



PLANO DE AÇÃO DE EMERGÊNCIA

PAE

UHE Funil

Anexo 12

Estudos de Ruptura da Barragem

Documento	Rev 0	Rev 1	Rev 2	Rev 3			
PAE	-	-	-	jan/25			
Alterações da revisão atual	Pequenos ajustes devido a alterações na estrutura organizacional da empresa.						

Revisão 03 – Janeiro/2025



Relatório dos Estudos de Ruptura da UHE FUNIL

OOMBE.F.006.2023-R0



1 Sumário

2. IDENTIFICAÇÃO E SÍNTESE.....	3
3. INTRODUÇÃO	3
4. SISTEMA DE MODELAGEM – HEC RAS.....	3
5. PREMISSAS DOS ESTUDOS.....	4
6. DADOS DE ENTRADA	4
Modelos Digitais de Superfície e de Terreno (MDS e MDT).....	4
Batimetria.....	5
Coeficiente de rugosidade de Manning.....	6
Vazão afluente ao reservatório.....	6
7. DEFINIÇÃO DA BRECHA DE RUPTURA	6
8. CENÁRIOS DE RUPTURA	7
1.1. - Cenários de Ruptura do Dique Nhangapi.....	8
– Cenários de Ruptura da barragem principal da UHE Funil	10
- Seleção dos Cenários	11
9. RESULTADOS	12
Tempo de Chegada da Onda	13
Hidrograma de ruptura	15
1.1. Mapas	16
1.2. Caracterização da Área Afetada pela Ruptura.....	17
1.2.1. Descrição da Zona de Autossalvamento (ZAS)	17
1.2.2. Zona de Segurança Secundária (ZSS)	18
1.3. Análise dos Resultados.....	19



Plano de Ação de Emergência
UHE Funil
ANEXO 12 – ESTUDOS DE RUPTURA DA BARRAGEM
REVISÃO 03 – 01/2025



2 Identificação e Síntese

O presente documento apresenta uma síntese dos estudos de ruptura da UHE Funil e seu dique Nhangapi, com as premissas e dados utilizados na modelagem, assim como os resultados obtidos.

Este documento subsidiará a elaboração do Plano de Ação de Emergência (PAE) do empreendimento e dos Planos de Contingência (PLANCON) dos municípios situados a jusante da barragem.

Neste contexto, foram estudados diferentes cenários, visando identificar o pior cenário, com a maior mancha de inundação e menor tempo de chegada da onda, certificando que os órgãos de defesa irão elaborar os seus planos para o cenário mais catastrófico.

Tendo em vista o arranjo da usina, foi estudada a ruptura de sua barragem principal e de seu dique, obtendo manchas de inundação em bacias distintas. Em ambos os casos foram previstos cenários de erosão interna (*piping*) e galgamento (*overtopping*). Além disso, foi considerada a ruptura instantânea das barragens.

3 Introdução

De acordo com a RN ANEEL 696/2015, a UHE Funil foi classificada como B e, portanto, faz-se necessária a elaboração de seu Plano de Ação de Emergência, que é feito a partir dos resultados dos estudos de ruptura das estruturas da usina.

Tais estudos compreendem uma modelagem hidráulica que estima as áreas, a jusante da usina, que podem ser afetadas pela onda proveniente da hipotética ruptura de suas barragens, visando fornecer elementos suficientes para a atuação dos órgãos responsáveis.

4 Sistema de Modelagem – Hec Ras

Foi utilizado o *Software HEC-RAS, Hydraulic Engineering Center – River Analysis System*, um sistema de modelagem 1D e 2D, desenvolvido pelo *US Army Corps of Engineers*. A versão HEC-RAS 5.0.3 é utilizada nos estudos contidos neste relatório.

No presente estudo, foi utilizado o modelo 2D, que resolve as equações de Navier-Stokes em um esquema numérico híbrido implícito de diferenças finitas e volumes finitos.



5 Premissas dos Estudos

As premissas básicas, que nortearam os estudos, foram:

- A modelagem matemática foi feita considerando cenários críticos, identificados para cada barragem;
- A abrangência dos estudos de propagação da onda de ruptura se estende até a próxima usina, independente de sua capacidade de amortecer ou não a onda gerada;
- Na hipótese da usina de jusante não possuir capacidade para amortecimento da onda gerada, pode ser necessário um estudo de ruptura em cascata, não contemplado neste relatório;
- De forma conservadora, a zona de autossalvamento (ZAS) foi definida em 10 km, a partir da mancha máxima de inundação, de acordo com a Resolução ANA Nº 236/2017.

6 Dados de Entrada

Os dados utilizados na modelagem foram.

6.1 Modelos Digitais de Superfície e de Terreno (MDS e MDT)

Os MDS e MDT foram gerados pela empresa *Space Imaging Brasil* a partir de pares estereoscópicos dos satélites *Geoeye-1* e da série *WorldView* (1, 2, 3 e 4). Os pares estereoscópicos foram orientados a partir da atitude dos satélites por meio de seus arquivos RPC (Coeficientes Polinomiais Reais) e dos pontos de controle obtidos em campo. A altitude ortométrica foi gerada a partir do MAPGEO 2015. Os modelos têm resolução espacial de 2 metros, precisão absoluta de 2 metros e relativa de 1 metro, salvo o MDT sob área de vegetação densa, que teve sua superfície gerada a partir da interpolação do MDS.



6.2 Batimetria

Foram realizados levantamentos batimétricos com tecnologia monofeixe, por seções batimétricas e multifeixe.

A empresa SALT foi contratada para realizar levantamento batimétrico monofeixe a jusante da Usina Hidrelétrica de Funil no rio Paraíba do Sul.

Foram realizadas 84 seções das 85 planejadas, sendo 3 extras. As seções 13, 19 e 20 não foram realizadas devido à impossibilidade via rio ou terrestre em virtude da falta de acessos ou presença de obstáculos aquáticos como ilhas, pedras e/ou vegetação.

Foi recoberta uma extensão de aproximadamente 252 km do Rio Paraíba do Sul, com seções espaçadas em 2 km, o levantamento contemplou aproximadamente 10,30 km lineares de seções levantadas com extensão média de 138 metros.

As seções apresentaram em média 4,04 metros de profundidade, sendo a máxima profundidade – cerca de 22,52 m – encontrada na Seção 03. A seção 83 apresentou a menor profundidade média, com 1,20 metros, e a seção 01 a maior média (13,77 m) e maior extensão (505,17 m).

O levantamento com tecnologia multifeixe do reservatório da UHE Funil foi realizado pela empresa Rural Tech Comércio e Serviços Eireli, contemplando as seguintes atividades:

- Implantação da Rede de Vértices Geodésicos (RVG) no entorno do reservatório, por rastreamento GNSS L1/L2;
- Mapeamento da área molhada por meio de tecnologia de ensonificação do leito com sonar multifeixe e monofeixe de todo o espelho d'água do reservatório e braços.
- Implantação de Seções de Controle para o monitoramento do assoreamento.
- Integração de Dados e Construção do Modelo Digital do Terreno.
- Definição das Curvas Cota x Área x Volume.

Neste estudo, foram utilizados dados batimétricos do reservatório da UHE Funil e a do trecho fluvial a jusante da UHE Funil se estendendo até a UHE Simplício.

6.3 Coeficiente de rugosidade de Manning

O coeficiente de rugosidade é um parâmetro de extrema importância na modelagem, uma vez que ele representa o atrito do terreno.

A calibração de modelos, em geral, é realizada via ajustes no coeficiente de Manning e comparação de níveis d'água observados e os resultantes das modelagens. Em estudos de ruptura, os níveis d'água podem atingir cotas elevadas e nunca registradas. Desta forma não é possível a calibração deste parâmetro.

Desta forma, foram utilizados coeficientes aderentes ao utilizado na literatura internacional, os quais se encontram apresentados na Tabela 1 a seguir.

Tabela 1. Tabela de Coeficientes de Manning

Área	Coeficiente de Manning
Calha do Rio Grande	0,05
Áreas de várzea não urbana	0,10
Área urbanizada	0,15
Área de Mata	0,12
Região da ruptura	0,30

6.4 Vazão afluente ao reservatório

Um dos dados de entrada do modelo é a vazão afluente ao reservatório da UHE Funil.

No presente estudo, foi utilizada a vazão média de longo termo, $Q_{MLT} = 208,0 \text{ m}^3/\text{s}$, e a cheia decamilenar, $Q_{10000} = 2319,0 \text{ m}^3/\text{s}$, ambos obtidos do relatório da revisão periódica de segurança de barragem, elaborado pela VLB Engenharia.

7 Definição da brecha de ruptura

As dimensões e tempo de formação das brechas foram baseados no método empírico de Froehlich (2008), já incluído no *software* HEC RAS.

Os cenários de ruptura instantânea consideram um tempo de formação da brecha de 6 min.



8 Cenários de Ruptura

Os cenários foram definidos de forma a considerar:

- *Sunny day* – ruptura a partir da vazão média de longo termo (Q_{MLT}) e nível d'água normal;
- *Rainy day* – ruptura a partir do pico da vazão decamilenar ($Q_{10.000}$) e nível d'água extremo, galgando as estruturas de terra.
- Foram consideradas as rupturas por erosão interna (*piping*) e galgamento (*overtopping*).

A seguir são apresentados os cenários considerados, para cada estrutura. Inicialmente serão apresentados os cenários de ruptura para o dique Nhangapi e posteriormente os cenários de ruptura para a barragem principal da usina.

Deve-se ressaltar que foram feitas as modelagens apenas de cenários críticos, visando identificar o pior cenário para cada estrutura, os quais serão utilizados para a elaboração do PAE e dos PLANCON's.



8.1 - Cenários de Ruptura do Dique Nhangapi

Como a crista da barragem de concreto na UHE Funil está na cota 468 m e o dique Nhangapi tem sua crista na cota 469,95 m, consideramos improvável a ocorrência de galgamento no dique Nhangapi, por este motivo todas as Rupturas estudadas consideram a ocorrência de *piping* como causa da ruptura.

Cenário 1 - *Piping* – Q_{MLT}

Este cenário considera a ruptura do dique Nhangapi por *piping*, com a vazão média de longo termo afluente ao reservatório e nível d'água normal do reservatório.

Cota crista barragem	469,95 m
NA de ruptura	468,0 m
Volume (NA de ruptura)	918 hm ³
Vazão Afluente ao reservatório	208 m ³ /s
Cota soleira brecha	432 m
Largura (base)	260,0 m
Altura da brecha	39,95 m
Altura hidráulica	38,0 m
Talude da brecha (MD)	0,7 (H) : 1 (V)
Talude da brecha (ME)	0,7 (H) : 1(V)
Tempo de formação da brecha	4,55 h *
Modo de ruptura	<i>Piping</i>

* Tempo de formação da brecha determinado por Froehlich (2008)



Cenário 2 – $Q_{10.000}$ – Ruptura Instantânea

Este cenário considera a ruptura do dique Nhangapi, com a vazão decamilenar afluyente ao reservatório, nível d'água do reservatório galgando as estruturas de terra e com a ruptura instantânea.

Cota crista barragem	469,95 m
NA de ruptura	468,0 m
Volume (NA de ruptura)	918 hm ³
Vazão Afluyente ao reservatório	2319,0 m ³ /s
Cota soleira brecha	432 m
Largura (base)	260,0 m
Altura da brecha	39,95 m
Altura hidráulica	38,0 m
Talude da brecha (MD)	0,7 (H) : 1 (V)
Talude da brecha (ME)	0,7 (H) : 1(V)
Tempo de formação da brecha	0,1 h (Ruptura Instantânea)
Modo de ruptura	Instantânea



8.2 – Cenários de Ruptura da barragem principal da UHE Funil

Cenário 3 – Galgamento - Q_{MLT}

Este cenário considera a ruptura da barragem principal de concreto com a vazão média de longo termo afluente ao reservatório, nível d'água do reservatório galgando as estruturas de concreto e formação instantânea da brecha, 6 min.

Cota crista barragem	468,0 m
NA de ruptura	468,0 m
Volume (NA de ruptura)	918 hm ³
Vazão Afluente ao reservatório	208 m ³ /s
Cota soleira brecha	402 m
Largura (base)	82,0 m
Altura da brecha	66,0 m
Altura hidráulica	66,0 m
Talude da brecha (MD)	1,6 (H): 1 (V)
Talude da brecha (ME)	1,5 (H): 1(V)
Tempo de formação da brecha	0,1 h (Ruptura Instantânea)
Modo de ruptura	Galgamento

* Tempo de formação da brecha determinado por Froehlich (2008)



Cenário 4 - Galgamento – $Q_{10.000}$

Este cenário considera a ruptura da barragem principal de concreto com a vazão decamilenar de longo termo afluente ao reservatório, nível d'água do reservatório galgando as estruturas de concreto e formação instantânea da brecha, 6 min.

Cota crista barragem	468,0 m
NA de ruptura	468,0 m
Volume (NA de ruptura)	918 hm ³
Vazão Afluente ao reservatório	2319 m ³ /s
Cota soleira brecha	402 m
Largura (base)	82,0 m
Altura da brecha	66,0 m
Altura hidráulica	66,0 m
Talude da brecha (MD)	1,6 (H): 1 (V)
Talude da brecha (ME)	1,5 (H): 1(V)
Tempo de formação da brecha	0,1 h (Ruptura Instantânea)
Modo de ruptura	Galgamento

8.3 - Seleção dos Cenários

Foram executadas as modelagens para todos os cenários de modelagem definidos e descritos no item anterior.

A análise dos resultados dos cenários de ruptura da barragem do **Dique Nhangapi** indicou, como o pior cenário, a ruptura Instantânea, num momento de pico da cheia decamilenar, ou seja, o **Cenário 2**.

A análise dos resultados dos cenários de ruptura da barragem da **UHE Funil** indicou, como o pior cenário, a ruptura Instantânea associada ao Galgamento, num momento de pico da cheia decamilenar, ou seja, o **Cenário 4**.

O pior cenário foi identificado por critérios objetivos, através da comparação dos resultados. Para fins deste estudo, o pior cenário é aquele que gerou a maior mancha de inundação, elevação do nível d'água, maiores velocidades e menores tempos de chegada da onda.



Sendo assim, o PAE deve ser elaborado para os cenários 2 e 4, conforme mapas e tabelas apresentados neste relatório.

Os resultados dos Cenário 2 e Cenário 4, tais como, mapas de inundação, velocidades, tempo de chegada da onda e cotas do nível d'água foram utilizados para definição das ZAS e ZSS, assim como definir as ações e dimensionamentos de infraestrutura associadas ao PAE (sirenes, rotas de fuga, placas, treinamentos).

9 Resultados

Os resultados dos modelos foram monitorados em seções de controle, mostradas na Tabela 2, onde os resultados são obtidos e apresentados de forma mais detalhada.

No entanto, deve-se ressaltar que estas seções de controle podem ser obtidas em qualquer local no domínio de modelagem, de acordo com a necessidade de cada município.

Tabela 2. Localização das seções de monitoramento dos resultados

Seções para Resultados				
	UTM E	UTM S	UTM E	UTM S
Seção Itatiaia	546066.4	7515427.9	547363.8	7511713.8
Seção Resende	554134.2	7516945.6	554773.8	7512984.9
Seção Porto Real	568689.6	7522651.2	569401.8	7520280.0
Seção Barra Mansa	584917.4	7507953.5	584164.3	7507009.6
Seção Volta Redonda	587455.8	7508138.0	588364.1	7507353.6
Seção Pirai	620909.5	7515949.5	621390.6	7514928.4
Seção Paraíba do sul	674085.3	7547558.3	674649.2	7546659.9
Seção Três Rios	682565.6	7552653.1	683027.5	7551619.5



9.1 Tempo de Chegada da Onda

A título de orientação para o planejamento das ações de evacuação e resgate por parte da Defesa Civil, as Tabela 4 e Tabela 3, a seguir, apresentam os tempos para chegada da onda de inundação e para atingir o $NA_{\text{máximo}}$, nas seções de controle definidas no estudo.

O tempo de chegada da onda foi definido pelo instante em que o nível d'água sobe 10 cm.



Plano de Ação de Emergência
UHE Funil
ANEXO 12 – ESTUDOS DE RUPTURA DA BARRAGEM
REVISÃO 03 – 01/2025

Tabela 3. Tempos para chegada da onda e dos picos de vazão e de N.A. devido ao rompimento do Dique Nhangapi, no Cenário 2.

Seção de Monitoramento	Chegada da Onda (h)	Pico de Vazão (h)	Pico de NA (h)
Itatiaia	1,0	1,5	2,0
Resende	1,5	3,0	5,0
Porto Real	3,5	12,5	15,0
Barra Mansa	7,5	2,5	24,0
Volta Redonda	8,5	21,5	25
Barra do Pirai	17,0	36,0	37
Paraíba do Sul	30,0	48,5	48,5
Três Rios	31,5	50,5	50,5
UHE Anta	32,5	54,0	54,0J

Tabela 4. Tempos para chegada da onda e dos picos de vazão e de N.A. devido ao rompimento da barragem de concreto em arco, no cenário 4.

Seção de Monitoramento	Chegada da Onda (h)	Pico de Vazão (h)	Pico de NA (h)
Itatiaia	0,15	1,0	1,5
Resende	0,5	2,5	4,0
Porto Real	2,0	8,0	11,5
Barra Mansa	4,5	14,0	17,5
Volta Redonda	7,5	15,5	17,0
Barra do Pirai	10,5	28,0	28,5
Paraíba do Sul	24,0	39,0	39,0
Três Rios	26,0	40,5	41,0
UHE Anta	27,0	44,0	44,0



9.2 Hidrograma de ruptura

O hidrograma proveniente da ruptura da barragem é calculado no próprio modelo, a cada passo de tempo, considerando a batimetria no reservatório e a sua Relação Cota-Volume, NA's de montante e jusante, dimensões da brecha a cada instante e tempo de ruptura.

Adotando esta metodologia chegou-se à vazão de pico da estrutura, apresentada na Tabela 2.

Tabela 2 - Vazão de Pico obtida do modelo.

Barragem	Vazão de Pico (m³/s)
UHE Funil	102.837
Dique Nhangapi	83.000

Os hidrogramas de ruptura encontram-se na Figura 1 e Figura 2. Destas, observamos que a maior vazão ocorre no Cenário 2 e 4, justificando a escolha como cenário mais conservador e sua adoção na implantação do PAE.

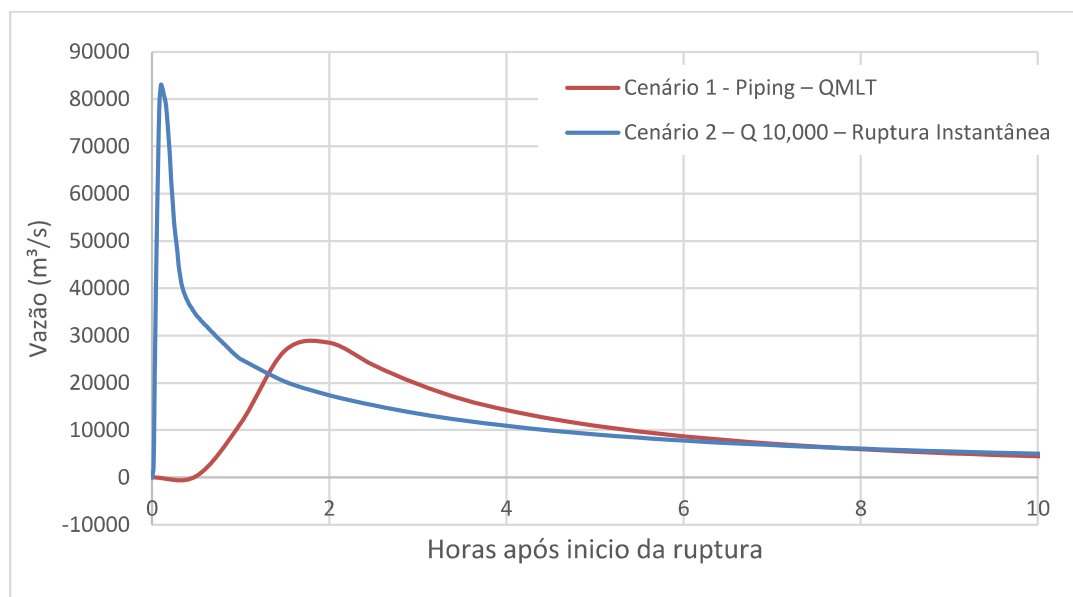


Figura 1. Hidrogramas para os cenários modelados de ruptura do dique Nhangapi.

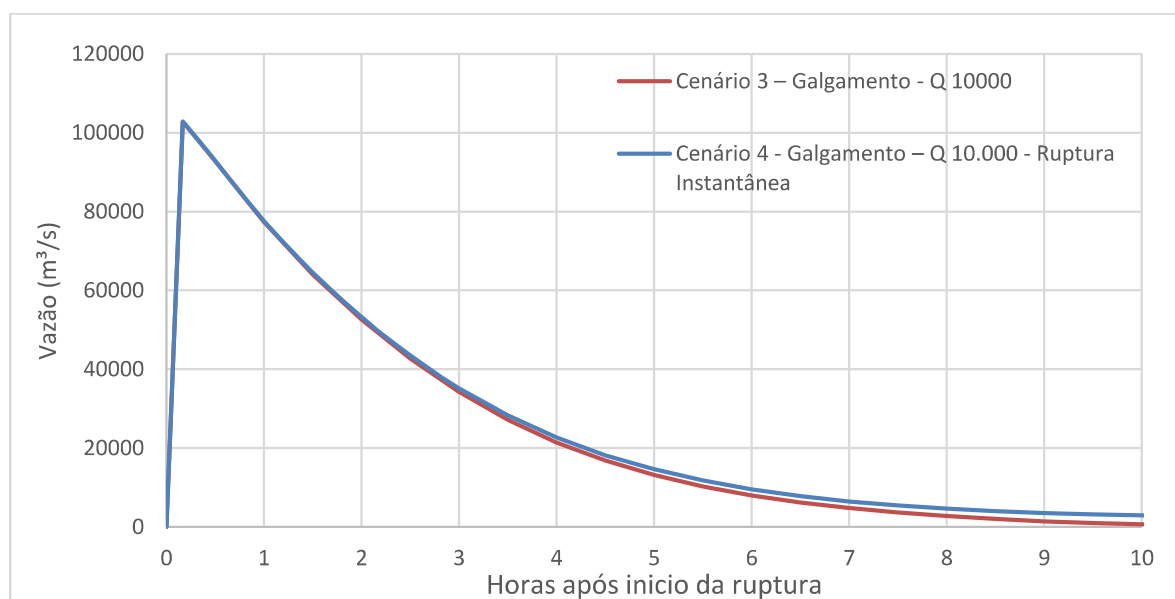


Figura 2. Hidrogramas para os cenários modelados de ruptura da barragem principal da UHE Funil.

9.1 Mapas

Nos Anexos 8 estão apresentados os mapas para os Cenários 3 e 6, identificados como piores cenários. Estão disponíveis os seguintes mapas:



- Mapas de inundação máxima;
- Mapas de Tempo de Chegada da onda;
- Mapas Profundidade Máxima,
- Mapas de Risco Hidrodinâmico,
- Mapas de Velocidade Máxima;
- Mapas da Cota do nível d'água máximo atingido durante a ruptura.
- Detalhes em mapas de determinadas áreas de interesse;

A zona de autossalvamento (ZAS) foi obtida a partir do mapa de inundação máxima, limitado a 10 km do barramento. Consequentemente, a zona de segurança secundária (ZSS) é o restante da mancha de inundação máxima, excluindo-se a ZAS.

9.2 Caracterização da Área Afetada pela Ruptura

9.2.1 Descrição da Zona de Autossalvamento (ZAS)

Para o empreendimento UHE Funil, foi feita uma ZAS única em conjunto com o dique de Nhangapi.

A ZAS atinge os municípios logo a jusante do barramento, compreendendo áreas de Itatiaia e Resende ambas no estado do Rio de Janeiro.

Além da área industrial da usina (Subestação, casa de força e escritórios) da UHE Funil, atinge o dique de Nhangapi, a ZAS atinge quase a área urbana total de Itatiaia, algumas áreas industriais em ambos os municípios, alguns trechos da BR-116 (Rodovia Presidente Dutra), alguns trechos da ferrovia MRS e áreas rurais nos municípios afetados.

A área da ZAS totaliza aproximadamente 29km², sendo 20km² em Itatiaia/RJ e 95km² em Resende/RJ. Estima-se que, nesta área, a população afetada seja de, aproximadamente, 17.431 habitantes, o que será confirmado posteriormente, quando do cadastramento da população.

No Anexo 11 do PAE, são apresentados os mapas da ZAS da usina.



9.2.2 Zona de Segurança Secundária (ZSS)

A ZSS da usina corresponde à mancha de inundação máxima com exceção da ZAS, conforme inciso X, do artigo 1º, da lei 12.334/2010.

A ZSS atinge os municípios de Barra do Piraí, Barra Mansa, Itatiaia, Paraíba do Sul, Pinheiral, Piraí, Porto Real, Quatis, Resende, Rio das Flores, Sapucaia, Três Rios, Valença, Vassouras e Volta Redonda no estado do Rio de Janeiro e o município de Chiador no estado de Minas Gerais.

Além de zonas rurais, a ZSS atinge áreas urbanas densamente povoadas nos municípios, excetuando-se Chiador e Sapucaia, afeta diversas pontes, trechos da BR-116 (Rodovia Presidente Dutra), trechos da ferrovia MRS, várias indústrias e a Academia Militar das Agulhas Negras (AMAN).

A área da ZSS totaliza aproximadamente 244km², sendo 27km² em Barra do Piraí, 17km² em Barra Mansa, 10km² em Itatiaia, 12km² em Paraíba do Sul, 6km² em Pinheiral, 0,5km² em Piraí, 29km² em Porto Real, 8km² em Quatis, 59km² em Resende, 5,5km² em Rio das Flores, 3km² em Sapucaia, 15km² em Três Rios, 8km² em Valença, 17km² em Vassouras e 19km² em Volta Redonda no estado do Rio de Janeiro e 8km² em Chiador no estado de Minas Gerais. Estima-se que, nesta área, a população afetada seja de, aproximadamente, 285.678 habitantes, o que será confirmado posteriormente, quando do cadastramento da população.

No Anexo 13 são apresentados os mapas da ZSS.



9.3 Análise dos Resultados

Para o Pior cenário identificado, a ruptura instantânea da UHE Funil - Cenário 4, a onda decorrente chega na UHE Anta chega na elevação, 253,99m, com uma vazão de pico instantânea de 8.861,0 m³/s. O nível máximo maximórum na UHE Anta montante é El. 253,70 m, e a vazão média diária de recorrência decamilenar é 7.501,0 m³/s, enquanto a vazão instantânea decamilenar é 8.408,0m³/s.

LUIZ FERNANDO ALVES DA SILVA

SEGURANÇA DE BARRAGEM MANUTENÇÃO CIVIL GERAÇÃO SUDESTE - OOMB.F

LUIZ FERNANDO ALVES DA SILVA

GUSTAVO SPIEGELBERG

SEGURANÇA DE BARRAGEM MANUTENÇÃO CIVIL GERAÇÃO SUDESTE - OOMB.F

GUSTAVO SPIEGELBERG

CRISTIANO NEVES SIMÃO

SEGURANÇA DE BARRAGEM MANUTENÇÃO CIVIL GERAÇÃO SUDESTE - OOMB.F

CRISTIANO NEVES SIMÃO

Michelle Taveira Telles

SEGURANÇA DE BARRAGEM MANUTENÇÃO CIVIL GERAÇÃO SUDESTE - OOMB.F

MICHELLE TAVEIRA TELLES



RENDERSON CLAYTON DOS SANTOS LOPES

OPERAÇÃO E MANUTENÇÃO FUNIL GERAÇÃO SUDESTE – OOGFU.F

RENDERSON CLAYTON DOS SANTOS LOPES

Jose Henrique Vilela

PRODUÇÃO OPERAÇÃO E MANUTENÇÃO DA GERAÇÃO SUDESTE - OOG.F

JOSE HENRIQUE VILELA

FRANCISCO JOSE ARTEIRO DE OLIVEIRA

DIRETOR DE OPERAÇÃO E MANUTENÇÃO DA ELETROBRAS SUDESTE - OO.F

FRANCISCO JOSE ARTEIRO DE OLIVEIRA