

SIMULAÇÃO TRIDIMENSIONAL DE TRANSPORTE DE TRONCOS NO RIO MADEIRA

Isabela Rodrigues Caldatto¹, Ana Carolina Canossa Becker¹, Rubem Daru¹, Tobias Bleninger², Bruna Arcie Polli¹, Renato Penteado¹, Claudiney Freitas³, Dieverlandio Silva³, Victor Pinto³

1. Lactec. Brasil

2. Universidade Federal do Paraná – UFPR. Brasil.

3. Jirau Energia. Brasil

isabela.caldato@lactec.org.br, ana.becker@lactec.org.br, daru@lactec.org.br, bleninger@ufpr.br, bruna.polli@lactec.org.br, renato@lactec.org.br, claudiney.freitas@jirauenergia.com.br, diever.silva@jirauenergia.com.br, victor.pinto@jirauenergia.com.br.

RESUMO:

O rio Madeira transporta grande quantidade de troncos, principalmente nos períodos de cheia (estimativa de 30.000 troncos por dia), os quais podem interferir na operação das hidrelétricas em seu curso. Este trabalho apresenta a simulação hidrodinâmica tridimensional do rio Madeira e o transporte desse material lenhoso, para analisar seu comportamento ao longo do rio e ter o conhecimento da sua posição conforme o escoamento. Neste trabalho, os troncos são reproduzidos como partículas pelo modelo PART do Delft3d, simulado através da modelagem Lagrangeana. São apresentados cenários hipotéticos com alguns modos de operação da UHE Jirau e diversas condições de vazões.

PALAVRAS CHAVES:

Troncos submersos, troncos superficiais, material lenhoso, detritos fluviais, transporte, corpos fluviais, rios, bacia hidrográfica, modelagem hidrodinâmica, Log Boom, reservatórios, barragens, vertedouro, Delft3d, rio Madeira, modelo Lagrangeano.

ABSTRACT:

The Madeira river transports a large number of logs, especially on flooding periods (estimated at 30,000 logs per day), which can interfere with the operation of hydroelectric plants along its course. This work presents a three-dimensional hydrodynamic simulation of the Madeira river and the transport of the woody material in order to analyze its behavior along the river and to have knowledge of its position according to the flow. In this work, the logs are reproduced as particles by the Delft3d PART model, simulated through Lagrangian modeling. Hypothetical scenarios with some operating modes of HPP Jirau and several flow conditions are presented.

KEY WORDS:

Submerged logs, surface logs, woody material, river debris, transport, river bodies, rivers, watershed, hydrodynamic modeling, Log Boom, reservoirs, dams, spillway, Delft3d, Madeira river, Lagrangian model.

INTRODUÇÃO

O rio Madeira, assim como a maioria dos rios amazônicos, transporta uma enorme quantidade de material lenhoso, sendo flutuantes ou submersos (Lactec, 2022). Em 2013, a Usina Hidrelétrica de Jirau teve início em suas operações e, desde então, vem enfrentando, principalmente nos períodos de cheia, desafios no manejo da grande quantidade de troncos que são transportados pelo rio.

Foram implantadas as linhas de Log Boom, que são um conjunto de boias envoltas em estruturas metálicas (**Figura 1**) (Diálogo Hidroviáveis, 2019), com a finalidade de reter e direcionar os troncos para que não atinjam as casas de força. Estima-se que no período de cheia aproximadamente 30.000 troncos superficiais cheguem ao reservatório diariamente, os quais são parcialmente conduzidos por linhas de Log Boom para um vertedouro específico que os descarregam a jusante da barragem. Parte destes ficam retidos nas longas linhas de Log Boom, apresentando problemas de retenção de grande quantidade de troncos devido à formação de catenárias.

Ainda não há estudos no rio Madeira frente à caracterização do material ou dos fenômenos que causam um maior ou menor transporte, como a densidade do material transportado, teor de umidade dos troncos, quantidade de material retido e influência das operações realizadas nas usinas. Visando a caracterização do transporte do material lenhoso está sendo desenvolvido um projeto de pesquisa denominado “Desenvolvimento de metodologia integrada para o monitoramento do transporte de material lenhoso para a concepção de sistema de manejo de troncos submersos - DMIMMAD (06631-0014/2020)”, no âmbito do P&D Aneel com a Jirau Energia.



Figura 1.- Troncos retidos pelo Log Boom. (Fonte: Diálogo Hidroviáveis, 2019)

Os estudos de modelagem aqui apresentados fazem parte deste projeto. A finalidade deste artigo é apresentar resultados da modelagem hidrodinâmica e Lagrangeana para cálculo de trajetórias tridimensionais dos troncos para diferentes cenários de operação. Nestes cenários não estão sendo consideradas as estruturas de Log Boom. As modelagens nos permitem obter dados otimizados para análise e compreensão do transporte desse material.

ÁREA DE ESTUDO

A Usina de Jirau (**Figura 2**) está localizada no rio Madeira a 120 km da capital Porto Velho (RO). A UHE tem 3.750 MW de capacidade instalada, o que representa 3,7% de toda a energia hidrelétrica do país. Possui duas casas de força (direita e esquerda) com 50 unidades geradoras. Seu nível d'água está entre 82,50m e 90,00m (Jirau Energia, 2022).

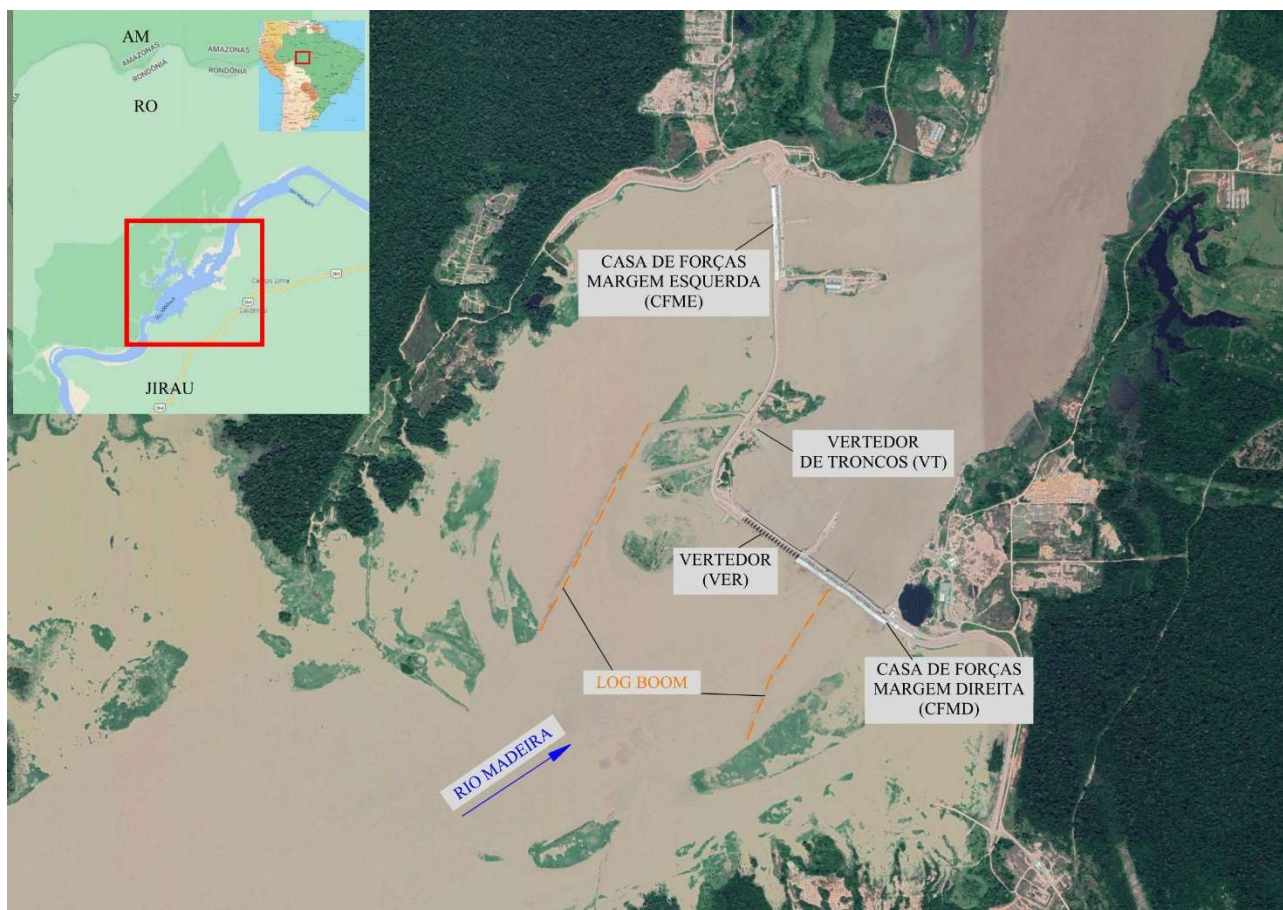


Figura 2.- Localização das estruturas da UHE Jirau.

MODELO HIDRODINÂMICO

Para caracterizar o transporte de troncos foi utilizada inicialmente, a modelagem hidrodinâmica com o objetivo compreender as variáveis hidrológicas e a influência da operação do reservatório, em diferentes cenários de vazões distribuídas entre as casas de força direita e esquerda e o vertedor de troncos. Para as simulações hidrodinâmicas foi utilizado o modelo Delft3D Flow (Delft3D-FLOW, 2018) usando uma grade curvilínea e 5 camadas verticais (Figura 3).

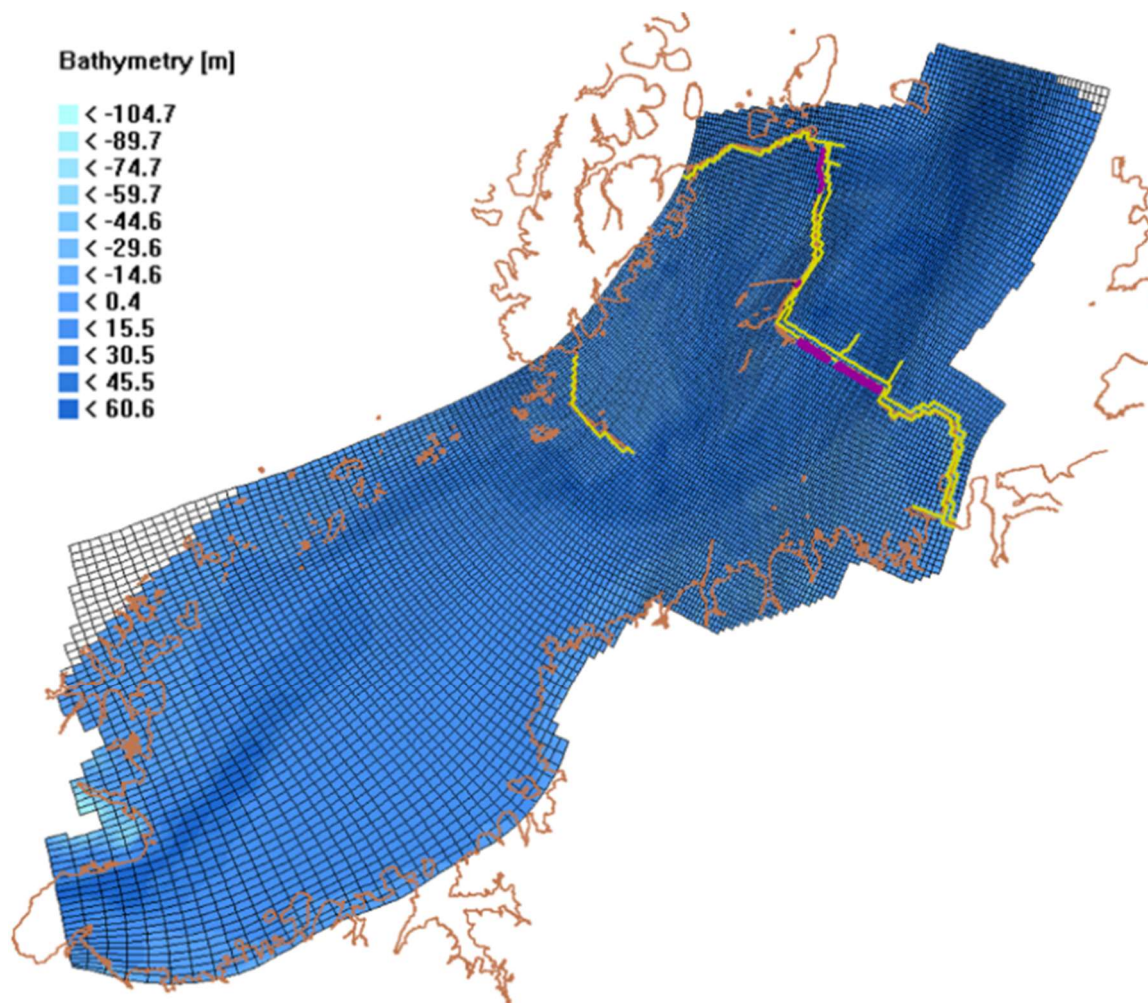


Figura 3.- Grade, batimetria e estruturas adotadas no modelo hidrodinâmico.

Foram definidos três cenários hipotéticos para quantificar as influências hidrodinâmicas com diferentes modos de operação e diferentes condições de vazão (Tabela 1). O cenário 1 considera carga máxima nas casas de força (CFs), sem considerar vertimento. O cenário 2 considera carga máxima na casa de força da margem direita (CFMD), enquanto o cenário 3 considera carga máxima na casa de força da margem esquerda (CFME). As simulações foram realizadas em regime permanente.

Tabela 1.- Cenários Operacionais

Cenário	Descrição	N.A.R. (m)	Vazão Total (m³/s)	Vazão CFMD (m³/s)	Vazão CFME (m³/s)	Vazão Vertedouro (m³/s)	Vazão Vertedor de Troncos (m³/s)
1	Carga máxima nas CF's sem vertimento	90	27.800	15.400	12.100	0	300
2	Carga máxima na CFMD sem vertimento	86,81	15.450	15.400	0	0	50
3	Carga máxima na CFME sem vertimento	85,57	12.100	0	12.100	0	0

A calibração do modelo foi realizada com dados medidos de ADCP (*acoustic doppler current profiler*), um equipamento acústico que utiliza o efeito Doppler transmitindo pulsos sonoros e captando o eco que retorna das partículas em suspensão e dados de nível do reservatório. O resultado

é apresentado em *pixels* onde cada *pixel*, numa seção transversal, tem o valor da intensidade e direção da velocidade de água. Por integração na seção obtém-se as vazões que passam numa seção.

TRANSPORTE DE TRONCOS

Para simulação de transporte de troncos foi utilizada a hipótese simplificadora de que a velocidade e deslocamento de troncos segue a velocidade do escoamento. Esta hipótese já foi utilizada em outros métodos de modelagem de transporte de troncos com boa aproximação (Ruiz-Villanueva et al., 2014). Para a simulação das suas trajetórias, os troncos foram representados como partículas sem massa e sem volume que seguem o escoamento (modelagem Lagrangeana). Para esta modelagem foi utilizado o modelo *Delft3D-PART* acoplado ao modelo hidrodinâmico *Delft3D-Flow*.

A modelagem Lagrangeana, também conhecida como *particle-tracking*, é inicializada com a introdução de partículas na área de interesse. No caso atual foram introduzidas partículas instantaneamente no primeiro passo temporal, na superfície e a montante da seção de estrangulamento em 8 pontos ao longo da seção (Figura 4). A movimentação das partículas é influenciada pelos dados hidrodinâmicos do modelo hidrodinâmico *Delft3D-Flow* seguindo a cada passo temporal as velocidades tridimensionais do local onde a partícula se encontra. Além disso, as partículas são dispersas proporcionalmente à turbulência simulada. As trajetórias são apresentadas em 3D, ou seja, as partículas podem oscilar em profundidade.

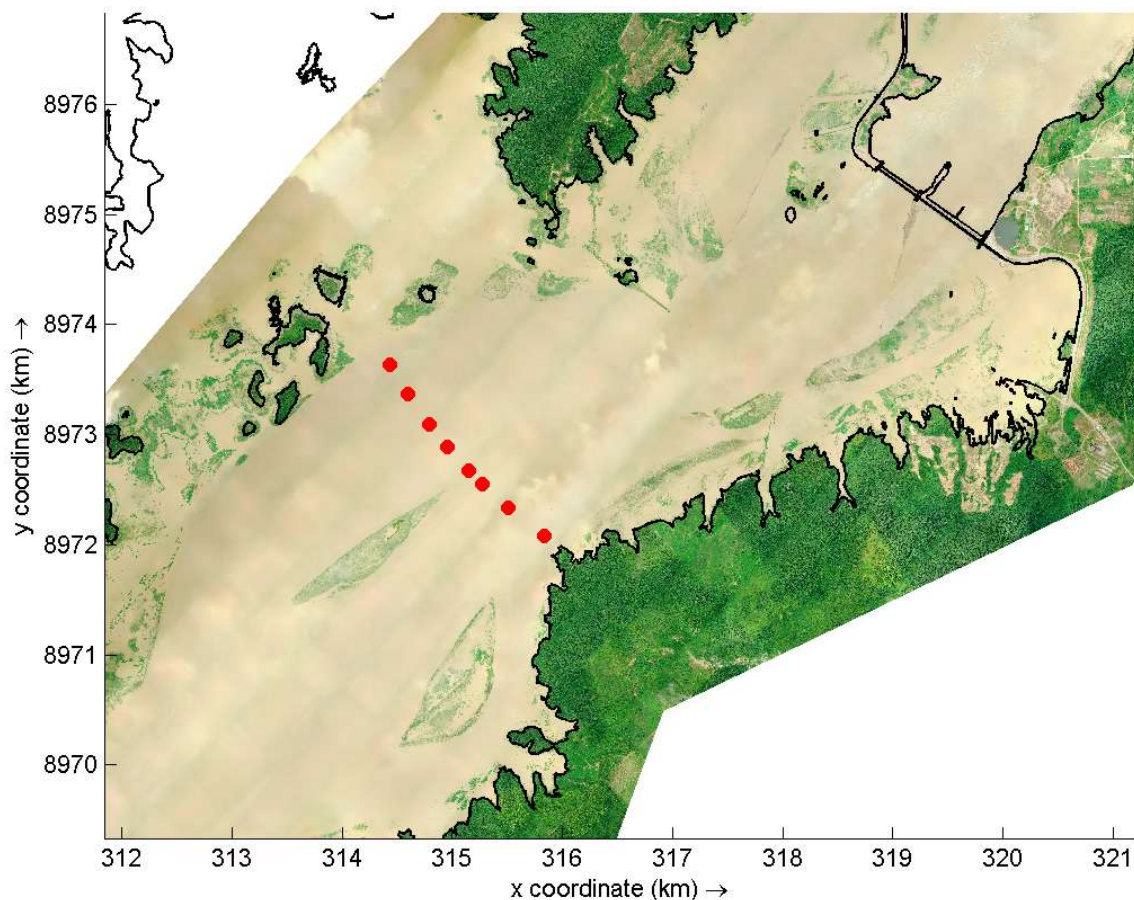


Figura 4.- Local de lançamento de partículas

RESULTADOS

Modelo Hidrodinâmico

Com o objetivo de calibrar, verificar o modelo e entender o escoamento desta região, foi realizada a comparação das medições de ADCP com os resultados da simulação do Delft3D no local indicado pela Figura 5. Após a simulação, as magnitudes das velocidades foram semelhantes comparado ao ADCP, como indica a Figura 6.



Figura 5.- Seção das medições de ADCP

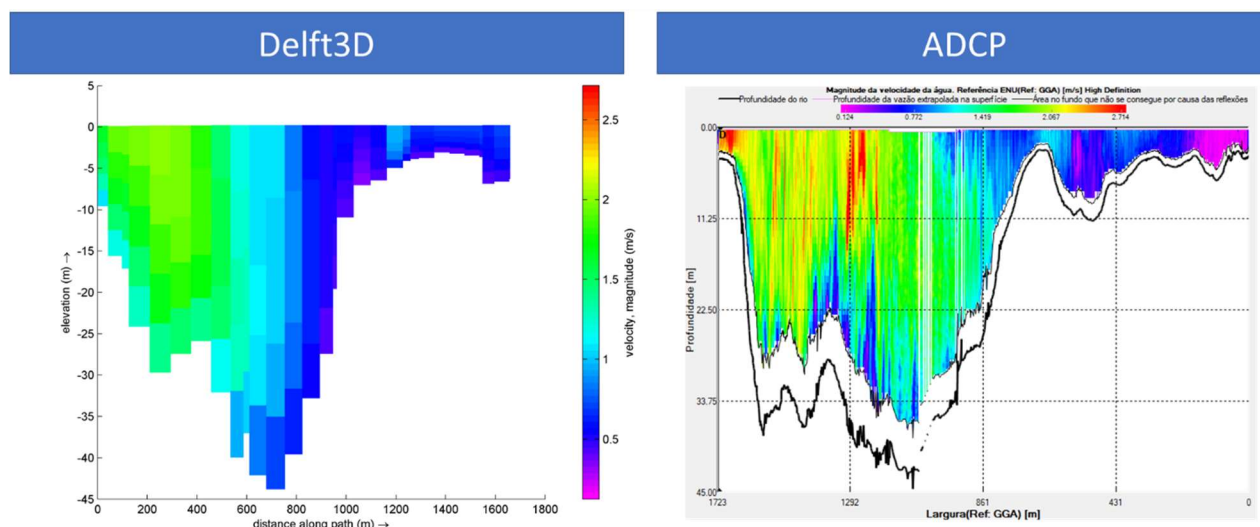


Figura 6.- Transecto ilustrando magnitude de velocidades horizontais no modelo (esquerda) e medido em campo (direita).

A **Figura 7** mostra a magnitude e direções das velocidades superficiais horizontais ao longo do reservatório da UHE Jirau para cada um dos cenários operacionais. Foi possível notar os efeitos gerados pela magnitude das vazões. No cenário 2, por exemplo, em que não foi inserida vazão direcionada à CFME, foram verificadas velocidades próximas a zero m/s na região da CFME. O mesmo ocorreu para a CFMD no cenário 3, visto que a vazão foi de zero também.

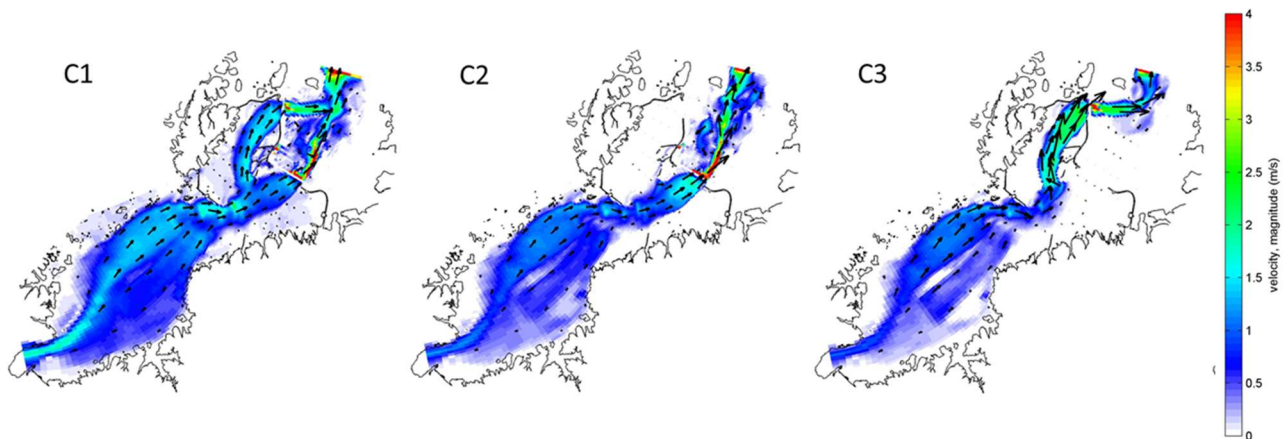


Figura 7.- Magnitude (cores na legenda) e direção (vetores em preto) das velocidades superficiais horizontais ao longo do reservatório da UHE Jirau

Transporte de Troncos

Foi realizada uma simulação para cada cenário com o lançamento das partículas na superfície. Os principais parâmetros estudados, a dispersão vertical e velocidade de flutuação, foram calibrados através de diversos testes para atingir resultados próximos da realidade observada em campo. O valor obtido a partir desta calibragem, para o coeficiente de dispersão vertical, foi igual a zero e para a velocidade de flutuação também foi nulo. Os dados observados em campo ainda estão sendo monitorados, mas, previamente, já é possível ter conhecimento de que o transporte de material lenhoso no rio Madeira é predominantemente superficial (estima-se de 80 a 90%).

A Figura 8 mostra a trajetória realizada pelas partículas em cada cenário, sendo que a cor representa a profundidade da partícula e a linha preta representa o contorno do reservatório. As partículas foram lançadas na superfície e assim permaneceram nas regiões mais rasas (pontos na cor rosa). Nos trechos onde a profundidade é maior, consequentemente as partículas ficam um pouco mais fundas (pontos azuis).

Na Figura 9 estão representadas as trajetórias para cada cenário com a cor representando o destino da partícula. A Figura 10 representa os percentuais de distribuição das vazões entre cada um dos destinos comparado com a proporção do destino das partículas em cada um dos cenários, sendo eles: CFME (Casa de Força da Margem Esquerda), CFMD (Casa de Força da Margem Direita), VER (Vertedor), VT (Vertedor de Troncos) e Reservatório (partículas que não chegaram em nenhum desses locais).

Foi verificado que as trajetórias foram condizentes com a distribuição de vazões, por exemplo, o cenário 1 teve 43,5% da vazão total direcionada para CF da margem esquerda, 55,4% da vazão foi para CF da margem direita e 1,1% para o vertedor de troncos. Os destinos das partículas neste cenário foram, 30% para CFME, 51% para CFMD, 2% para o VT, 14% para o vertedor e 2% não chegaram a nenhum destino (ficaram retidas no reservatório). Nesse caso, a maior parte da vazão está direcionada para o lado direito do sistema e assim as partículas seguem o escoamento, ou seja, a maior parte das partículas vão para as estruturas a direita do sistema.

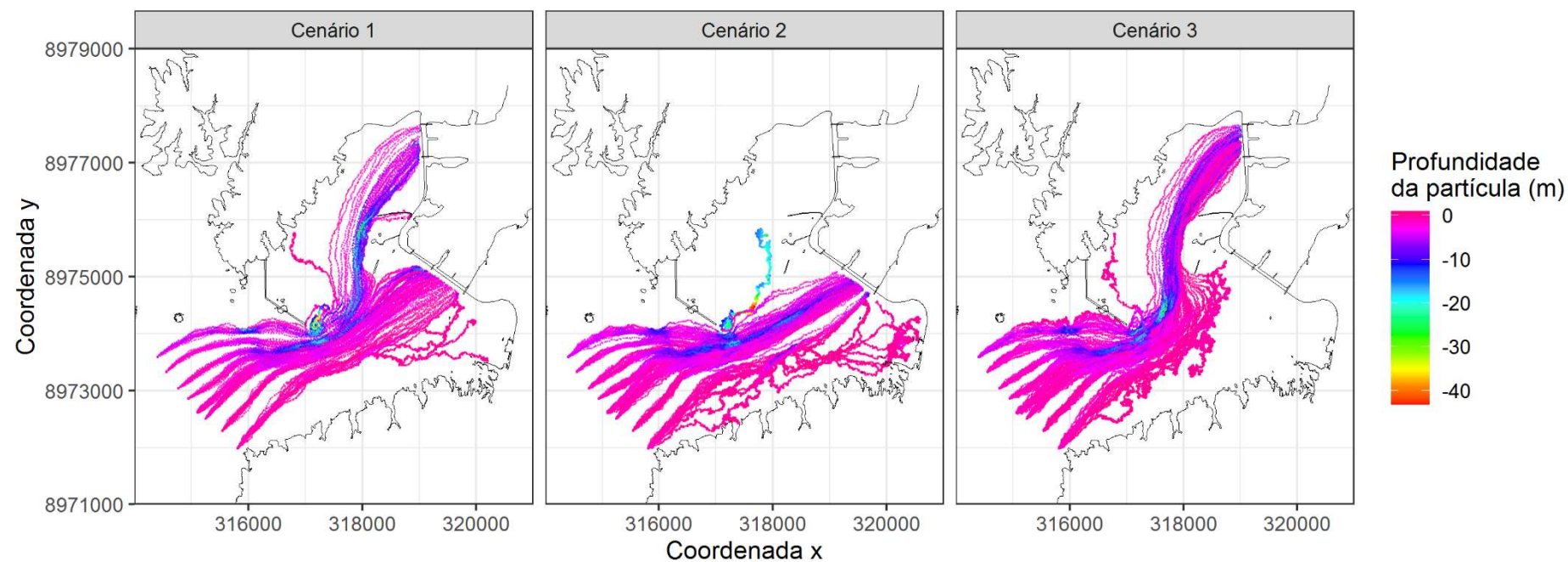


Figura 8.- Trajetória e profundidade das partículas para os cenários operacionais no reservatório da UHE Jirau

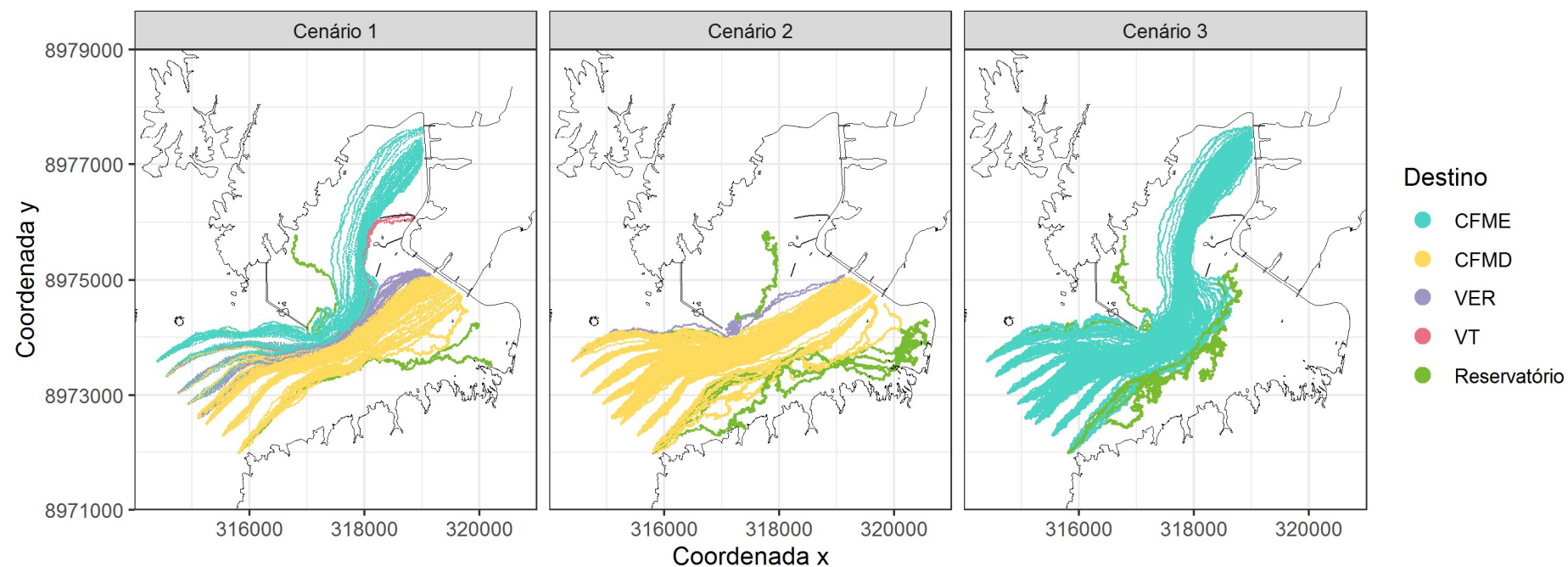
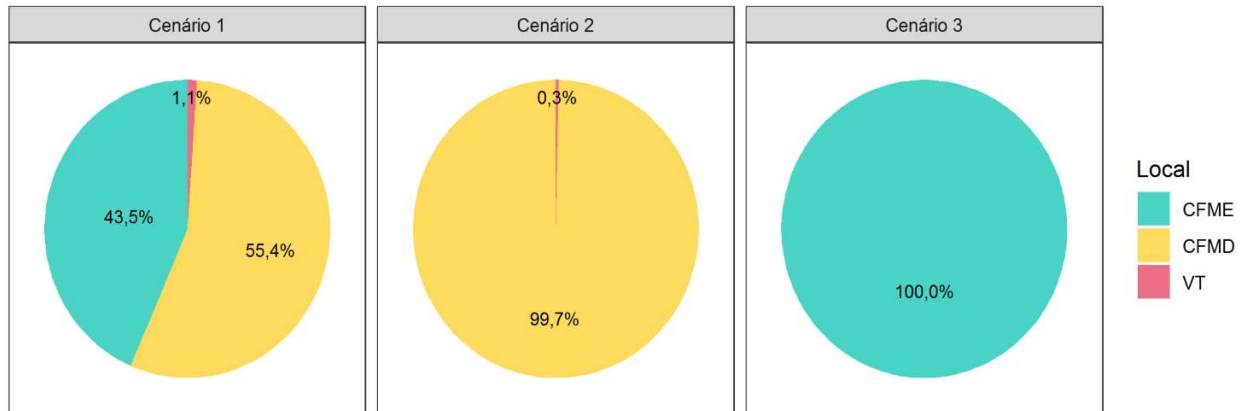


Figura 9.- Trajetória e destino das partículas para os cenários operacionais no reservatório da UHE Jirau

Proporção de vazões em cada cenário



Proporção do destino das partículas em cada cenário

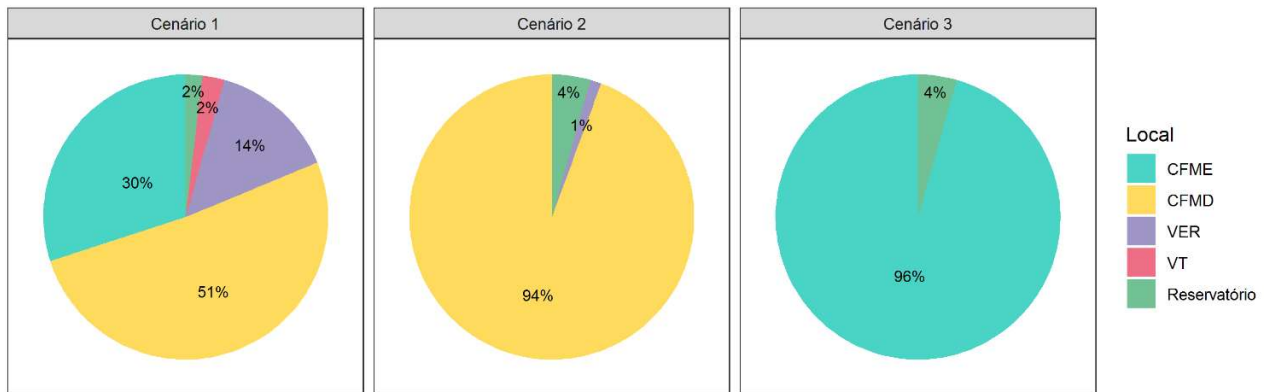


Figura 10.- Comparação entre a proporção de vazões e proporção do destino das partículas para os cenários operacionais no reservatório da UHE Jirau

Por fim, a Figura 11 indica o percentual de partículas em relação a profundidade, onde é observado que nos três cenários, mais de 80% das partículas estão concentradas em superfície. Este resultado foi considerado condizente com as observações de campo que estão sendo realizadas pelo projeto.

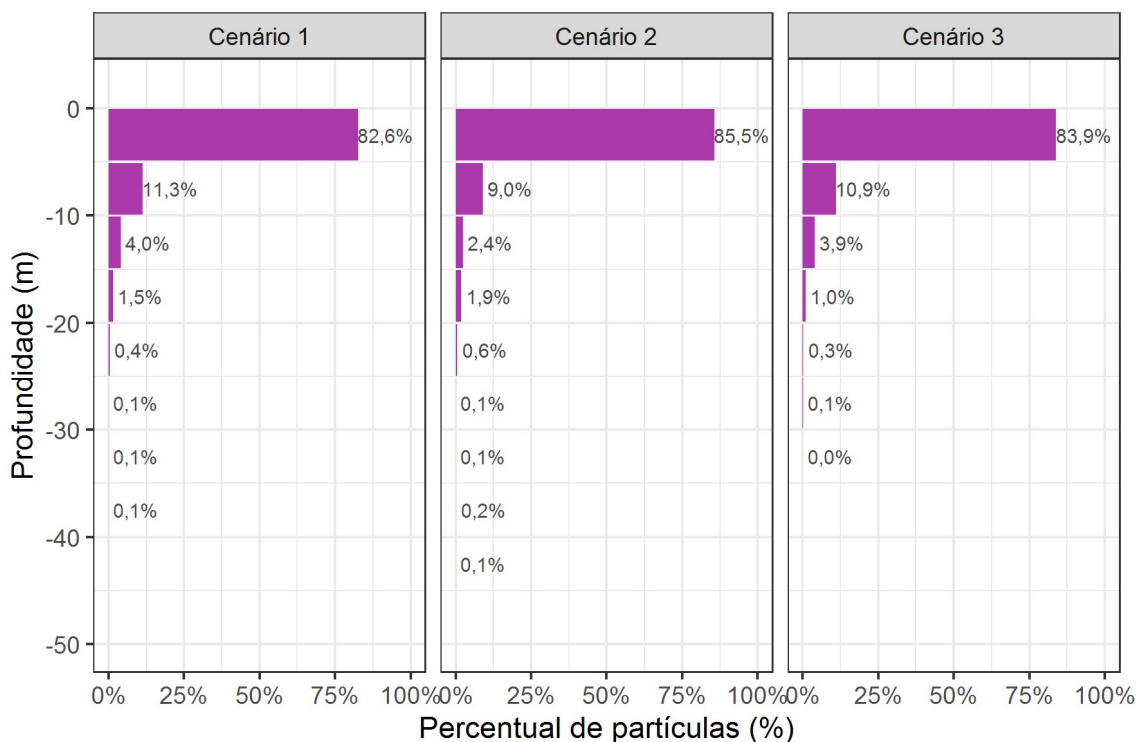


Figura 11.- Percentual de partículas em relação a profundidade

CONCLUSÕES

Foram apresentadas a caracterização hidrodinâmica e as simulações de transporte de troncos por meio do módulo PART do modelo Delft3D. Foi verificado que a maioria das partículas são transportadas em superfície, o que significa que os resultados foram significativos e próximos da realidade observada em campo.

Foram apresentados os cenários operacionais elaborados, sua caracterização hidrodinâmica e as simulações de transporte de troncos por meio do módulo PART. Foi verificado que a operação da UHE Jirau tem efeito significativo na hidrodinâmica e transporte de partículas. Por isso, a esquematização e estudo das diferentes opções de operação se apresenta como uma ferramenta potencial para controle das trajetórias dos troncos. Também foi possível observar que a proporção entre a vazão e o destino das partículas estão na mesma ordem. Por isso se torna importante estudar cenários distintos de operação na UHE Jirau.

Foi verificado que as trajetórias das partículas foram condizentes com a distribuição de vazões. No cenário 3, que apenas a CFME estava em funcionamento, apenas 1% das partículas não chegaram até esse destino. No cenário 2, em que o vertedor de troncos estava em funcionamento junto da CFMD, foi verificado a existência que 4% das partículas ficam no reservatório sem um destino final e 1% das partículas são direcionadas ao vertedouro e mesmo que o vertedor de troncos esteja funcionando com uma vazão de 300m³/s, nenhuma partícula chegou a esse destino. No cenário 1, as duas casas de forças e o vertedor de troncos funcionam com vazões distintas e assim foi observado que 2% dessas partículas foram em direção ao VT.

Portanto, foi possível concluir que o transporte de partículas é amplamente influenciado pelas vazões das estruturas operantes na UHE Jirau e que a simulação se aproxima da realidade observada em campo, com grande parte dos troncos permanecendo próximos à superfície.

AGRADECIMENTOS

Projeto regulamentado pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) e desenvolvido no âmbito do Programa P&D da Jirau Energia, com o título de “Desenvolvimento de metodologia integrada para o monitoramento do transporte de material lenhoso para a concepção de sistema de manejo de troncos submersos - DMIMMAD (06631-0014/2020) ”

Tobias Bleninger agradece ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela bolsa produtividade no. 312211/2020-1, edital 09/2020.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Delft3D-FLOW. (2018). Simulation of multi-dimensional hydrodynamic flows and transport phenomena, including sediments, User Manual Hydro-Morphodynamics, Version: 3.15. **Diálogo Hidroviáveis.** (2019). O Paliteiro do Rio Madeira.

Jirau Energia. (2022). Conheça a Usina. Disponível em < <https://www.jirauenergia.com.br/conheca-a-uhe/>>. Acesso em: 26/04/2022.

LACTEC. (2022). Desenvolvimento de metodologia integrada para o monitoramento do transporte de material lenhoso para a concepção de sistema de manejo de troncos submersos – DMIMMAD, P&D ANEEL (06631-0014/2020)”. Etapa 9: Estudos de Modelagem Hidrodinâmica.

Ruiz-Villanueva, V.; Bladé, E.; Sánchez-Juny, M.; Martí-Cardona, B.; Díez-Herrero, A.; Bodoque, J. M. (2014). Two-dimensional numerical modeling of wood transport. Journal of Hydroinformatics, 16(5), 1077-1096.