é a probabilidade de zeros na amostra.

Com isso Pereira e Paulo (2004), define-se o SPI, conforme a **Equação 4**:

$$SPI = \varphi^{-1}[F(x)] \quad (4)$$

em que  $\varphi$  a função de distribuição normal reduzida.

Estimou-se os valores de probabilidade do ano que se deseja avaliar a seca. Os valores de SRI foram classificados conforme a **Tabela 1** definido por Cunha (2008).

**Tabela 1:** Limiares dos índices SRI e SPI com e suas devidas categorias e estados

SPI e SRI	Classificação	Categoria	Estado
$> -0,79$	D0	Próximo a Normalidade	Normal
$-0,80$ a $-1,29$	D1	Seca Fraca	Pré-Alerta
$-1,30$ a $-1,59$	D2	Seca Moderada	Alerta
$-1,60$ a $-1,99$	D3	Seca Severa	Emergência I
$\leq -2,00$	D4	Seca Extrema	Emergência II

FONTE: Adaptado de Cunha (2008).

As vazões representam, de forma sintética, os processos hidrológicos da bacia hidrográfica associada à sua seção fluvial em escalas de tempo mensal a sazonal (SHUKLA e WOOD, 2008).

#### 5.4 Cálculo da Duração e Severidade das Secas

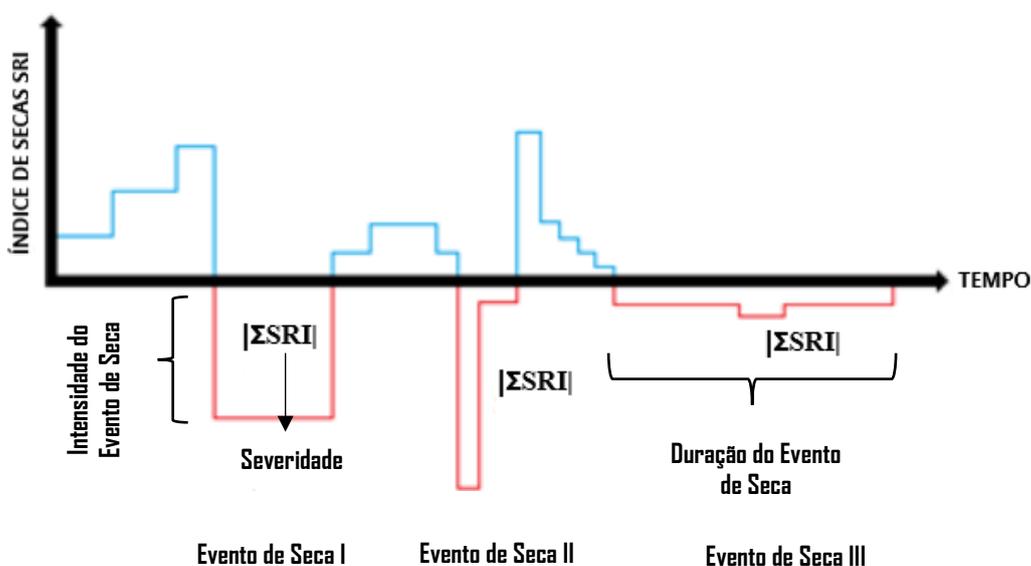
Para classificação dos eventos de secas, quanto a duração e severidade, seguiu-se as definições de Cunha (2008) cujo o índice alcança um valor igual ou inferior a  $-0,79$ . Para esse estudo foram consideradas a duração e severidade das secas com base nos dados de SRI mensal para o período de 1931 a 2016.

Considerou-se a duração dos eventos de secas quando o conjunto de meses, apresentava-se um índice de SRI menor ou igual a  $-0,79$  (A duração do evento de seca para quando é observado um valor maior que  $-0,79$ ).

A severidade dos eventos de secas foi calculada somando-se os índices negativos de SRI menores ou igual a  $-0,79$  (O valor da severidade é o módulo do somatório dos índices de  $SRI \leq -0,79$  para cada intervalo de tempo dentro do evento de seca em questão, ou seja  $|\Sigma SRI|$ ).

Quanto menor o índice de seca, maior é a intensidade dos eventos de Seca. Para um melhor entendimento, quanto a classificação, o Evento de seca I tem uma maior severidade, o Evento de seca II tem uma maior intensidade, enquanto o evento de Seca III tem uma maior duração. Observe a **Figura 9** a qual exemplifica essas características.

**Figura 9** - Caracterização da Severidade e Duração e Intensidade dos Eventos de Seca



FONTE: Adaptado de Neto, 2017

## 5.5 Cálculo da Energia Natural Afluente (ENA)

A Energia Natural Afluente (ENA) foi obtida, multiplicando-se a vazão natural afluente dos aproveitamentos da bacia do São Francisco por sua produtividade descrito na **Tabela 2** de acordo com a **Equação 5**.

**Tabela 2:** Produtividade (MWmed/m<sup>3</sup>/s) dos aproveitamentos da bacia do São Francisco

ID	CÓDIGO DE POSTO	USINA/ APROVEITAMENTOS	PRODUTIBILIDADE DE CADASTRADA	PRODUTIBILIDADE ADOTADA
058	155	RETIRO BAIXO	0,3261	0,3261
059	156	TRES MARIAS	0,4301	0,4301
060	158	QUEIMADO	1,6039	1,6039
061	169	SOBRADINHO	0,2410	0,2410
062	172	ITAPARICA (Luiz Gonzaga)	0,4479	0,4479
063	175	PAULO AFONSO	-	0,0000
064	173	MOXOTÓ (Apolônio Sales)	-	0,0000
065	176	COMPLEXO PAULO AFONSO	1,0201	1,0201
066	178	XINGÓ	1,0846	1,0846

**FONTE:** Autor (Dados do ONS)

A unidade de medida da ENA é MWmed, que se refere à relação entre a energia gerada e o tempo de funcionamento das instalações.

A ENA é calculada a partir da energia produzida pelas vazões naturais afluentes e das produtividades equivalentes ao armazenamento de 65% do volume útil dos reservatórios dos aproveitamentos hidroelétricos (SILVA,2017). Os valores da ENA podem ser calculados em base diária, semanal, mensal ou anual e, também, por usinas, bacia e por subsistema, de acordo com os sistemas de aproveitamentos hidroelétricos existentes nas configurações de bacias hidrográficas e de subsistemas elétricos, com uso das seguintes expressões:

$$ENA_{usina}(t) = \sum_{y=1}^u [Q_{nat}(y, t) \cdot p(y)] \quad (5)$$

$$ENA_{bacia}(t) = \sum_{i=1}^n [Q_{nat}(i, t) \cdot p(i)] \quad (6)$$

$$ENA_{subsistema}(t) = \sum_{j=1}^m [Q_{nat}(j, t) \cdot p(j)] \quad (7)$$

Onde,

t é o intervalo de tempo adotado para o cálculo da ENA;

y é o aproveitamento considerado;

u é o número de aproveitamentos.

$Q_{nat}$  é a vazão natural do aproveitamento no intervalo de tempo considerado;

p é produtividade média do conjunto turbina-gerador do aproveitamento hidrelétrico, referente à queda obtida pela diferença entre o nível de montante, correspondente a um armazenamento de 65% do volume útil, e o nível médio do canal de fuga;

i é o aproveitamento pertencente ao sistema de aproveitamentos da bacia considerada;

n é o número de aproveitamentos existentes no sistema de aproveitamentos da bacia considerada;

j é o aproveitamento pertencente ao sistema de aproveitamentos do subsistema considerado e;

m é o número de aproveitamentos existentes no sistema de aproveitamentos.

## 6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 6.1 Análise dos índices de seca

O Índice de Escoamento Padronizado (SRI) nos mostra uma reflexão sobre as secas observadas na bacia do São Francisco. Neste estudo, foram analisadas o SRI anual. Como mostrado nos resultados descritos na **Seção 5.3** para índices maiores ou iguais a -0,79 tem-se uma classificação de situação próximo a normalidade; índices menores que -0,80 e maiores que -1,29 indicam secas fracas (entre a linha verde e a linha azul). Para valores menores que -1,30 e maiores que -1,59 indicam situação de secas moderadas (entre as linhas azul e a linha amarela). Para valores menores que -1,60 e maiores que -1,99 indicam situação de secas extremas (entre a linha amarela e a linha vermelha). E para índices menores que -2 indica-se situação de secas extremas. Devido a uma queda significativa no escoamento a partir de 2010, ocorreu uma flutuação decadal de secas extremas. Esses eventos podem estar relacionados a fase positiva da ODP e OMA verificada nos gráficos da **Figura 3** e **Figura 5**.

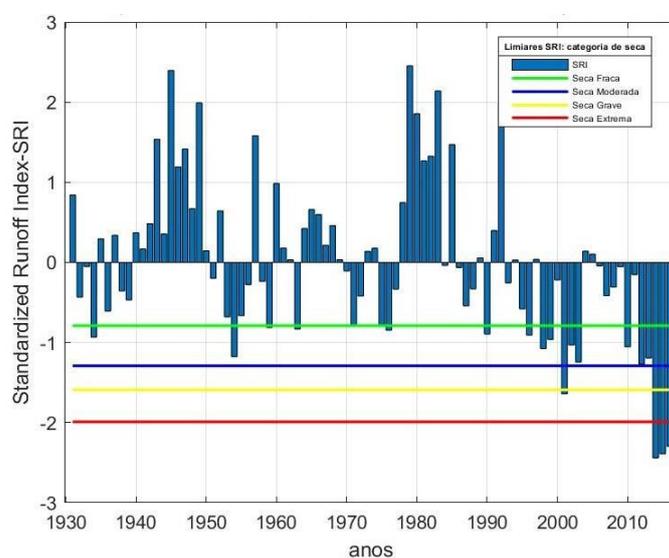
#### 6.1.1 Análise do índice de escoamento normalizado *Standardized Runoff Index (SRI)*

Para facilitar a interpretação dos resultados obtidos para o SRI foi feita uma representação gráfica dos valores do SRI anual obtidos para o final de cada ano hidrológico (avaliação da vazão anual) para todos os reservatórios da Bacia do São Francisco.

A análise dos valores obtidos para o SRI nos permite identificar os anos em que apresentaram fenômenos de seca. As situações de seca (fraca, moderada, grave ou extremas) correspondem aos valores de SRI inferiores a - 0,80 (De acordo com a classificação de Cunha (2008) disposto na **Tabela 1**).

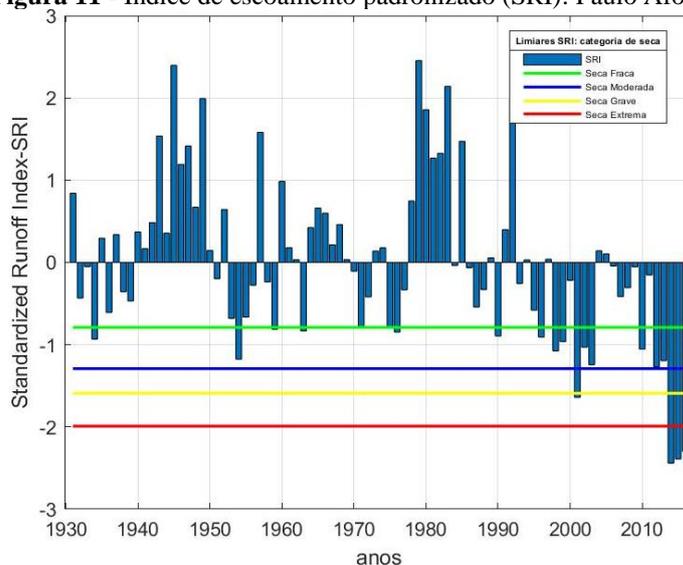
O período de seca mais intenso para os reservatórios de Paulo Afonso, seguinte ao ano de 2001 classificado como sendo de seca extrema, foram os anos de 2014/15/16. Os anos de 1934/54/96/98/ e 2002/03/10/12/13, apresentaram uma classificação de severidade de seca moderada. Esses anos coincidiram com a fase positiva da OMA e ODP.

**Figura 10** - Índice de escoamento padronizado (SRI): Complexo Paulo Afonso



**FONTE:** Autor

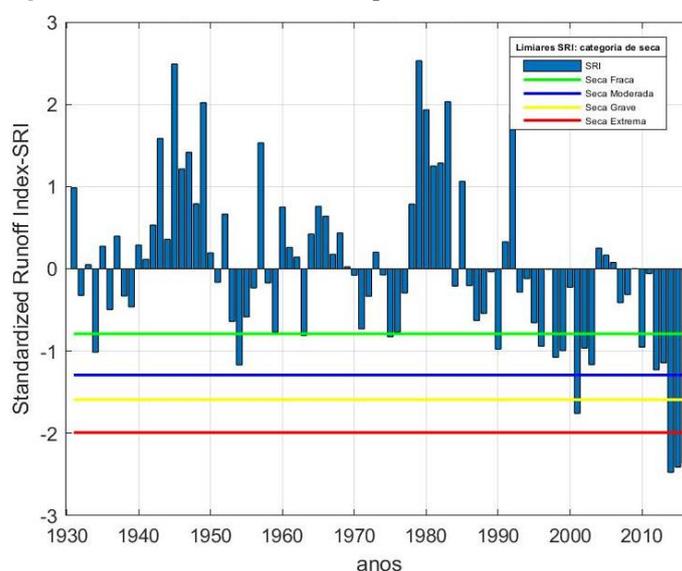
**Figura 11** - Índice de escoamento padronizado (SRI): Paulo Afonso



**FONTE:** Autor

Na avaliação do SRI Anual para o reservatório de Sobradinho destaca-se para os anos de 1934/54/64/76/90/96/98, 2002/03/04/10/12/13 como sendo seca fraca, o ano de 2001 como sendo seca grave e os anos de 2014,2015,2016 como sendo o período de maior severidade de seca da série histórica considerada, classificando-se os anos como de seca extrema.

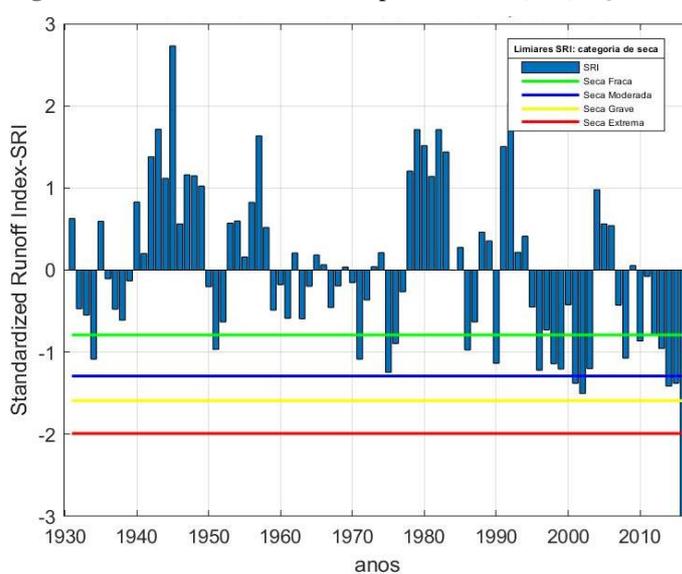
**Figura 12 - Índice de escoamento padronizado (SRI): Sobradinho**



**FONTE:** Autor

O índice de escoamento padronizado demonstrou para o reservatório de Queimado seca grave nos anos de 2001, 2002, 2015, 2016 e seca extrema no ano de 2017. Na década de 90 e nos anos 2000 houve um maior número de anos com seca considerada moderada.

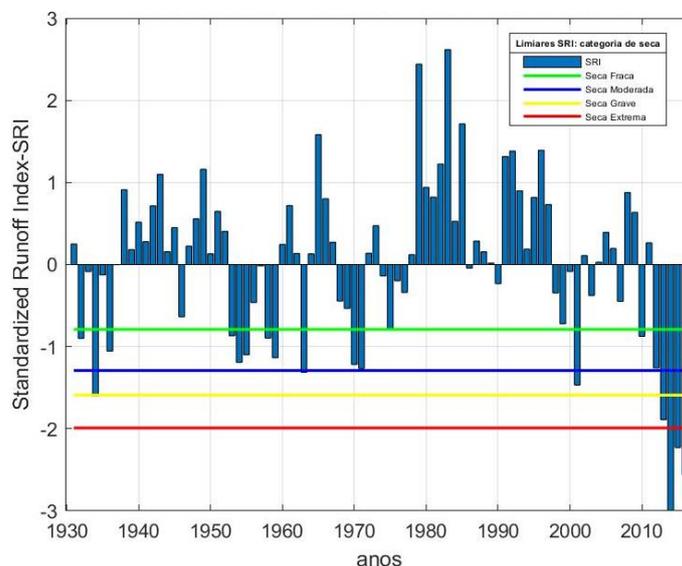
**Figura 13 - Índice de escoamento padronizado (SRI): Queimado**



**FONTE:** Autor

O índice de escoamento padronizado para o reservatório de Retiro Baixo mostrou que em 1932 e 1936, seguida pela década de 50, houve eventos de seca fraca. A partir de 2010 observou-se índices muito baixo, menores que -1,59, classificando secas severas e extremas. ( período da série considerada, mais significativo)

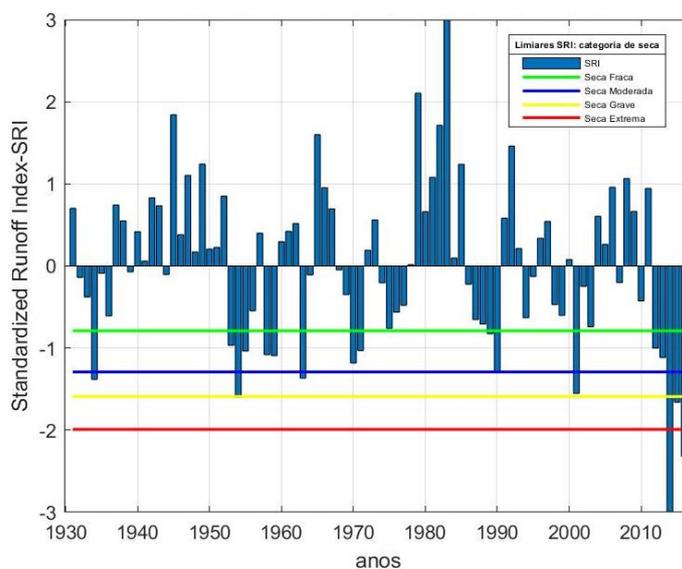
**Figura 14** - Índice de escoamento padronizado (SRI): Retiro Baixo



**FONTE:** Autor

Os anos de 1954, 1956, 1958, 1959, 1970, 1971, 1990, 2011 e 2012 apresentaram secas fracas para o reservatório de Três Marias. Os anos de 1934, 1955, 1963 e 2000 apresentaram anos de secas moderadas. Os anos de 2014 e 2016 apresentaram secas extremas.

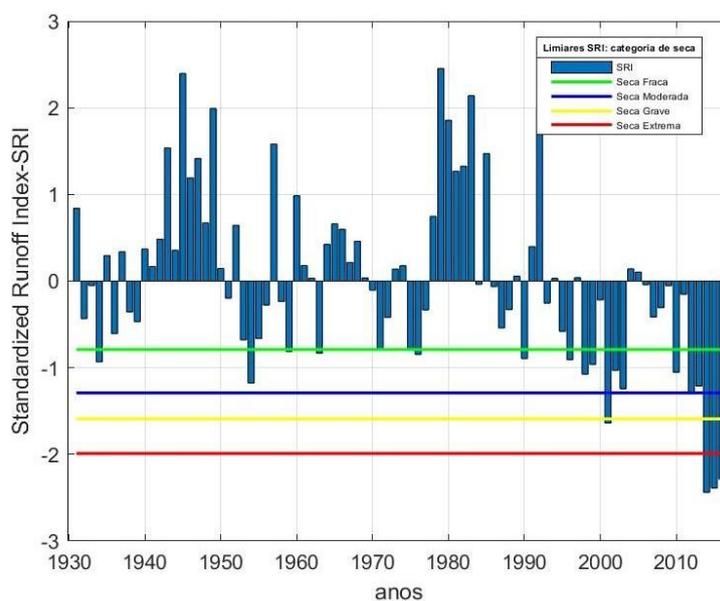
**Figura 15** - Índice de escoamento padronizado (SRI): Três Marias



**FONTE:** Autor

Para o reservatório de Xingó os anos de secas fracas foram semelhantes aos demais: 1934, 1954, 1959, 1963, 1975. A década de 90 apresentou o maior número de anos com secas fracas. Além disso os anos 2002, 2003, 2010, 2012 e 2013 apresentam também secas fracas. O ano de 2001 apresentou seca moderada. Enquanto os anos de 2014, 2015 e 2016 apresentaram secas extremas.

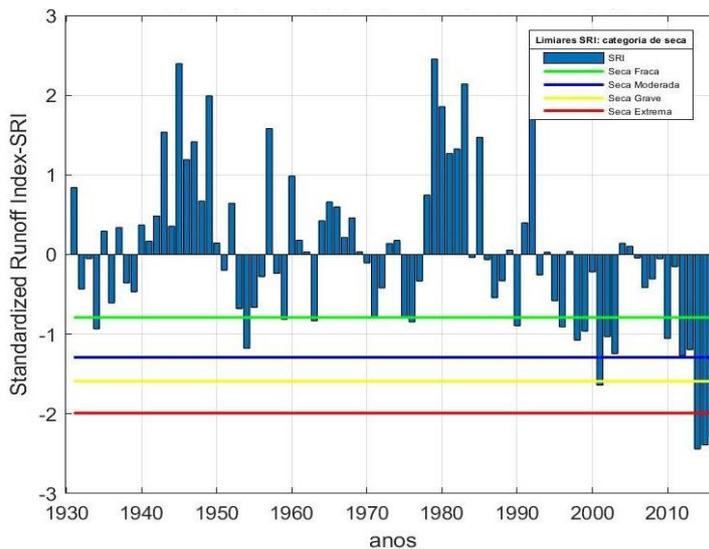
**Figura 16 - Índice de escoamento padronizado (SRI): Xingó**



**FONTE:** Autor

Para o reservatório de Moxotó (Apolônio Sales) observou-se secas fracas nos anos de 1934, 1954, 1959, 1963, 1971, 1976, 1990, 1996, 1998, 1999, 2001, 2002, 2010, 2012, 2013. O ano de 2001 foi caracterizado como um período de seca grave. Para os anos de 2014, 2015 e 2016 o índice de escoamento padronização caracterizou-se como seca extrema.

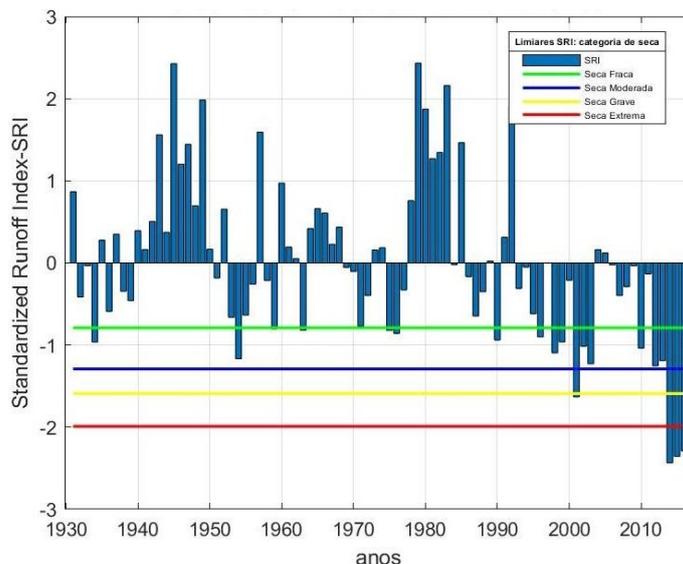
**Figura 17** - Índice de escoamento padronizado (SRI): Moxotó (Apolônio Sales)



FONTE: Autor

Para o reservatório de Itaparica (Luiz Gonzaga), observou-se secas fracas pontuais no decorrer da série histórica, com predominância na década de 90 e início dos anos 2000. Os anos de 2014, 2015 e 2016 foram anos de secas extremas.

**Figura 18** - Índice de escoamento padronizado (SRI): Itaparica (Luiz Gonzaga)



FONTE: Autor

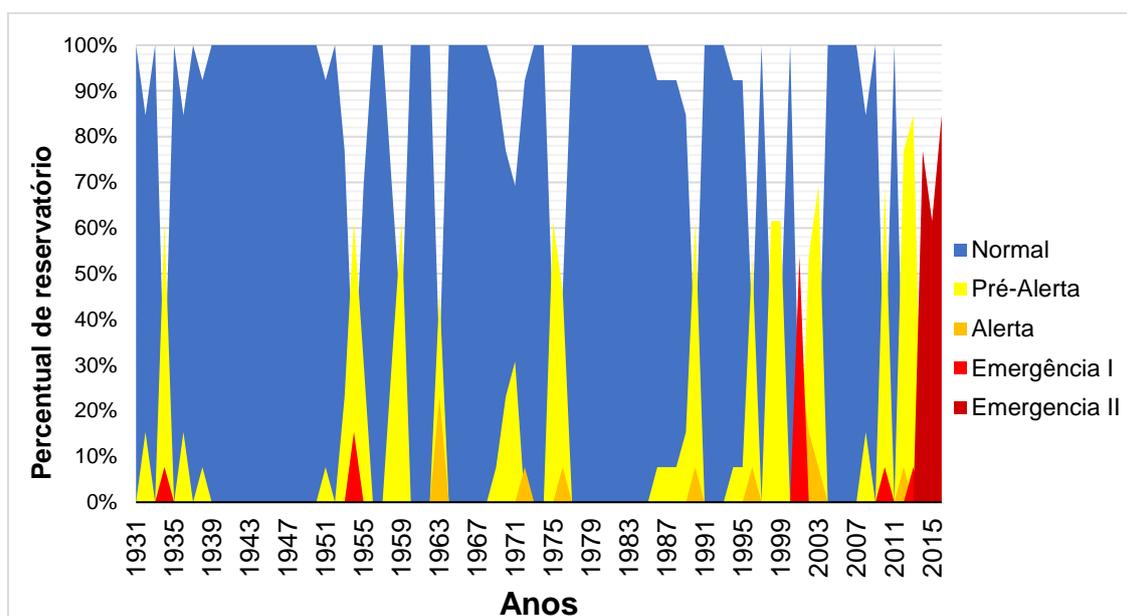
Os Índices de Escoamento Padronizados (SRI), para a maioria dos reservatórios, caracterizaram-se como secas fracas, secas moderadas pontualmente. E a partir de 2010 os índices foram menores que -1,99 o que caracteriza períodos de secas severas e extremas. Nesse mesmo período as fases a OMA e ODP estavam em fases positivas o que pode está relacionado com esses eventos. A partir de 2010 observou-se eventos de El Niño com certa intensidade.

## 6.2 Análise da duração e Severidade das Secas

A **Figura 19** mostra o percentual do número de reservatórios da bacia do São Francisco, e seu estado de classificação (Normal, Pré-Alerta, Alerta, Emergencial I e Emergencial II) de severidade da seca do SPI, para o período de 1931 a 2016. Observa-se que nos anos 1934, entre 1952 a 1955, 2001 e entre 2012 a 2016 houve estado Emergencial de Seca. Em meados de 1934 pouco mais de 5% dos reservatórios apresentaram estado de Seca Emergencial I. Entre 1952 a 1955 mais de 10% dos reservatórios apresentaram estado de seca Emergencial I. No ano de 2001 mais de 50% dos reservatórios apresentaram estado Emergencial I, esse foi marcada por eventos adversos no que diz respeito a geração de energia onde o sistema elétrico entrou em colapso ocasionando diversos apagões. Entre os anos de 2012 até o fim da série estudada (2016) mais de 80% dos reservatórios da Bacia do São Francisco apresentaram estado de Seca Emergencial II. Período com maior Severidade o que demonstra que estamos passando por um longo período de seca.

É possível observar na **Figura 19**, exceto na década de 40, ao menos um ano nas décadas da série estudada estado de Alerta de Seca com pelo menos 50% dos números de reservatórios. Entre nos anos de 1940 a 1949; 1956; entre 1964 a 1970; entre 1979 a 1985; entre 1991 a 1994 e entre 2004 a 2006 apresentaram 100% dos reservatórios com estado normal, demonstrando ser anos atípicos, com o acontecimento de chuvas em meio a longos períodos de secas, principalmente no período de 2004 a 2006.

**Figura 19** - Percentual de Reservatórios da Bacia do São Francisco e seu estado de seca



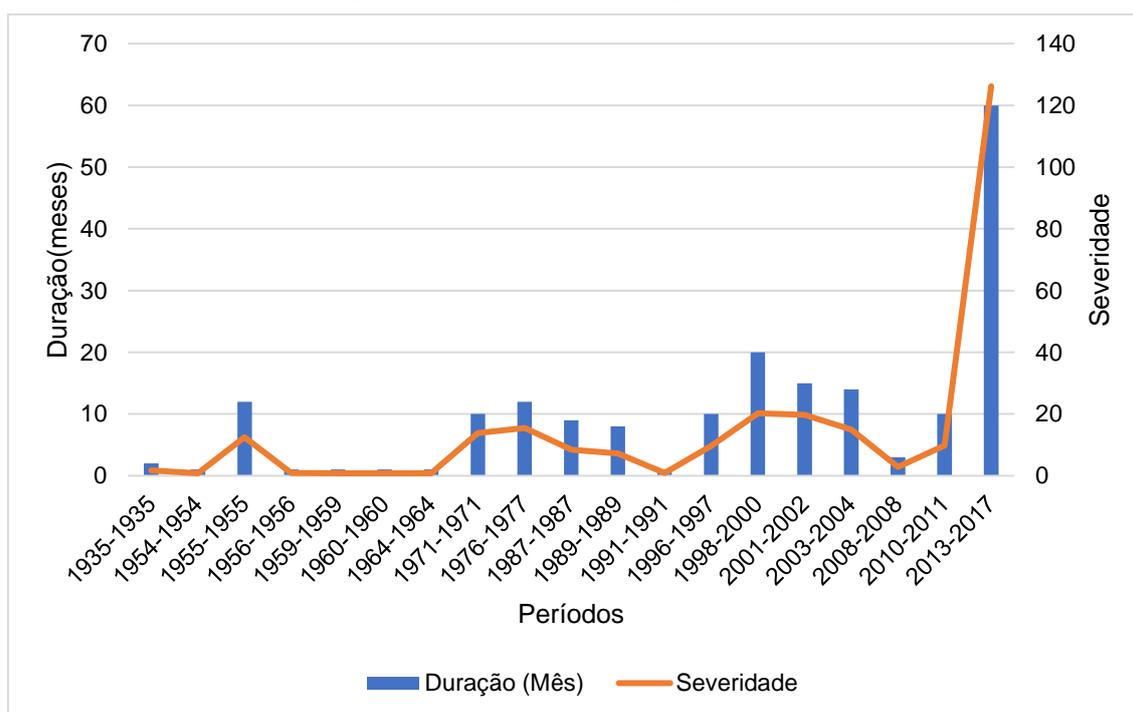
FONTE: Autor

Os principais eventos de seca para cada reservatório da bacia do São Francisco foram analisados individualmente e suas características são apresentadas nas tabelas do **APÊNDICE A**. É importante destacar que para maioria dos eventos de seca analisados apresentaram valores de severidade e duração semelhantes.

As Figuras 20, 21, 22, 23, 24, 25 e 26 a seguir mostram os resultados para a Duração e Severidade dos eventos de secas com base nos dados dos índices de escoamentos normalizados (SRI)  $\leq -0,79$ . Os gráficos apresentam apenas os períodos onde detectou-se tais eventos. O Eixo-Y a esquerda indica a duração (em meses) em que se observou eventos de secas e o Eixo-Y a direita indica o somatório (em módulo) dos índices de SRI para os respectivos meses em que houve a duração dos eventos de secas.

A **Figura 20** apresenta valores de severidade e duração de secas para os aproveitamentos de Apolônio Sales e Paulo Afonso observa-se maior período de duração dos eventos de secas entre 2013 a 2017 (Ver **APÊNDICE A**), cerca de 60 meses. Também apresentou a maior severidade de seca, pouco mais de 120. Seguido pelos anos de 1998 a 2000; 2001 a 2002 totalizando assim 20 e 15 meses de duração, respectivamente. Esse último período foi registrado apagões no Brasil e houve grandes problemas relacionados a demanda e oferta de Energia. É possível que os eventos de secas registrados na série estejam relacionados a fase quente da ODP e OMA.

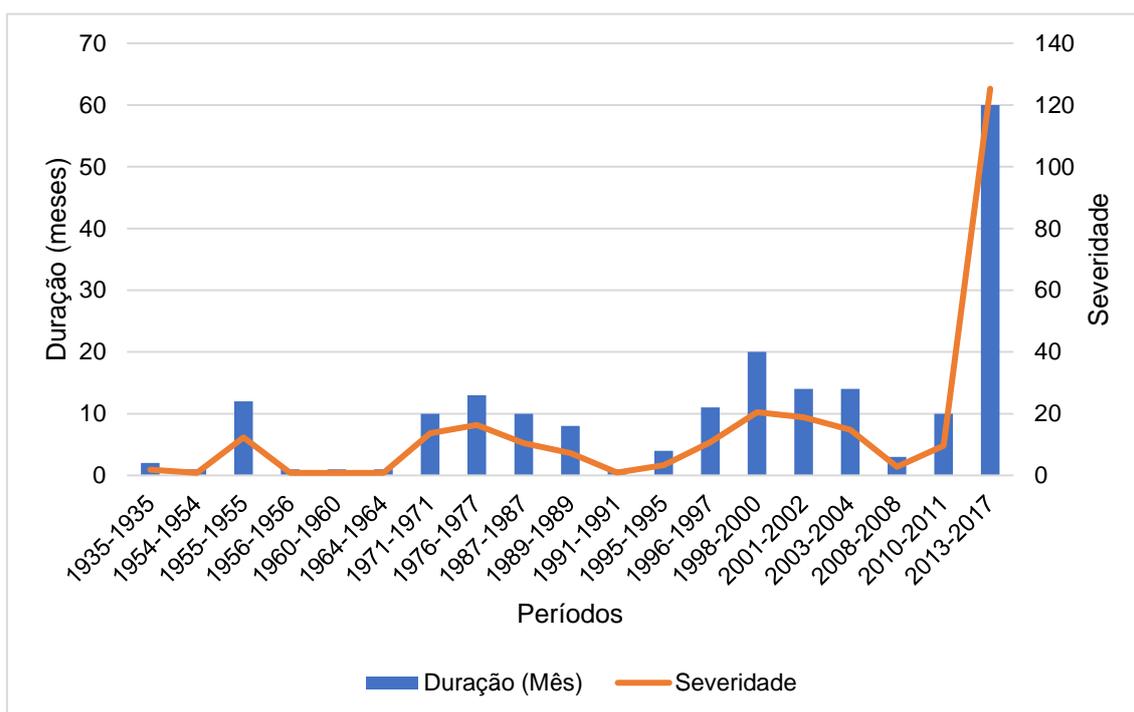
**Figura 20** - Duração e Severidade das Secas -Apolônio Sales e Paulo Afonso



**FONTE:** Autor

A **Figura 21** apresenta, para o reservatório de Itaparica, uma maior duração de seca no período entre 2013 a 2016, seguida pelo período de maior duração entre 1998 e 2000. Tal resultado contribuiu para a redução na produção de energia, ocasionando um déficit. Tal situação incentivou o Governo a criar medidas para o racionamento de energia.

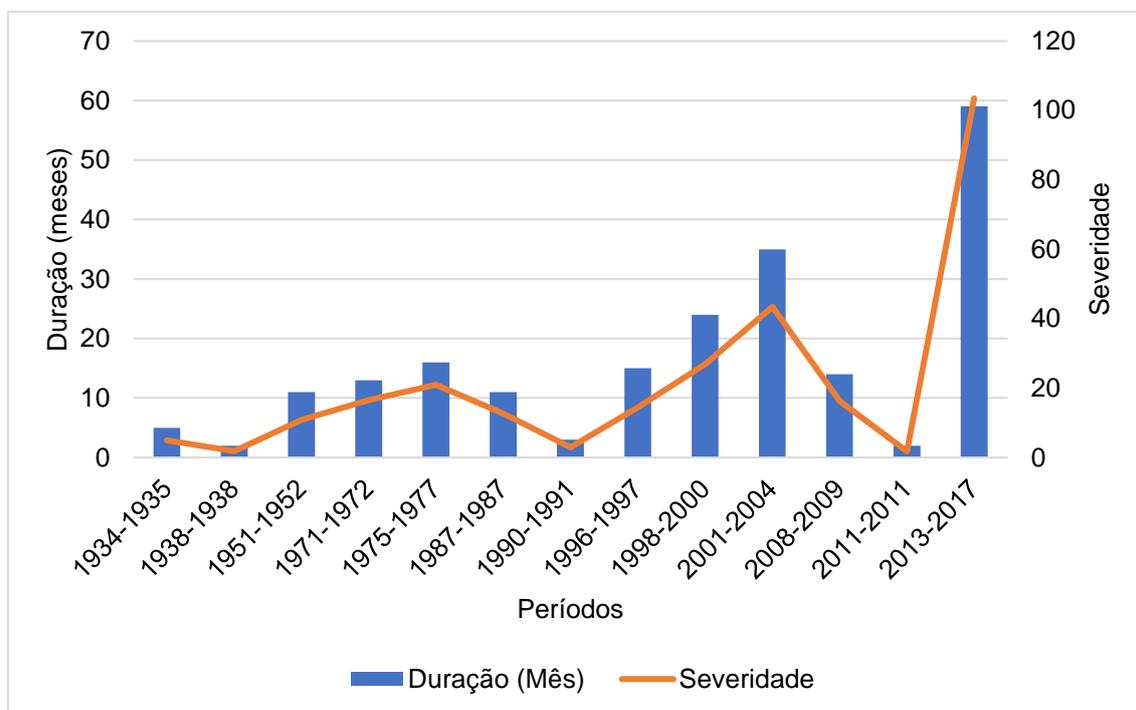
**Figura 21** - Duração e Severidade das Secas - Itaparica



**FONTE:** Autor

O reservatório de Queimado apresentou eventos de secas mais frequentes entre os períodos de 2013 a 2016, com maior severidade. Os anos 90 apresentaram períodos crescente de severidade de Seca e também o período com duração considerável.

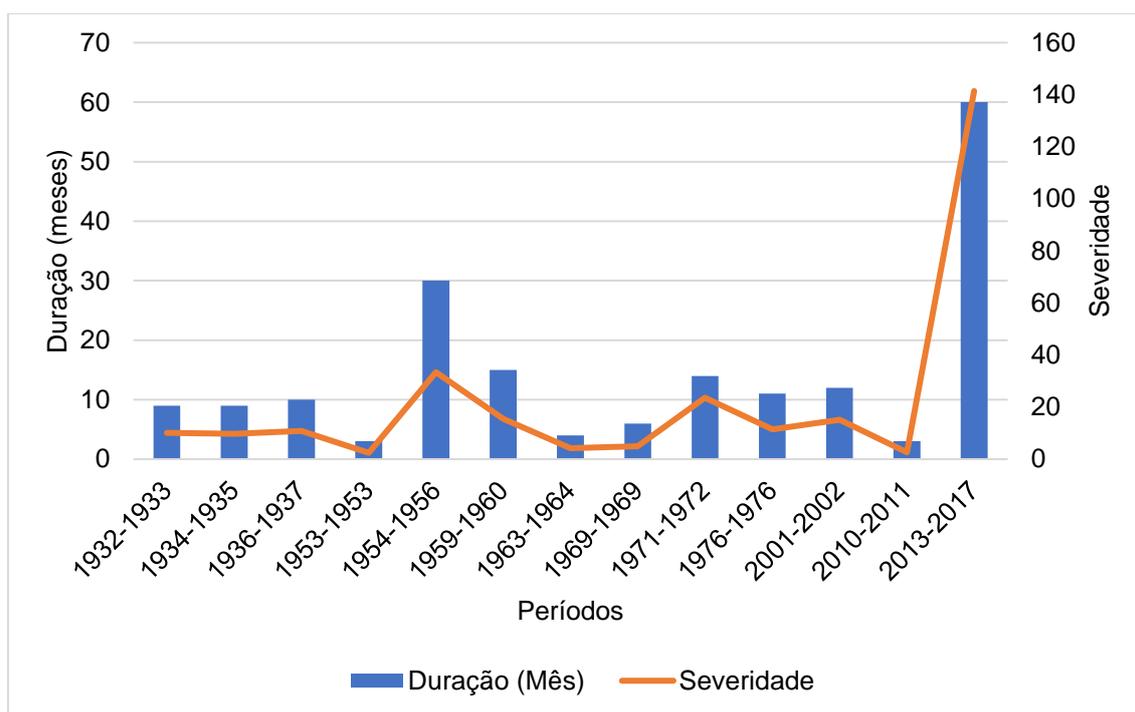
**Figura 22** - Duração e Severidade das Secas – Queimado



**FONTE:** Autor

Podemos observar pela curva de severidade dos eventos de secas para o reservatório de Retiro baixo, **Figura 23**, que houve período com maior severidade, dentre os reservatórios considerados, somando 140. O gráfico de barras mostra um total de 60 meses de eventos de secas distribuídos entre os anos de 2013 a 2016. No período entre 1954 e 1956 obteve-se a segunda maior severidade de seca, atingindo 40, com 30 meses de duração.

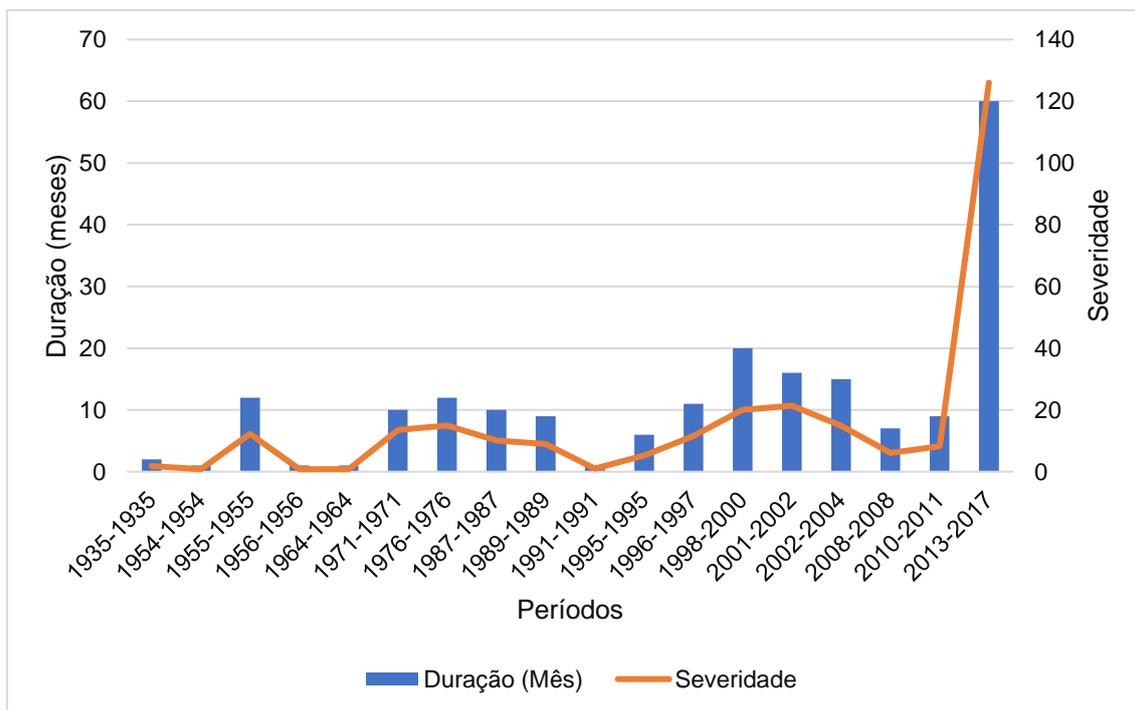
**Figura 23** - Duração e Severidade das Secas- Retiro baixo



**FONTE:** Autor

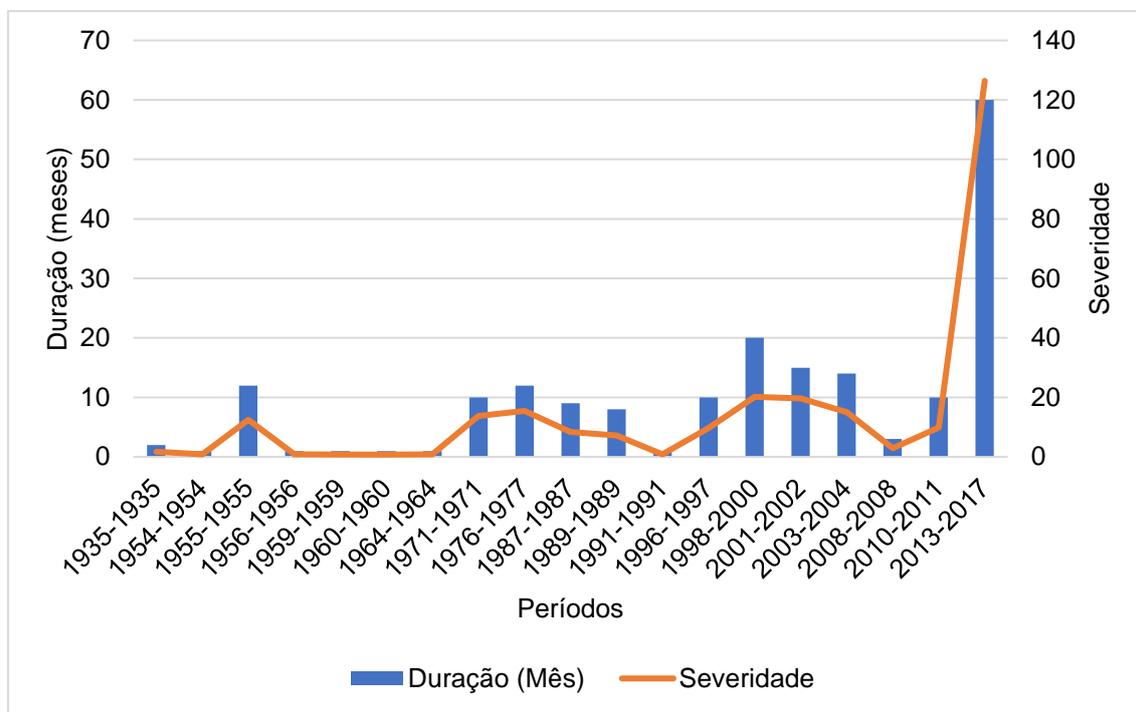
Os reservatórios de Sobradinho e Xingó apresentaram curva de severidade semelhantes (**Figura 24** e **Figura 25**) e duração de eventos de secas. Destacamos os períodos com maior severidade entre 2013 a 2016 com cerca de 120. Entre 1998 a 2002 em torno de 30 e no ano de 1955 com severidade cerca de 20. Para os períodos considerados houve eventos de secas respectivamente de 60,  $\cong$  40 e  $\cong$  13 meses de duração.

**Figura 24** - Duração e Severidade das Secas – Sobradinho



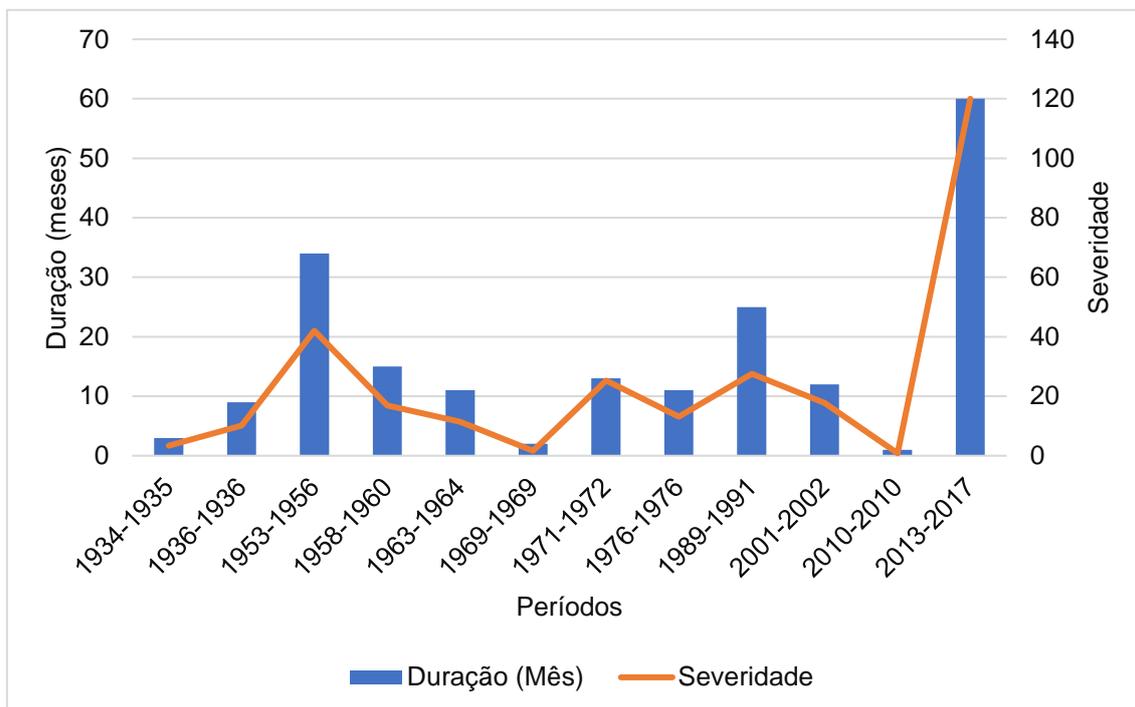
**FONTE:** Autor

**Figura 25 - Duração e Severidade das Secas – Xingó**



**FONTE:** Autor

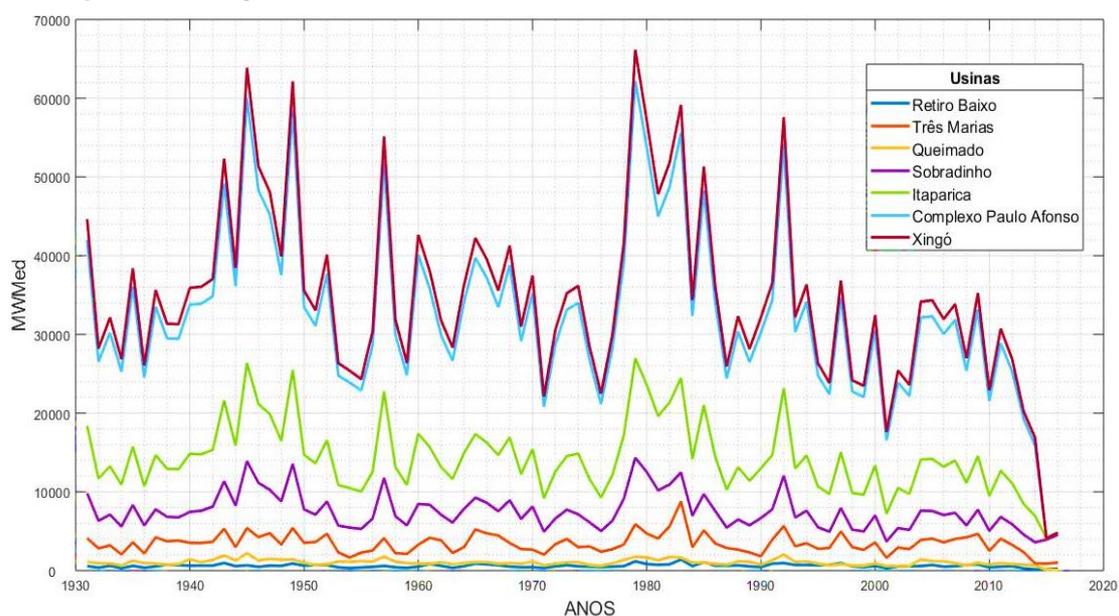
Podemos observar na **Figura 26** que o período entre 2013 a 2017 ocorreu maior severidade e duração das secas para o reservatório de Três Marias. O período entre 1953 a 1956 houve uma duração de seca de aproximadamente 35 meses com severidade em torno de 40. Figuras de duração e Severidade das bacias Incrementais podem ser vistas no **APÊNDICE B**.

**Figura 26** - Duração e Severidade das Secas - Três Marias

FONTE: Autor

### 6.3 Análise dos impactos da seca na vazão e variabilidade da ENA

O gráfico da **Figura 27** apresentam a ENA anual em Mega Watts Médio (MWmed) para o período de 1931 a 2016 para os reservatórios da Bacia do São Francisco.

**Figura 27** - Energia Natural Afluyente (ENA) Bacia do São Francisco- Período de 1931 a 2016

FONTE: Autor

Dos reservatórios considerados da Bacia do São Francisco, o aproveitamento do Complexo Paulo Afonso e Xingó apresentaram uma maior série de Energia Natural Afluente. Embora tais aproveitamentos tenham usina a fio d'água a potência instalada é alta, na ordem de 3000 MW. Sobradinho mesmo tendo um maior volume e capacidade instalada de geração de Energia, é um reservatório de acumulação e sua operação está diretamente relacionada às operações das usinas a jusante como Xingo e Paulo Afonso. Isso se dar por essas usinas estarem em cascatas.

Obteve uma maior disponibilidade de ENA na década de 80 para os reservatórios. Xingó e Complexo Paulo Afonso, chegou à ordem de 68.000 MWmed. Enquanto que nos anos 2000 os reservatórios apresentaram as piores séries de Energia, menos que 40.000 MWmed.

A partir de 2010 as séries de ENA apresentaram tendência Negativa o que caracteriza um período de menos produção de Energia. Essa tendência negativa de produção de ENA está diretamente relacionado ao estado emergencial de seca.

## 7 CONCLUSÃO

Esse trabalho demonstrou a importância da aplicação dos índices de seca para avaliação das condições de seca na Bacia do São Francisco. Esses índices são variáveis amplamente utilizadas por planejadores de recursos hídricos para análise, monitoramento e previsão de seca, o que a torna uma ferramenta fundamental para a tomada de decisões e conseqüentemente para evitar possíveis transtornos sociais futuros.

O índice de escoamento padronizado-*Standardized Runoff Index* (SRI) permitiu classificarmos os anos das séries estudadas dos reservatórios da bacia do São Francisco como sendo de Seca Fraca, Seca Leve, Seca Moderada e Seca Extrema. Para a maioria dos reservatórios a década de 90 apresentou anos de seca fracas com maior frequência, assim como, a partir de 2010 observou-se maiores ocorrências de secas Severas e extremas. Foi possível concluir ainda, que de 2013 a 2017 a duração e severidade da seca foram as mais longas e severas de toda série histórica, causando um grande impacto na geração de energia nesse mesmo período. Há uma relação direta entre os índices de SRI, com classificação de eventos de seca ( $<-0,79$ ), com as fases positivas dos eventos climáticos da ODP e da OMA.

O SRI abaixo de  $-0,79$  relaciona-se com a baixa produção de Energia Natural Afluyente nos reservatórios da Bacia do São Francisco, isso mostra a necessidade da criação de medidas mitigadoras de forma a contornar os efeitos causados pelas secas. Uma boa gestão hídrica, associada a um planejamento integrado entre os reservatórios contribui para resultados mais assertivos.

## 8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS-ANA. **Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil**. Brasília-DF,2020.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS-ANA. **Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil**. Brasília-DF,2015.

AGENCIA NACIONAL DE ÁGUAS-ANA: **Conjunto De Recursos Hídricos No Brasil**: Regiões Hidrográficas- Superintendência de Planejamento de Recursos Hídricos – SPR- Ed Especial. Brasília, Distrito Federal, 2015.

ALBUQUERQUE, T.M.A. et al. **Avaliação do processo de gestão de seca**: estudo de caso no Rio Grande do Sul. REGA - Revista de Gestão de Água da América Latina - ISSN 2359-1919. Vol. 6 - Nº. 1 – Junho, 2009.

ALMEIDA, M.V et al. **Índice de severidade de seca de Palmer para localidades representativas das microrregiões do litoral e sertão do Estado da Paraíba**. Bebedouro. 2017.

ANEEL - **Atlas de Energia Elétrica do Brasil**. Brasília: Agência Nacional de Energia Elétrica ANEEL, 153p, 2002.

ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica. **Banco de informações de Geração-Energia Assegurada**, 2017

BRASIL. **Balanco Energético Nacional- BEN**. Ano Base 2018. Disponível em : <http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-377/topico-494/BEN%202019%20Completo%20WEB.pdf>. Acesso Dezembro de 2019.

CABRAL, Magali. **Fio de incerteza**. Página 22, n. 77, p. 8-9, 2013.

CAMPOS, J. N. B.; STUDART, T. M. C. **Secas no Nordeste do Brasil**: origens, causas e soluções. 2001.

CEMIG. **Usina Hidroelétrica de Três Marias**. Disponível em: <<https://novoportal.cemig.com.br/usina/tres-marias/>> Acesso em 10 de set 2020.

CHESF- Companhia Hidrelétrica do São Francisco. **Sistemas de Geração**. Disponível em: <<https://www.chesf.gov.br/SistemaChesf/Pages/SistemaGeracao/SistemasGeracao.aspx>> Acesso em 10 set. 2020.

Climatologia: **Oscilação Decadal do Pacífico**: Disponível em <http://la.climatologie.free.fr/enso/enso-pdo3.htm#pdo> Acesso em 03 de out de 2020.

CORREIA, F R. S. **Zonas de Convergência Subtropicais na América do Sul**: características da circulação e fluxos de umidade. Monografia para a obtenção do título de Bacharel em Meteorologia. 2013, pp 106. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2013.

COSTA, J. A. **O fenômeno El Niño e as secas no Nordeste do Brasil**. EDUCTE: Revista Científica do Instituto Federal de Alagoas, v. 3, n. 1, 2012.

CUNHA, R.L.A. **Definição de cenários de referência para a avaliação dos impactos das secas**. Tese de Mestrado, Mestrado Integrado em Engenharia Civil -2007/2008— Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2008.

DANTAS, L. G. et al. **Oscilação Decadal do Pacífico e Multidecadal do Atlântico no Clima da Amazônia Ocidental**. Revista Brasileira de Geografia Física, v. 3, p. 600-611, 2012.

DIAS, M. V. X.; BORTONI, E. da C.; HADDAD, J. **Geração distribuída no Brasil: oportunidades e barreiras**. Revista Brasileira de Energia, v. 11, n. 2, p. 1-11, 2005.

EMBRAPA. **Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária**, 2015. Disponível em <<https://www.embrapa.br>> 2020.

ESTRELA, T. et al., *Droughts and the European water framework directive: Implications on Spanish river basin districts, in: Drought Management and Planning for Water Resources*. 2006.

FILHO, J. G. R. **Aplicações da Técnica de Análise de Correlações Canônicas na Previsão Climática Sazonal no Ceará**. 2019. 124 f. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual do Ceará - UECE Mestrado em Ciências Físicas Aplicadas , Fortaleza, CE. 2019.

FREIRE, J. L. M.; LIMA, J. R. A.; CAVALCANTI, E. P. **Análise de aspectos meteorológicos sobre o Nordeste do Brasil em anos de El Niño e La Niña**. Revista Brasileira de Geografia Física, v. 3, p. 429-444, 2011.

FUNCEME. **Sistemas meteorológicos causadores de chuva na região nordeste do brasil: Zona de Convergência Intertropical**. Disponível em: <[http://funceme.br/produtos/script/chuvas/Grafico\\_chuvas\\_postos\\_pluviometricos/entender/entender2.htm](http://funceme.br/produtos/script/chuvas/Grafico_chuvas_postos_pluviometricos/entender/entender2.htm)> Acesso em 23 de Set. 2020.

GARCIA, S. R. **Variabilidade do sistema de monção da América do Sul: Relações com a oscilação decadal do Pacífico**. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais–INPE, 2006.

Hinkle DE, Wiersma W, Jurs SG. *Applied Statistics for the Behavioral Sciences*. 5th ed. Boston: Houghton Mifflin; 2003.

IEA: **International Energy Agency**. Key world energy statistics 2010. S. France. Available from:, [http://www.iea.org/textbase/nppdf/free/2010/key\\_stats\\_2010.pdf](http://www.iea.org/textbase/nppdf/free/2010/key_stats_2010.pdf); 2010.

IEA. **International Energy Agency**. Disponível:<<https://www.iea.org/reports/water-energy-nexus>> . Acesso em jan. de 2020

INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA-IPEA. **Setor elétrico: desafios e oportunidades.** Brasília-DF,2011.

JÚNIOR, L. M. A. **Desenvolvimento de um sistema de informação e alerta precoce da seca e elaboração de estratégias de planejamento proativo de adaptação às secas urbanas.** 201 f. : il. color. Tese (doutorado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação. Fortaleza, 2018.

Kousky, V. E.; Cavalcanti, I. F. A. (1984). **Eventos Oscilação Sul/El Niño: característica evolução e anomalias de precipitação.** Ciência e Cultura. v. 36, nº 11, p. 1888-1899.

LÁZARO, Y. M. C. **Mudança climática no nordeste do Brasil, Amazônia e Bacia do Prata: avaliação dos modelos do IPCC e cenários para o século XXI.** 2011. 89 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil: Recursos Hídricos) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2011.

McKee, T. B.; DOESKEN, N. J.; KLEIST, J. 1993: *The relationship of drought frequency and duration of time scales. Eighth Conference on Applied Climatology, American Meteorological Society*, Jan17-23, 1993, Anaheim CA, pp.179-186.

McKee, T. B.; DOESKEN, N. J.; KLEIST, J., 1995: *Drought monitoring with multiple time scales. Ninth Conference on Applied Climatology, American Meteorological Society*, Jan15-20, 1995, Dallas TX, pp.233-236.

MILLWEE, T. (2000). *Division of Emergency Management. Texas Department of Public Safety* . Disponível em: [www.txdps.state.tx.us/dem/documents.htm](http://www.txdps.state.tx.us/dem/documents.htm). Acesso em: março de 2020.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIAS-MME. **Balanco Energético Nacional – Resultados Preliminares** Empresa de Pesquisa Energética. EPE, Rio de Janeiro. Disponível em:< [www.mme.gov.br](http://www.mme.gov.br) > Acesso em: 10 junho 2020.

MINUZZI, R. B.; LOPEZ, F. Z. **Variabilidade de índices de chuva nos estados de Santa Catarina e Rio Grande do Sul.** Bioscience Journal, v. 30, n. 3, 2014.

MOURA, Geber Barbosa de A. et al. **Estudo preliminar da variabilidade pluviométrica do setor leste do Nordeste do Brasil:** parte I. In: X CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, Brasília. 1998.

MOURA, G; BARBOSA, A. *et al.* **Relação entre a precipitação no setor leste do Nordeste do Brasil e a temperatura da superfície nos oceanos Atlântico e Pacífico.** Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 4, n. 2, p. 247-251, 2000.

NETO, G. G. R. **Monitoramento e caracterização de secas da América do Sul com sensoriamento remoto.** 2017. 85 f. Dissertação de Mestrado (Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2017.

NÓBREGA, S. R.; SANTIAGO, C. G. A.. **Tendências do controle climático oceânico sob a variabilidade temporal da precipitação no Nordeste do Brasil**. Revista de geografia Norte Grande, n. 63, p. 9-26, 2016.

NÓBREGA, V.R. **Efeito da seca de 2011 - 2013 sobre os criadores do município do Junco do Seridó - PB**. 2015. 37 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Agronomia) - Centro de Ciências e Tecnologia Agroalimentar, Universidade Federal de Campina Grande, Pombal, Paraíba, Brasil, 2015.

OGOCHUKWU, E. *Design and installation of a mini hydro electric power plant*. Páginas de 11-15. 2012.

OLIVEIRA, G. S. (2001). **O El Niño e Você - o fenômeno climático. Livro - O El Niño e Você – o fenômeno climático**. Editora Transtec - São José dos Campos (SP), Disponível em: . Acesso em: set. 2020.

OPERADOR NACIONAL DE SISTEMA- ONS. Disponível em <<https://agentes.ons.org.br/publicacao/ophen/>> acesso em 15 de set. 2020.

PAULA, G. M. *et al.* **Influência do fenômeno El Niño na erosividade das chuvas na região de Santa Maria (RS)**. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 34, n. 4, p. 1315-1323, 2010.

PAULO, A. A., FERREIRA, E., COELHO, C. y L. S. PEREIRA, (2004). *Drought class transition analysis through Markov and Loglinear models, an approach to early warning*. Agric. Water Manage. (accepted).

PEREIRA, L. S; A. A. PAULO. **Indicadores de escassez de Água: Índices de Secas. Comparação entre o Índice de Palmer e o SPI**. Centro de Estudos de Engenharia Rural. Instituto Superior de Agronomia. Universidade Técnica de Lisboa. Tapada da Ajuada, 1349-017, Lisboa.

PEREIRA, S. P; PRUSKI, F. F; et al. **Estudo do comportamento hidrológico do Rio São Francisco e seus principais afluentes**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental v.11, n.6, p.615–622, 2007 Campina Grande, PB, 2007.

QUADRO, M. F. L.; SILVA DIAS, M. A. F.; HERDIES, D. L.; GONCALVES, L. G. G. **Análise Climatológica da Precipitação e do Transporte de Umidade na Região da ZCAS Através da Nova Geração de Reanálises**. Revista Brasileira de Meteorologia, v.27, p.152 - 162, 2012.

RAMOS, T. P. **Modelo Individualizado de Usinas Hidrelétricas Baseado em Técnicas de Programação Não Linear Integrado com o Modelo de Decisão Estratégica**. Dissertação de mestrado. Departamento de Energia da Universidade Federal de Juiz De Fora. Juiz de Fora - MG, Brasil, 2011.

SANTOS, E.*et al.* **A Seca no Nordeste no ano de 2012: Relato sobre a estiagem na região e o exemplo de prática de convivência com o semiárido no distrito de Iguaçu/Canindé-Ce**. Revista Geonorte, v. 3, n. 8, p. 819–830-819–830, 2012.

SANTOS, M.J.J. **Caracterização e Monitoramento de Secas**. Instituto da Água. Direção de Serviços Hídricos. Lisboa. 1998.

SHEN, H. et al. **Regional drought assessment using a distributed hydrological model coupled with Standardized Runoff Index**. Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences, v. 368, p. 397-402, 2015.

SHUKLA, S.; WOOD, A. W. **Use of a standardized runoff index for characterizing hydrologic drought**. Geophysical research letters, v. 35, n. 2, 2008.

SILVA, C. F. A. et al. **Projeção das energias primárias na geração de eletricidade com avaliação da demanda e oferta de energia, em horizonte de médio prazo (2020), longo prazo (2035) e muito longo prazo (2060)**. In: Energy Trends in Latin America: Towards Regional Integration and Sustainability,.. International Association for Energy Economics, 2013.

SILVA, D. F. et al. **Estudo da Influência da Oscilação Decadal do Pacífico na Sub-Bacia do Baixo São Francisco**. Engenharia Ambiental: Pesquisa e Tecnologia, v. 10, n. 2, 2013.

SILVA, D. F. **Influência Interdecadal (ODP e OMA) nas Cotas do Rio São Francisco**. Revista Brasileira de Geografia Física, v. 6, n. 06, p. 1529-1538, 2013.

SILVA, D. F.; GALVÍNCIO, J.D.; et al. **Influência da variabilidade climática e da associação de fenômenos climáticos sobre sub-bacias do rio São Francisco**. Revista Brasileira de Ciências Ambientais, n. 19, p. 46-56, 2011.

SILVA, D.F.; BRITO, J.I.B., **Variabilidade do vento na bacia hidrográfica do rio São Francisco durante a ocorrência da ZCAS**. Ambiência (UNICENTRO), v. 2, p. 24-47, 2008.

SILVA, F. W. M. **Projeção de Energia Natural Afluente (ENA) a Médio Prazo Para o Setor Elétrico do Brasil**. 2017. 102 f. Dissertação de Mestrado (Tecnologias Sustentáveis)- Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira, Redenção-CE, 2017.

SILVEIRA, C. S. **Modelagem integrada de meteorologia e recursos hídricos em múltiplas escalas temporais e espaciais: aplicação no Ceará e no setor hidroelétrico brasileiro**. Fortaleza, 2014.

SIQUEIRA, A. H. B. **Variabilidade do clima da América do Sul e sua relação com os índices oceânicos e atmosféricos**. 2012. 77 f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Instituto de Ciências Atmosféricas, Programa de Pós-Graduação em Meteorologia, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2012.

SOARES, E. **Seca no Nordeste e a transposição do rio São Francisco**. Revista Geografias, p. 75-86, 2013.

SOUSA, A. J. S.; MOLION, L. B.; JUNIOR, S. B. S.; SOUSA, J. R. A.; **Comportamento da Precipitação em Timbaúba (Neb) e Relações com a Oscilação Decadal do Pacífico (ODP)**. Anais do XV Congresso Brasileiro de Meteorologia, São Paulo, 2008.

SOUZA, EB de et al. **Desvios percentuais da precipitação na estação chuvosa do semi-árido nordestino durante os anos de El Niño e La Niña no pacífico tropical e fases do padrão de dipolo no atlântico tropical**. Divisão de Ciências Meteorológicas-Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais–INPE, 1997.

STRECK, N. A. et al. **Associação da variabilidade da precipitação pluvial em Santa Maria com a Oscilação Decadal do Pacífico**. Pesquisa Agropecuária Brasileira, v. 44, n. 12, p. 1553-1561, 2009.

VIANELLO, R. L.; FERREIRA, N. J.; OLIVEIRA, L. L. (2001) **Meteorologia Fundamental**. Edifapes. Erechin – RS.

VILAR, R. de A. A. et al. **Avaliação do Impacto de Secas Severas no Nordeste Brasileiro na Geração de Energia Elétrica Através do Modelo Newave: Projeção das Energias Afluentes e Armazenadas**. Revista Brasileira de Meteorologia, v. 35, n. 1, p. 89-98, 2020.

WAGNER, R.G. *Mechanisms controlling variability of the interhemispheric sea surface temperature gradient in the tropical Atlantic*. J. Climate, 9(7): 2010-2019, 1996.  
WILHITE, D.A. **Drought as a natural hazard: concepts and definitions**. Drought, A Global Assessment 1, 3–18, 2000.

WOOD, A. W; SCHAAKE, J. C. (2008), *Correcting errors in streamflow forecast ensemble mean and spread*, J. Hydrometeorol, 2018.

WU, J. et al. *A nonparametric standardized runoff index for characterizing hydrological drought on the Loess Plateau, China*. Global and Planetary Change, v. 161, p. 53-65, 2018.

ZARGAR, A., et al. (2011). *A review of drought indices*. Environmental Reviews 19(NA), 333–349.

## 9 APÊNDICES

### APÊNDICE A – TABELA DE DURAÇÃO E SEVERIDADE DE SECAS RESERVATÓRIO DA BACIA DO SÃO FRANCISCO

**Tabela 3:** Duração e Severidade de Seca - Apolônio Sales

Seca	Período	Duração (Mês)	Severidade
1	1935-1935	2	1,78
2	1954-1954	1	0,84
3	1955-1955	12	12,52
4	1956-1956	1	0,86
5	1959-1959	1	0,8
6	1960-1960	1	0,81
7	1964-1964	1	0,83
8	1971-1971	10	13,8
9	1976-1977	12	15,49
10	1987-1987	9	8,44
11	1989-1989	8	7,21
12	1991-1991	1	0,89
13	1996-1997	10	9,65
14	1998-2000	20	20,24
15	2001-2002	15	19,71
16	2003-2004	14	15,02
17	2008-2008	3	2,86
18	2010-2011	10	9,84
19	2013-2017	60	126,18

**FONTE:** Autor

**Tabela 4:** Duração e Severidade de Seca - Complexo Paulo Afonso

Seca	Período	Duração (Mês)	Severidade
1	1935-1935	2	1,78
2	1954-1954	1	0,84
3	1955-1955	12	12,52
4	1956-1956	1	0,86
5	1959-1959	1	0,8
6	1960-1960	1	0,81
7	1964-1964	1	0,83
8	1971-1971	10	13,8
9	1976-1977	12	15,49
10	1987-1987	9	8,44
11	1989-1989	8	7,21
12	1991-1991	1	0,89
13	1996-1997	10	9,65

14	1998-2000	20	20,24
15	2001-2002	15	19,71
16	2003-2004	14	15,02
17	2008-2008	3	2,86
18	2010-2011	10	9,84
19	2013-2017	60	126,18

**FONTE:** Autor

**Tabela 5:** Duração e Severidade de Seca - Paulo Afonso

Seca	Período	Duração (Mês)	Severidade
1	1935-1935	2	1,78
2	1954-1954	1	0,84
3	1955-1955	12	12,52
4	1956-1956	1	0,86
5	1959-1959	1	0,8
6	1960-1960	1	0,81
7	1964-1964	1	0,83
8	1971-1971	10	13,8
9	1976-1977	12	15,49
10	1987-1987	9	8,44
11	1989-1989	8	7,21
12	1991-1991	1	0,89
13	1996-1997	10	9,65
14	1998-2000	20	20,24
15	2001-2002	15	19,71
16	2003-2004	14	15,02
17	2008-2008	3	2,86
18	2010-2011	10	9,84
19	2013-2017	60	126,18

**FONTE:** Autor

**Tabela 6:** Duração e Severidade de Seca - Itaparica

Seca	Período	Duração (Mês)	Severidade
1	1935-1935	2	1,83
2	1954-1954	1	0,83
3	1955-1955	12	12,34
4	1956-1956	1	0,84
5	1960-1960	1	0,8
6	1964-1964	1	0,82
7	1971-1971	10	13,66
8	1976-1977	13	16,38

9	1987-1987	10	10,44
10	1989-1989	8	7,26
11	1991-1991	1	0,94
12	1995-1995	4	3,29
13	1996-1997	11	10,75
14	1998-2000	20	20,43
15	2001-2002	14	18,84
16	2003-2004	14	14,78
17	2008-2008	3	2,8
18	2010-2011	10	9,67
19	2013-2017	60	125,27

**FONTE:** Autor

**Tabela 7:** Duração e Severidade de Seca - Itaparica Incremental

Seca	Período	Duração (Mês)	Severidade
1	1932-1933	9	9,77
2	1933-1933	2	1,64
3	1936-1937	10	9,5
4	1939-1939	2	2,41
5	1939-1939	5	4,28
6	1939-1939	1	0,83
7	1947-1947	1	0,85
8	1955-1955	2	2
9	1955-1955	5	4,11
10	1956-1956	1	1,15
11	1959-1959	1	1,02
12	1959-1959	1	1,05
13	1959-1959	1	0,81
14	1959-1959	5	4,16
15	1960-1960	1	1,02
16	1969-1970	3	2,86
17	1970-1970	1	0,84
18	1971-1971	9	8,32
19	1973-1973	3	4,07
20	1976-1977	11	17,83
21	1987-1987	10	16,31
22	1998-1998	1	0,8
23	1999-1999	1	0,89
24	2001-2001	1	0,83
25	2003-2004	16	20,68
26	2005-2005	9	8,47
27	2006-2006	6	4,95
28	2008-2008	2	2,45

29	2010-2011	14	20,74
30	2012-2016	46	58,88
31	2017-2017	11	19,23

**FONTE:** Autor

**Tabela 8:** Duração e Severidade de Seca- Queimado

Seca	Período	Duração (Mês)	Severidade
1	1934-1935	5	4,92
2	1938-1938	2	1,78
3	1951-1952	11	10,86
4	1971-1972	13	16,55
5	1975-1977	16	20,93
6	1987-1987	11	12,7
7	1990-1991	3	2,96
8	1996-1997	15	14,38
9	1998-2000	24	26,88
10	2001-2004	35	43,44
11	2008-2009	14	16,28
12	2011-2011	2	1,76
13	2013-2017	59	103,5

**FONTE:** Autor

**Tabela 9:** Duração e Severidade de Seca - Retiro Baixo

Seca	Período	Duração (Mês)	Severidade
1	1932-1933	9	10,05
2	1934-1935	9	9,77
3	1936-1937	10	10,86
4	1953-1953	3	2,42
5	1954-1956	30	33,37
6	1959-1960	15	15,5
7	1963-1964	4	4,27
8	1969-1969	6	5,01
9	1971-1972	14	23,63
10	1976-1976	11	11,49
11	2001-2002	12	15,09
12	2010-2011	3	2,63
13	2013-2017	60	141,4

**FONTE:** Autor

**Tabela 10:** Duração e Severidade de Seca - Sobradinho

Seca	Período	Duração (Mês)	Severidade
1	1935-1935	2	1,88
2	1954-1954	1	0,83
3	1955-1955	12	12,24
4	1956-1956	1	0,83
5	1964-1964	1	0,81
6	1971-1971	10	13,49
7	1976-1976	12	15,01
8	1987-1987	10	10,12
9	1989-1989	9	8,99
10	1991-1991	1	0,98
11	1995-1995	6	5,2
12	1996-1997	11	11,52
13	1998-2000	20	20,04
14	2001-2002	16	21,42
15	2002-2004	15	14,87
16	2008-2008	7	6,1
17	2010-2011	9	8,27
18	2013-2017	60	126,03

**FONTE:** Autor**Tabela 11:** Duração e Severidade de Seca - Sobradinho Incremental

Seca	Período	Duração (Mês)	Severidade
1	1935-1935	1	0,82
2	1955-1955	1	0,97
3	1955-1955	8	6,64
4	1955-1955	1	0,82
5	1971-1971	9	9,05
6	1976-1976	11	13,17
7	1987-1987	11	11,68
8	1989-1989	7	6,05
9	1995-1995	6	5,18
10	1995-1997	16	17,44
11	1998-2000	22	25,65
12	2001-2004	36	41,09
13	2008-2009	12	14,36
14	2009-2009	2	1,63
15	2010-2011	11	10,26
16	2013-2017	60	118,33

**FONTE:** Autor

**Tabela 12:** Duração e Severidade de Seca - Três Marias

Seca	Período	Duração (Mês)	Severidade
1	1934-1935	3	3,39
2	1936-1936	9	10,18
3	1953-1956	34	42,01
4	1958-1960	15	16,88
5	1963-1964	11	11,4
6	1969-1969	2	1,69
7	1971-1972	13	25,26
8	1976-1976	11	13,18
9	1989-1991	25	27,56
10	2001-2002	12	17,74
11	2010-2010	1	0,83
12	2013-2017	60	119,99

**FONTE:** Autor**Tabela 13:** Duração e Severidade de Seca - Três Marias Incremental

Seca	Período	Duração (Mês)	Severidade
1	1934-1935	2	2,29
2	1936-1936	9	9,81
3	1953-1956	32	40,15
4	1956-1956	1	0,83
5	1958-1960	14	15,77
6	1963-1964	11	11,71
7	1969-1969	1	0,82
8	1971-1972	13	24,94
9	1976-1976	11	13,13
10	1987-1987	1	0,81
11	1988-1988	1	0,94
12	1988-1991	27	34,95
13	1995-1995	1	0,87
14	1995-1995	9	8,47
15	1996-1996	9	8,69
16	2001-2002	11	16,95
17	2004-2004	1	0,81
18	2010-2010	2	1,66
19	2013-2013	3	2,65
20	2013-2013	7	5,85
21	2014-2017	48	99,15

**FONTE:** Autor

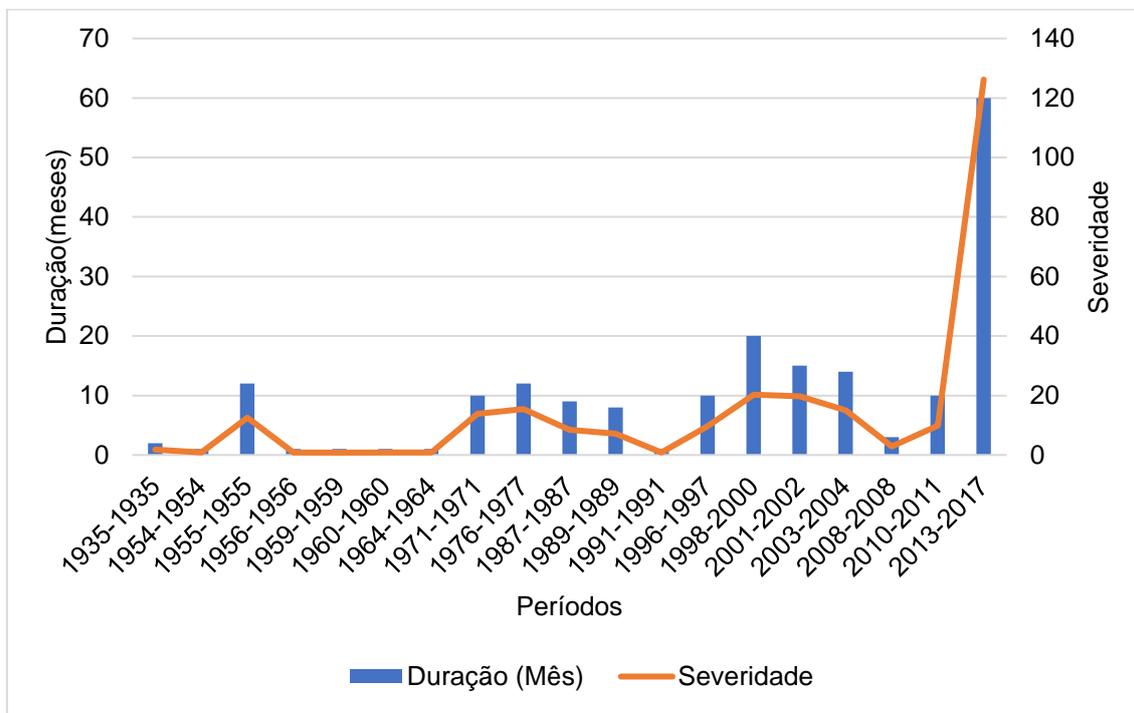
**Tabela 14:** Duração e Severidade de Seca - Xingó

Seca	Período	Duração (Mês)	Severidade
1	1935-1935	2	1,78
2	1954-1954	1	0,84
3	1955-1955	12	12,51
4	1956-1956	1	0,86
5	1959-1959	1	0,8
6	1960-1960	1	0,81
7	1964-1964	1	0,83
8	1971-1971	10	13,79
9	1976-1977	12	15,49
10	1987-1987	9	8,43
11	1989-1989	8	7,21
12	1991-1991	1	0,89
13	1996-1997	10	9,65
14	1998-2000	20	20,23
15	2001-2002	15	19,7
16	2003-2004	14	15,01
17	2008-2008	3	2,86
18	2010-2011	10	9,84
19	2013-2017	60	126,39

**FONTE:** Autor

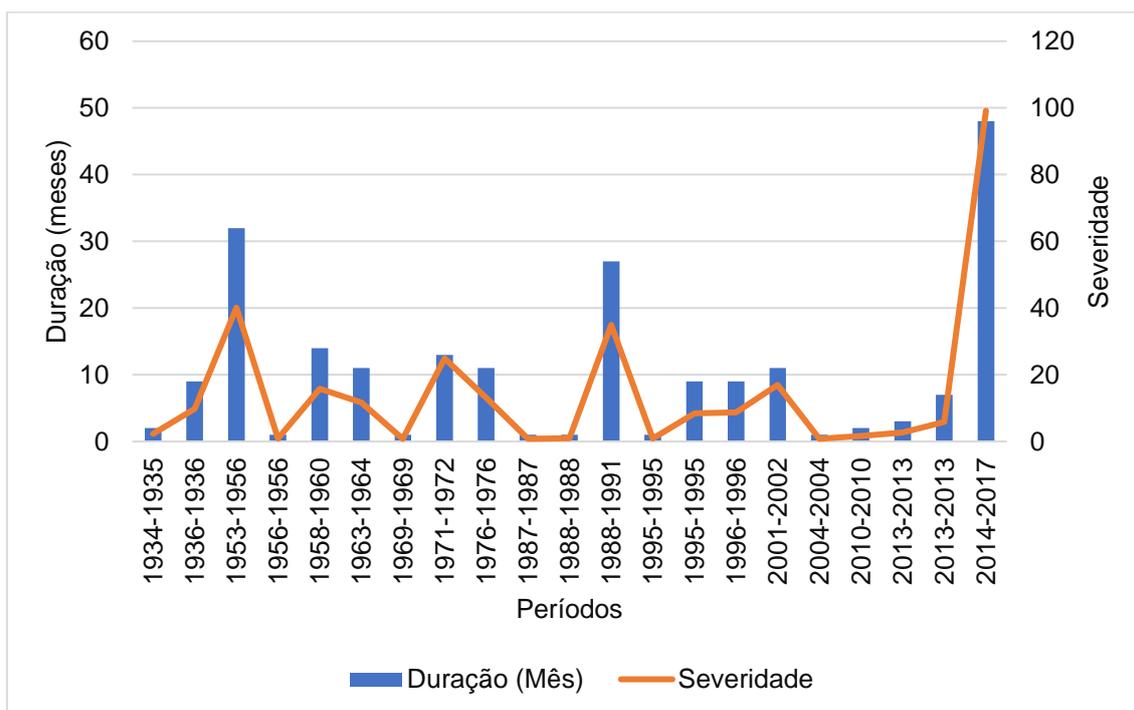
**APÊNDICE B – GRÁFICO DE DURAÇÃO E SEVERIDADE DE SECAS DOS RESERVATÓRIOS DOS RESERVATÓRIOS INCREMENTAIS DA BACIA DO SÃO FRANCISCO**

**Figura 28 - Duração e Severidade das Secas - Complexo Paulo Afonso**



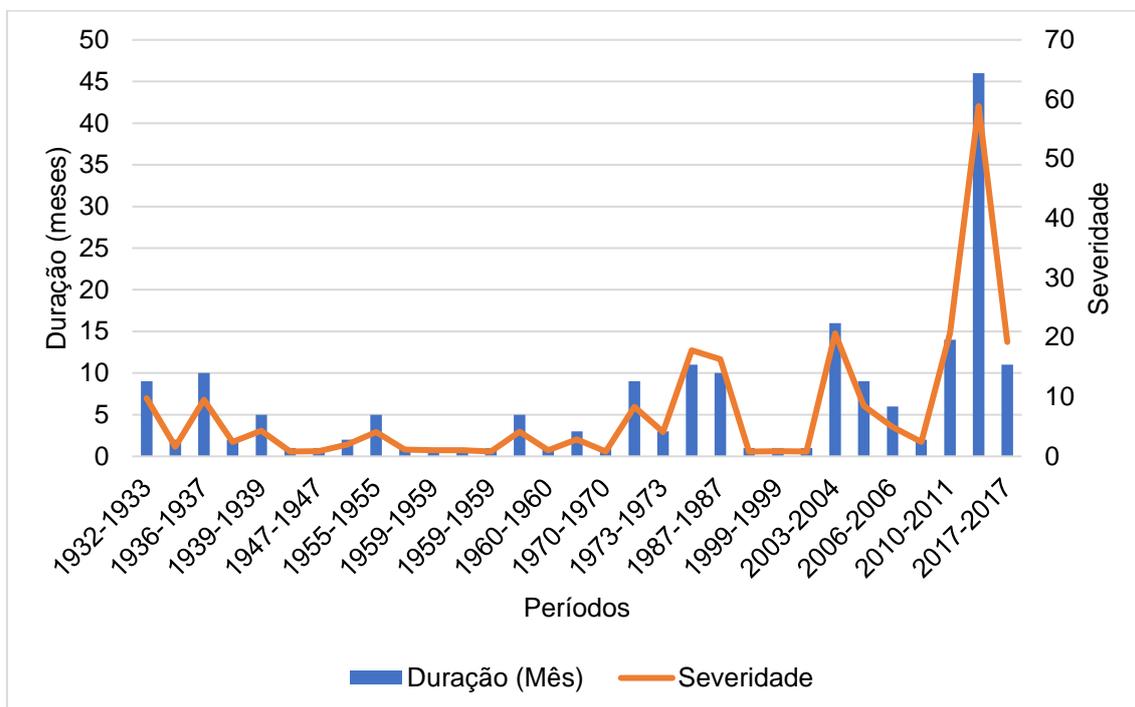
**FONTE:** Autor

**Figura 29 - Duração e Severidade de Seca - Três Marias Incremental**



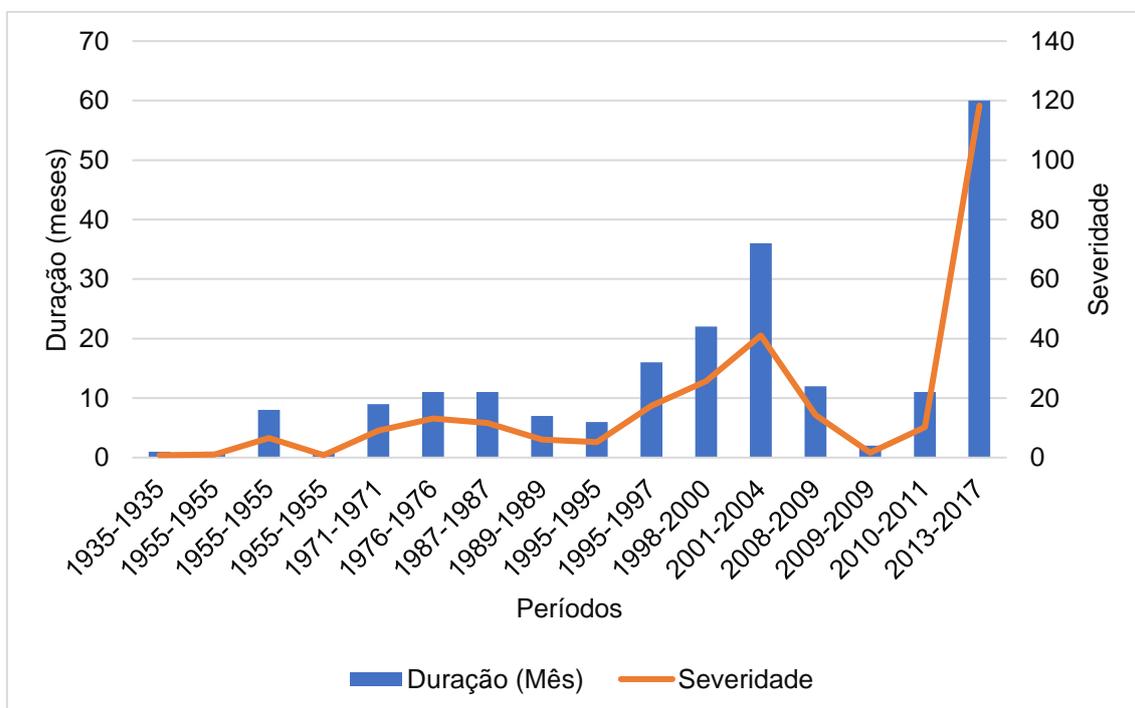
**FONTE:** Autor

**Figura 30 - Duração e Severidade de Seca - Itaparica Incremental**



FONTE: Autor

**Figura 31 - Duração e Severidade de Seca - Sobradinho Incremental**



FONTE: Autor