



**PLANO DE AÇÃO DE EMERGÊNCIA**  
**PAE**  
**UHE Mascarenhas de Moraes**  
**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 Mascarenhas de Moraes**

**OOMB.F.015.2023-R0**

<b>1</b>	<b>ÍNDICE.....</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>RESUMO.....</b>	<b>1</b>
<b>3</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>4</b>	<b>SISTEMA DE MODELAGEM – HEC-RAS .....</b>	<b>1</b>
<b>5</b>	<b>PREMISSAS DOS ESTUDOS.....</b>	<b>2</b>
<b>6</b>	<b>DADOS DE ENTRADA .....</b>	<b>2</b>
6.1	Modelos Digitais de Superfície (MDS) e de Terreno (MDT) .....	3
6.2	Batimetria .....	4
6.3	Coeficiente de rugosidade de Manning .....	6
6.4	Vazão afluente ao reservatório .....	6
<b>7</b>	<b>DEFINIÇÃO DA BRECHA DE RUPTURA .....</b>	<b>8</b>
<b>8</b>	<b>CENÁRIOS DE RUPTURA .....</b>	<b>8</b>
8.1	Cenários de ruptura da barragem da UHE Mascarenhas de Moraes .....	8
<b>9</b>	<b>SELEÇÃO DOS CENÁRIOS DE RUPTURA.....</b>	<b>10</b>
9.1	Barragem UHE Mascarenhas de Moraes .....	10
9.1.1	Parâmetros da brecha.....	11
9.1.2	Hidrograma de ruptura .....	12
<b>10</b>	<b>RESULTADOS .....</b>	<b>13</b>
10.1	Tempo de Chegada da Onda .....	14
10.2	Mapas .....	15
<b>11</b>	<b>AMORTECIMENTO DA ONDA DE INUNDAÇÃO.....</b>	<b>15</b>



## **2 RESUMO**

O presente documento apresenta uma síntese dos estudos de ruptura da barragem da UHE Mascarenhas de Moraes, com as premissas e dados utilizados na modelagem, assim como os resultados obtidos, os quais estão apresentados por meio de tabelas, gráficos e mapas.

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.

Por esta razão, foram estudados diferentes cenários de ruptura, visando identificar o pior cenário, com a maior mancha de inundação e menor tempo de chegada da onda, certificando que os planos de ação de emergência e de contingência estarão bem dimensionados para qualquer possível ruptura da usina.

Tendo em vista o arranjo da usina, foi estudada a ruptura de sua barragem principal, 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 Mascarenhas de Moraes 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*, que resolve as



equações de Navier-Stokes em um esquema numérico híbrido implícito de diferenças finitas e volumes finitos

No presente estudo, foi utilizada a versão 2D do HEC-RAS 5.0.5.

## **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, independentemente de sua capacidade de amortecer ou não a onda gerada;
- Na hipótese de a 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 acordo com a orientação da Resolução ANA nº 236/2017, a zona de autossalvamento (ZAS) foi definida em 10 km a partir do barramento da usina. De forma conservadora, considerou-se esta distância a partir da mancha máxima de inundação obtida com o pior cenário de modelagem considerado.

## **6 DADOS DE ENTRADA**

Para a realização das simulações no modelo, são necessários dados de entrada, que representem as condições da região de estudo, tais como.

- Dados topográficos - representar o terreno de jusante, por onde a onda irá escoar;
- Dados batimétricos
  - Reservatório de montante – representar o reservatório de água que irá escoar pela brecha, após a ruptura da barragem;
  - Calha do rio de jusante – representar a batimetria por onde a onda irá escoar após a ruptura;



- Reservatório de jusante – representar a batimetria por onde a onda irá escoar após a ruptura.
- Coeficientes de rugosidade – representar as diferentes regiões pelas quais a onda irá passar ao longo de todo o domínio de modelagem
- Vazão de entrada no modelo – representar a situação hidrológica no momento da ruptura da barragem;
- Nível d'água do reservatório de montante – representar o nível d'água do reservatório da usina em estudo, que influenciará no volume de água disponível na ruptura;
- Nível d'água do reservatório de jusante - representar o nível d'água do reservatório usina de jusante, que impacta na área alagada e na capacidade de amortecimento da onda associada à ruptura.

Sendo assim, os dados de entrada, utilizados neste estudo, estão descritos nos subitens a seguir.

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

Visando obter uma topografia compatível com o terreno da região em estudo, foi contratada uma empresa especializada, que levantou, através de imagem de satélite, a topografia da região de interesse.

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.

Segundo o relatório da empresa contratada, os modelos gerados apresentam resolução espacial de 2 metros, precisão absoluta de 2 metros e relativa de 1 metro, com exceção do MDT sob áreas de vegetação densa, que teve sua superfície gerada a partir da interpolação do MDS.



## **6.2 Batimetria**

Assim como a topografia, é importante representar a batimetria da região. Deste modo, a Eletrobrás Furnas contratou empresas especializadas para a realização de levantamentos batimétricos no reservatório da UHE Mascarenhas de Moraes e UHE Luis Carlos Barreto de Carvalho, também sob concessão de Furnas.

Tais levantamentos foram realizados a partir de tecnologia monofeixe, por seções batimétricas, e multifeixe.

A empresa SALT foi contratada para realizar o levantamento batimétrico monofeixe em uma extensão de aproximadamente 33 km do Rio Grande, na área à jusante da UHE Marechal Mascarenhas de Moraes, com seções espaçadas em cerca de 1 km. A totalidade dos dados apresentam boa qualidade de navegação e de aferição da profundidade. A média de profundidade encontrada na área foi de 31 m. Na seção S12 foi encontrado o maior valor de profundidade, com 89,12 m.

O levantamento com tecnologia multifeixe foi realizado no reservatório da UHE Mascarenhas de Moraes e UHE Luis Carlos Barreto de Carvalho pela empresa Rural Tech Comércio e Serviços Eireli, contemplando as seguintes atividades:

- Implantação da Rede de Vértices Geodésicos (RVG) no entorno do reservatório, por rastreio 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 Mascarenhas de Moraes e do reservatório da UHE Luis Carlos Barreto de Carvalho, localizada a jusante, obtendo



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

---

um modelo batimétrico representativo de toda a calha e reservatório, ao longo de todo o domínio de modelagem.





### 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 - Coeficientes de Manning utilizados no estudo. a seguir.**

*Tabela 1 - Coeficientes de Manning utilizados no estudo.*

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

Outro dado de entrada do modelo é a vazão afluente ao reservatório da UHE Mascarenhas de Moraes, a qual representará a situação hidrológica no momento da ruptura da barragem.

De acordo com a literatura internacional, os cenários usualmente utilizados são:

- *Sunny day* – Ruptura da barragem em um momento de vazão recorrente, como, por exemplo, a vazão média de longo termo ( $Q_{MLT}$ );
- *Rainy day* - Ruptura da barragem em um momento de vazão extrema, como, por exemplo, a vazão decamilenar ( $Q_{10.000}$ ).

Deste modo, visando representar ambas as situações, foram simuladas as rupturas da barragem principal e do dique para os dois casos.

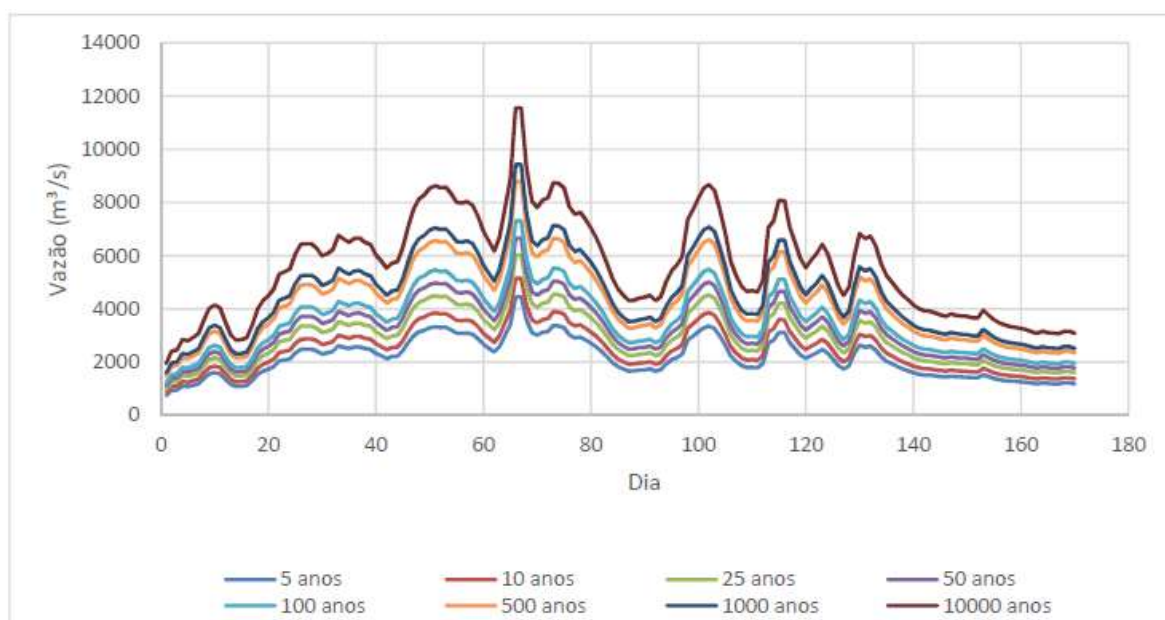


**Plano de Ação de Emergência**  
**UHE Mascarenhas de Moraes**  
**ANEXO 12 – ESTUDOS DE RUPTURA DA BARRAGEM**  
**REVISÃO 03 – 01/2025**

A vazão média de longo termo ( $Q_{MLT}$ ) foi obtida através do estudo elaborado pela Intertechne Engenharia, para a revisão periódica de segurança de barragem, a qual encontra-se apresentada a seguir.

$$Q_{MLT} = 1.005,0 \text{ m}^3/\text{s} \quad (1)$$

Para representar a ruptura no *rainy day*, foi utilizada a o hidrograma de vazões decamilenar iniciando a ruptura no instante de pico de vazão, também obtido do estudo elaborado pela Intertechne Engenharia, Figura 1.



*Figura 1. Vazões Máximas UHE Mascarenhas de Moraes (Fonte: Relatório da revisão periódica de segurança de barragem, elaborado pela VLB Engenharia).)*



## **7 DEFINIÇÃO DA BRECHA DE RUPTURA**

A definição da brecha é um processamento dos dados, que leva em consideração o reservatório, o tipo de estrutura, o tipo de rompimento, níveis d'água, entre outros parâmetros.

No presente estudo, as dimensões da brecha foram definidas com base nas formulações empíricas de *Froehlich* (2008), a partir de ferramenta disponível no próprio *software*.

O tempo de formação da brecha foi obtido de duas maneiras distintas;

- Formulação empírica de *Froehlich* (2008), a partir de ferramenta disponível no próprio *software*;
- Ruptura instantânea da barragem, com tempo de formação da brecha equivalente a 6 min, conforme recomendado pelo *U.S. Army Corps of Engineers*.

O cenário de ruptura instantânea, apesar de não ser o mais usual em estruturas de concreto e de terra, foi considerado nas simulações, em plena conformidade com a premissa de adotar critérios mais conservadores.

## **8 CENÁRIOS DE RUPTURA**

Com base nas premissas e critérios definidos neste estudo, foram simulados, ao todo, 3 (três) cenários de ruptura, conforme descrito nos subitens a seguir.

É importante ressaltar que os cenários foram definidos levando em consideração a premissa de se adotar cenários críticos, visando identificar o pior cenário de ruptura para cada estrutura.

### **8.1 Cenários de ruptura da barragem da UHE Mascarenhas de Moraes**

Inicialmente, foram definidos 3 cenários de ruptura da barragem da UHE Mascarenhas de Moraes.

- CENÁRIO 1:
  - Ruptura por *piping*;
  - Nível d'água normal do reservatório;
  - Vazão afluente ao reservatório equivalente à  $Q_{MLT}$ ;



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

---

- Tempo de formação da brecha obtido da formulação empírica de *Froehlich*(2008);



- CENÁRIO 2:
  - Ruptura por galgamento;
  - Nível d'água do reservatório galgando o dique;
  - Vazão afluente ao reservatório referente ao pico do hidrograma decamilenar;
  - Tempo de formação da brecha obtido da formulação empírica de *Froehlich* (2008);
- CENÁRIO 3:
  - Ruptura por galgamento;
  - Nível d'água do reservatório galgando o dique;
  - Vazão afluente ao reservatório pico hidrograma decamilenar;
  - Ruptura instantânea;

## **9 SELEÇÃO DOS CENÁRIOS DE RUPTURA**

Todos os cenários descritos no item anterior foram simulados. Este relatório, visando apresentar um conteúdo conciso, selecionou o pior cenário de ruptura de cada estrutura, apresentando apenas os resultados essenciais para a elaboração dos planos de ação de emergência e de contingência, evitando, assim, interpretações equivocadas dos resultados.

Sendo assim, os subitens a seguir apresentam os parâmetros de cada cenário, que auxiliaram na seleção do pior cenário de cada estrutura.

### **9.1 Barragem UHE Mascarenhas de Moraes**

Inicialmente, serão apresentados os parâmetros que subsidiaram a seleção do pior cenário de ruptura para a barragem da UHE Mascarenhas de Moraes.



#### **9.1.1 Parâmetros da brecha**

A Tabela 2, a seguir, apresenta os parâmetros da brecha, na barragem da UHE Mascarenhas de Moraes, para os cenários 1, 2 e 3.



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

*Tabela 2 – Parâmetros das brechas nos cenários 1, 2 e 3 da barragem da UHE Mascarenhas de Moraes*

Parâmetros	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3
Cota da crista da barragem	669,12 m	669,12 m	669,12 m
NA de ruptura	666,12m	669,12 m	669,12 m
Volume (NA de ruptura)	4.234,5 hm <sup>3</sup>	5.550,0 hm <sup>3</sup>	5.550,0 hm <sup>3</sup>
Vazão Afluyente ao reservatório	1005,0 m <sup>3</sup> /s	11.556,0 m <sup>3</sup> /s (hidrograma Q <sub>10.000</sub> )	11.556,0 m <sup>3</sup> /s (hidrograma Q <sub>10.000</sub> )
Cota soleira brecha	640,0 m	640,0 m	640,0 m
Largura (base)	350,0 m	350,0 m	350,0 m
Altura da brecha	29,12 m	29,12 m	29,12 m
Altura hidráulica	26,12 m	29,12 m	29,12 m
Talude da brecha (MD)	2 (H): 1 (V)**	2 (H): 1 (V)**	2 (H): 1 (V)**
Talude da brecha (ME)	2,7 (H): 1(V)**	2,7 (H): 1(V)**	2,7 (H): 1(V)**
Tempo de formação da brecha	12,53h*	12,53h*	0,1 h (Ruptura Instantânea)
Modo de ruptura	Piping	Galgamento	Galgamento

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

Diante dos resultados obtidos foi possível verificar que o cenário 3, por considerar a ruptura instantânea do dique, resulta em uma brecha com tempo de formação de 6 minutos, enquanto os outros dois cenários apresentam tempo de formação da brecha superior a 12 horas.

Consequentemente, a onda gerada no cenário 3 atingirá as regiões de jusante mais rapidamente do que os outros dois cenários, se caracterizando, a princípio, como um cenário mais crítico.

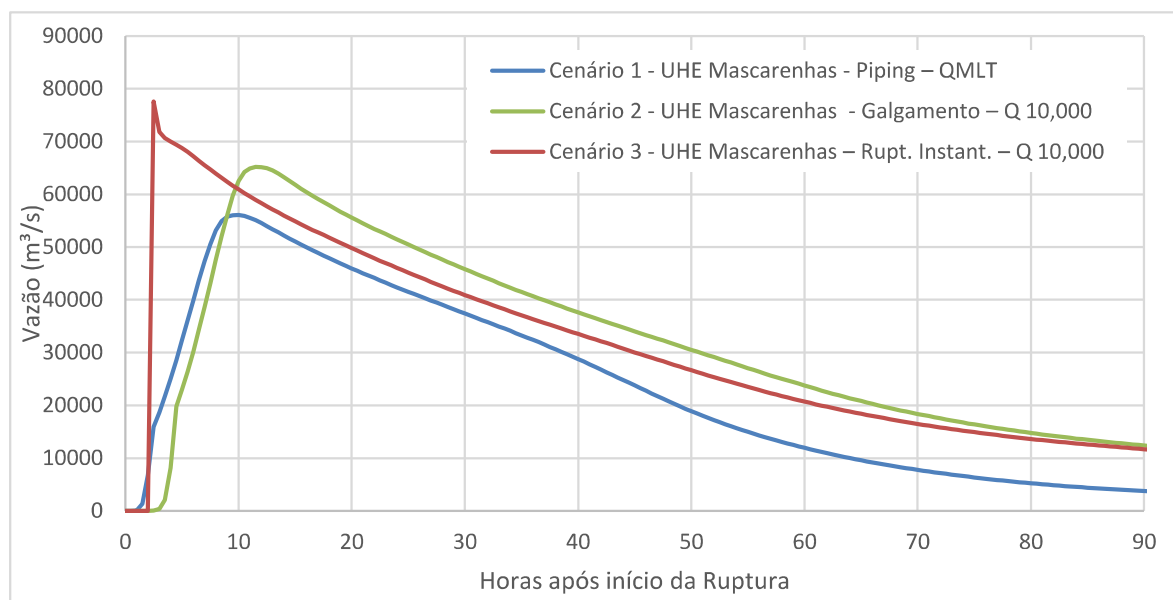
Para demonstrar que o cenário 3 se trata do pior cenário para da barragem da UHE Mascarenhas de Moraes, deve-se avaliar outros parâmetros, como o hidrograma de ruptura e a área inundada, o que será verificado no próximo subitem.

### 9.1.2 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, níveis d'água de montante e de jusante, dimensões da brecha a cada instante e tempo de ruptura.



Para a barragem da UHE Mascarenhas de Moraes, foram simulados os cenários 1, 2 e 3, obtendo-se 3 (três) hidrogramas de ruptura distintos, os quais encontram-se apresentados na Figura 2.



*Figura 2 - Hidrogramas de ruptura dos cenários 1, 2 e 3, simulados para a barragem da UHE Mascarenhas de Moraes.*

A Figura 2 evidencia que a vazão de pico do cenário 3 é superior à vazão de pico dos demais cenários. Além disso, verifica-se que o tempo para se alcançar a vazão de pico no cenário 3 é muito inferior ao tempo necessário nos outros dois cenários.

Por tais características, o cenário 3 apresenta, quando comparado aos outros dois cenários simulados, a maior área alagada, com o menor tempo de chegada da onda no vale de jusante.

Sendo assim, o cenário 3 é o pior cenário de ruptura identificado para a UHE Mascarenhas de Moraes, razão pela qual é o cenário escolhido para a apresentação dos resultados neste relatório.

Deste modo, a vazão de pico obtida para este cenário corresponde a 77.580,0 m³/s.

## 10 RESULTADOS

O software possibilita a apresentação de resultados de diversas formas distintas. Neste relatório, eles serão apresentados em forma de tabelas e mapas.





É importante ressaltar, assim como já foi informado em reuniões presenciais às defesas civis, que é possível obter outros resultados do modelo, caso os órgãos de defesa necessitem para a elaboração de seus planos de contingência.

#### **10.1 Tempo de Chegada da Onda**

A título de orientação para o planejamento das ações de evacuação e resgate por parte da Defesa Civil foram gerados mapas com os tempos para chegada da onda de inundação.

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

Os mapas de tempo de chegada da onda encontram-se no anexo 10.

Estas informações são de extrema importância para a elaboração do plano de ação de emergência e dos planos de contingência, pois possibilitam o planejamento e estruturação necessária para a evacuação e resgate da população inserida em cada região.



## **10.2 Mapas**

Outra forma de apresentação dos resultados é através de mapas, ao longo de todo o domínio de modelagem, os quais se encontram no Anexos 10.

Foram apresentados os mapas listados a seguir, para o cenário 3.

- Mapas de inundação máxima;
- Mapas de tempo de chegada da onda;
- Mapas de 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;

Conforme já mencionado anteriormente, a zona de autossalvamento (ZAS) foi definida a partir da mancha máxima de inundação, limitada a 10 km do barramento, conforme orientação da ANA. A zona de segurança secundária (ZSS) é o restante da mancha máxima, excluindo-se a ZAS. Os mapas da ZAS e da ZSS encontram-se no Anexo 11 e 13, respectivamente.

## **11 AMORTECIMENTO DA ONDA DE INUNDAÇÃO**

Conforme definido nas premissas do estudo, o domínio de modelagem se estendeu até a usina de jusante, independente da capacidade de amortecimento da cheia de ruptura associada, tendo em vista a complexidade envolvida em um estudo em cascata.

Neste estudo, considerando o pior cenário simulado, a onda formada pela ruptura hipotética da UHE Mascarenhas de Moraes atinge o nível d'água na UHE Luiz Carlos Barreto de Carvalho na elevação 641,04 m, galgando sua estrutura de barramento.

Deste modo, recomenda-se, à ANEEL, que sejam coordenados estudos mais abrangentes, envolvendo os agentes da bacia, de modo a se obter um estudo em cascata, com critérios e parâmetros pré-definidos para todas as simulações.



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

---

Assinaturas

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



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

---

GUSTAVO MOREIRA GRANZOTO

OPERAÇÃO E MANUTENÇÃO MASCARENHAS DE MORAES GERAÇÃO SUDESTE – OOGMA.F

GUSTAVO MOREIRA GRANZOTO

ROBERTO TEIXEIRA SINISCALCHI

REGIONAL OPERAÇÃO E MANUTENÇÃO MINAS GERAIS DA GERAÇÃO SUDESTE - OOGM.F

ROBERTO TEIXEIRA SINISCALCHI

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