



ALTA
RESOLUÇÃO

geofísica e geologia

PROGRAMA DE MONITORAMENTO SISMOLÓGICO DA USINA
HIDROELÉTRICA DE BAIXO IGUAÇU

RELATÓRIO TÉCNICO FINAL



JANEIRO DE 2021



**PROGRAMA DE MONITORAMENTO SISMOLÓGICO DA USINA
HIDROELÉTRICA DE BAIXO IGUAÇU**

RELATÓRIO TÉCNICO FINAL

Sumário

1. INTRODUÇÃO.....	4
2. SISMICIDADE INDUZIDA.....	5
3. OPERAÇÃO DA REDE DAS ESTAÇÕES SISMOGRÁFICAS.....	6
4. RESULTADOS DO MONITORAMENTO	8
4.1 MONITORAMENTO EM 2018 – FASE 1	8
4.2 MONITORAMENTO EM 2019 – FASE 2 e FASE 3.....	8
4.3 MONITORAMENTO EM 2020 – FASE 3.....	10
5. CONCLUSÕES.....	11
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	15
ANEXO – LISTA DE INFORMAÇÕES DOS EVENTOS SÍSMICOS LOCAIS REGISTRADOS DURANTE A FASE PÓS-ENCHIMENTO.....	16

1. INTRODUÇÃO

O presente relatório final tem o objetivo de detalhar todo o processo de monitoramento sísmico da Usina Hidrelétrica (UHE) Baixo Iguaçu, que se refere ao **Programa de Monitoramento Sismológico**, contido no **Programa Ambiental do EIA RIMA (Capítulo 12)**. A área do reservatório abrange o território dos municípios paranaenses de Capanema, Capitão Leônidas Marques, Nova Prata do Iguaçu, Planalto e Realeza.

Três estações (BIPR1, BIPR2 e BIPR3) foram instaladas nas proximidades da barragem entre os anos de 2017 e 2018, com o intuito de monitorar a atividade sísmica local e regional do empreendimento UHE Baixo Iguaçu. Essa sismicidade é classificada de acordo com as distâncias entre o epicentro e a estação mais próxima de cada evento. A sismicidade local (distante em até 100 km) geralmente ocorre devido a movimentos tectônicos (sismicidade natural) ou da atividade antrópica relacionada a detonações com explosivos e aos estresses induzidos devido ao enchimento do reservatório, que podem provocar sismos induzidos. Já a sismicidade regional ocorre distantes em até 100 e 2000 km da estação

Este programa de monitoramento consiste em 2 etapas: Fase 1 de Pré-Enchimento, Fase 2 de Enchimento e Pós-Enchimento do reservatório. No entanto, o estudo sobre a sismicidade local no empreendimento pôde ser analisada e realizada conclusões pertinentes a respeito da segurança e estabilidade da UHE Baixo Iguaçu.

2. SISMICIDADE INDUZIDA

Na década de 1970 diversos pesquisadores (e.g. Gevin 1979) indicaram premissas para a observação de sismos induzidos. A Organização das Nações Unidas para Educação, Ciência e Cultura (Unesco) passou a promover discussões sobre os efeitos da sismicidade induzida em barragens, visando a segurança da população. Os estudos, então, evoluíram no sentido de esclarecer as causas dos fenômenos, enfatizando a geologia e as condições geotécnicas locais dos projetos hidráulicos e hidrelétricos.

O mecanismo dos sismos induzidos consiste da percolação de água a grandes profundidades em planos de fraqueza do maciço rochoso subjacente ao reservatório, submetidos a estados críticos de tensão, ou seja, próximos à ruptura. A massa de água do reservatório representa uma carga adicional que causa um crescimento significativo na tensão elástica, podendo contribuir para acelerar a liberação de energia caso o limite elástico do material rochoso ultrapasse para o rúptil.

De modo geral, o período mais crítico é a fase de enchimento e início do pós-enchimento. Estudos realizados em vários reservatórios têm mostrado o início de alguma atividade sísmica ou mesmo um aumento na sismicidade local durante esta fase de execução. Baecher e Keeney (1982) estimaram uma probabilidade de 10% de ocorrência de sismicidade induzida em reservatórios com barragens maiores que 35 m de altura.

De acordo com Simpson et al. (1988) e Talwani (1997), a Sismicidade Induzida por Reservatório pode ser classificada em duas categorias de acordo com o padrão temporal e espacial.

Para Simpson et al. (1988), as duas categorias podem ser: uma **resposta rápida**, quando a atividade começa após o enchimento, ou em caso de grandes variações no nível de água do reservatório, e desaparece depois de poucos anos; ou uma **resposta lenta**, quando a sismicidade, incluindo o maior evento sísmico,

ocorre vários anos após o enchimento do reservatório, ou seja, após vários ciclos de flutuação do nível de água.

Para Talwani (1997), as duas categorias podem ser: **resposta inicial**, caracterizada pelo início do enchimento ou grandes variações do nível de água (muito observado), de modo que a sismicidade é localizada próximo a periferia do reservatório. O evento de maior magnitude pode ser observado após o enchimento completo do reservatório. O sismo principal, de maior magnitude, também pode demorar de meses ou até mesmo anos para ocorrer após o início do enchimento. Isso pode ocorrer devido às características do reservatório ou até mesmo do local. Outra categoria, é o **estado estável** ou **prolongado** da sismicidade (raramente observado), caracterizado após o efeito da sismicidade inicial ter diminuído, persistindo por muitos anos sem diminuição significativa na frequência e magnitude dos eventos.

3. OPERAÇÃO DA REDE DAS ESTAÇÕES SISMOGRÁFICAS

O monitoramento sismológico da área do empreendimento Hidrelétrico UHE Baixo Iguaçu foi iniciado no dia 29 de outubro de 2017 com a instalação da primeira estação sismográfica denominada BIPR1. A estação consiste de um sismógrafo digital e de um sismômetro triaxial fabricado pela empresa canadense Nanometrics. Este equipamento é classificado com de banda larga, ou seja, trabalha em uma ampla faixa de frequência sendo adequado para registrar sismos locais, regionais e também telessismos.

Entre os dias 17 e 29 de novembro de 2018, foram instaladas duas novas estações sismográficas (BIPR2 e BIPR3), implantando uma rede de monitoramento composta por três estações.

Estação	Fuso	Latitude	Longitude	Altitude
BIPR1	22J	7178442,22 S	235486,62 E	287 m
BIPR2	22J	7177302,41 S	231189,56 E	286 m
BIPR3	22J	7175398,24 S	242180,22 E	-

Tabela 1: Coordenadas das estações operantes na UHE de Baixo Iguaçu. Coordenadas em WGS84.

A partir da Figura 1, é possível identificar a área de localização do empreendimento da UHE e do local de instalação das estações BIPR1, BIPR2 e BIPR3.



Figura 1: Localização da área de estudo e suas respectivas estações (triângulos).

4. RESULTADOS DO MONITORAMENTO

Nesta sessão são apresentados os resultados obtidos durante o monitoramento do empreendimento da UHE Baixo Iguaçu, subdivido em: Fase 1 – Pré Enchimento, Fase 2 – Enchimento e Fase 3 – Pós Enchimento.

4.1 MONITORAMENTO EM 2018 – FASE 1

O monitoramento da Fase 1 – Pré Enchimento foi uma etapa de monitoramento que se fez necessária para contextualizar o nível de atividade sísmica (background) existente antes da existência do reservatório, deste modo, poder acompanhar uma eventual evolução de uma sismicidade no local.

Nesta fase, o entorno do empreendimento foi monitoramento por uma estação sismológica (BIPR1). No transcorrer de treze meses não houve registro de sismos de nenhuma natureza nas proximidades do empreendimento UHE Baixo Iguaçu.

4.2 Síntese do Monitoramento no Ano de 2019 – FASE 2 (1º ano Pós-Enchimento)

O monitoramento das Fase 2 – Enchimento e Pós Enchimento teve como objetivo observar a atividade sísmica sob as novas condicionantes impostas pela presença do reservatório.

Nesse período foram realizados quatro relatórios trimestrais ao longo do primeiro ano pós-enchimento, sendo que, em cada um deles houve um relato das atividades sísmicas registradas especificamente no período compreendido de cada um. Além disso, foram realizados quatro relatórios semestrais abrangendo o intervalo de dois anos pós-enchimento.

No primeiro relatório semestral pós-enchimento a atividade sísmica foi nula, ou seja, continuou idêntica aquela registrada durante os doze meses da fase pré-enchimento.

Contudo os primeiros dias do segundo semestre foi registrado o primeiro evento local e a partir daí, até o final do mês de dezembro, foram registrados outros 43 eventos. Na figura 3 é apresentado um histograma onde estão representados mensalmente o número de eventos sísmicos registrados durante o período.



Figura 3: Histograma referente a quantidade de eventos sísmicos em relação aos meses de ocorrência durante todo o ano de 2019.

Nota-se que no mês de agosto foram registrados 10 eventos, em setembro foi o mês com maior atividade, sendo registrado 13 eventos ao todo e em outubro voltou a ser 10 eventos. No mês de novembro a sismicidade começou a decair, sendo que, no mês de dezembro de 2019 houve apenas um evento.

Para o cálculo da magnitude dos eventos foi empregada a fórmula que leva em consideração o tempo de duração do registro nas estações (conforme explicado nos relatórios semestrais). Os quarenta e quatro eventos caracterizaram por ser de baixa magnitude, variando entre -1.0 e $1.8 m_d$, portanto podem ser classificados como microssísmos, sendo as vibrações provocadas imperceptíveis a algumas centenas de metros do hipocentro.

Em relação a distância, todos os eventos registrados distam entre 15 e 35 km da barragem. Ressalta-se que a localização epicentral ficou restrita uma vez que a maior parte dos eventos foram registrados por uma ou duas estações, geralmente a BIPR1 e BIPR2.

Durante o semestre, mesmo com essa atividade sísmica, não se ouviu relato da população local e nos arredores sobre a ocorrência desses eventos, ratificando que somente equipamentos muito sensíveis como os sismógrafos chegam a detectar as vibrações provocadas pelos microssísmos. Portanto, os eventos podem ser enquadrados com intensidade I na escala de Intensidade de Mercalli Modificada.

4.3 Síntese do Monitoramento no Ano de 2020 – FASE 2 (2º ano Pós-Enchimento)

Na figura 4 é apresentado um histograma onde estão representados mensalmente o número de eventos sísmicos registrados durante todo o ano de 2020. Nota-se que foram observados apenas três eventos, todos eles ocorridos no primeiro semestre de 2020, ou seja, houve uma substancial redução quando comparado ao segundo semestre de 2019, e o mais importante no caso é que, desde maio de 2020, portanto nos últimos sete meses de monitoramento da fase de pós-enchimento nenhum evento sísmico local foi detectado pelas estações.

Os três eventos registrados possuem magnitude entre 1.5 e $1.6 m_d$ e novamente a distância em relação ao barramento está na ordem de 20 a 35 km. Assim como os eventos ocorridos em 2019 não houve qualquer relato da população.

Os eventos devem ser classificados com grau de intensidade I, ou seja, perceptível apenas por equipamentos com alta sensibilidade como sismógrafos.

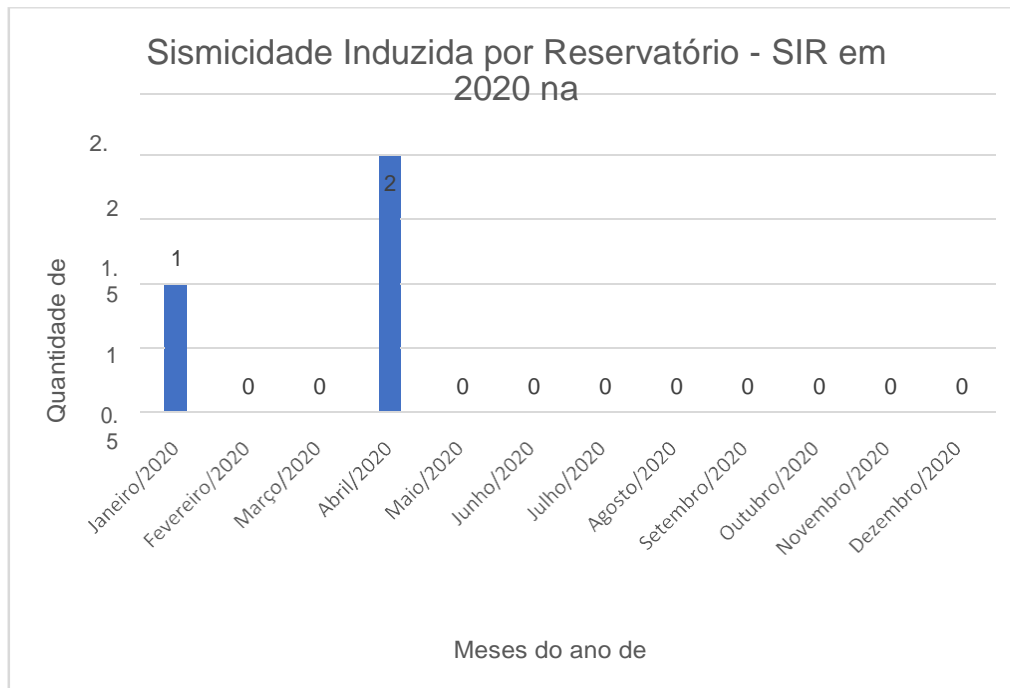


Figura 4: Histograma referente a quantidade de eventos sísmicos em relação aos meses de ocorrência durante todo o ano de 2020.

5. CONCLUSÕES

Esse relatório consiste em uma síntese dos relatórios emitidos durante todo o período de monitoramento sismológico efetuado na área do Empreendimento UHE Baixo Iguaçu, o qual abrange o período entre 01 de novembro de 2017 a 31 de dezembro de 2020, portanto três anos e um mês.

Durante os primeiros treze meses a atividade sísmica no entorno do empreendimento da UHE Baixo Iguaçu foi monitorada diuturnamente por uma estação (BIPR1), compreendendo o período considerado Fase 1 – Pré-enchimento. A partir

de 29 de novembro de 2018, o monitoramento passou a ser executado por uma rede sismográfica consistindo de três estações. Essa rede foi instalada para monitorar as atividades sísmicas da Fase de Enchimento e Pós-enchimento (Fase 2), a qual é sabidamente o período mais crítico em relação à sismicidade induzida

Nos primeiros treze meses de monitoramento sem a existência do lago, pode-se dizer que nenhum sismo local de origem natural foi detectado no entorno do empreendimento. Portanto, o que se notou é que a atividade sísmica local (aproximadamente num raio de 50 km em relação ao barramento, pode ser considerada próximo de nula, obviamente é preciso considerar o curto intervalo de tempo referente ao monitoramento efetivamente executado e mesmo de outras informações advindas de estações sismográficas regionais.

A Fase 2 que compreende o período de Enchimento e Pós Enchimento teve início efetivamente no dia 13 de dezembro de 2018, ou seja na data de fechamento das comportas e início do enchimento do lago, sendo que a cota de operação de 258 m da UHE Baixo Iguaçu foi atingida no dia 18 de dezembro de 2018, apenas cinco dias após o início do enchimento. Portanto, o monitoramento da Fase 2 perdurou, por ora, vinte e quatro meses após o alcance da cota de operação.

Considera-se que o período mais crítico para a ocorrência de sismos induzidos por reservatórios consiste justamente na fase de enchimento e logo após o enchimento do lago, quando os substratos geológicos são submetidos à atuação de novos esforços, sendo um período em que as tensões atuantes estão se rearranjando a fim de encontrar uma nova situação de equilíbrio.

Nesses vinte e quatro meses de monitoramento pode-se dizer que a atividade sísmica seguiu o mesmo comportamento de antes da existência do lago, ou seja, sem atividade sísmica local. Apenas a partir do início do segundo semestre o cenário foram registrados pequenos eventos, sendo o primeiro deles no dia 07 de julho de 2019, portanto no 204º dia após o reservatório ter atingido a sua cota operacional. A atividade sísmica consistiu de 47 microssismos

no período entre julho de 2019 e abril de 2020, sendo o período de maior ocorrência

no mês de setembro de 2019, quando foram registrados 13 eventos. A partir de outubro 2019 a atividade começou a regredir, sendo que no ano de 2020 foram registrados três eventos, sendo um no mês de janeiro e outros dois no mês de abril. Portanto, até a data de fechamento deste relatório já foram transcorridos 297 dias sem qualquer atividade detectada pelas estações. De modo geral, a distância epicentral dos eventos até o barramento distam entre 20 a 30 km, sendo todos eles com magnitude inferior a 1,8 m_d , portanto são classificados como microssísmos.

Uma das causas que pode explicar o início tardio dos eventos sísmicos no entorno da UHE Baixo Iguaçu é que o incremento da pressão que a água exerce sobre o reservatório pode levar meses, ou mesmo anos para avançar distâncias não muito longas, a depender da permeabilidade do solo e das condições de fraturamento das rochas. Porém, quando o incremento de pressão alcança zonas mais fraturadas, a água geralmente é forçada para dentro das rochas, modificando as tensões locais e facilitando o deslocamento de blocos falhados, gerando assim, uma sequência de sismos induzidos. Esse mecanismo além de ser o mais provável para explicar a motivação dos pequenos microssísmos registrados, também faz sentido ao explicar o fato da atividade sísmica ter cessado depois de um determinado tempo. Neste caso, após a energia acumulada ser liberada sob a forma de sismo, o meio tende a se estabilizar sob as novas condicionantes de esforços existentes, conseqüentemente deixando de acontecer novos sismos.

Conceitualmente, a necessidade de continuar o monitoramento a médio-longo prazo através de uma rede de monitoramento depende da ocorrência de sismos locais nas fases durante e pós-enchimento. Isso porque, se houver energia liberada através de sismos nesse período crítico, aumenta-se a probabilidade de ocorrência de novos eventos sísmicos, uma vez que localmente deve existir uma ou mais falhas que foram reativadas e que, conseqüentemente, podem estar acumulando energia até que se dispare um novo surto de sismos. Por outro lado, uma vez que o arranjo de esforços encontra um equilíbrio sem qualquer tipo de ruptura, diminuem as chances de reativação de falhas no entorno do reservatório. Sendo assim, a ocorrência ou não de sismos nos períodos durante e pós-enchimento passa a ser um importante critério técnico para a continuidade ou não do monitoramento através de uma rede de

estações a médio-longo prazo.

Conforme salientado, a probabilidade de ocorrência de eventos induzidos devido à formação do reservatório é cada vez menor com o decorrer do tempo. Portanto, considerando que atividade sísmica registrada no segundo e terceiro trimestre de 2019 como sendo algo pontual, com sismos de pequena magnitude, com vibrações imperceptíveis, com exceção de equipamentos muito sensíveis como sismógrafos, o fato de quase todos eles recaírem a mais de 20 km do barramento e principalmente pelo fato da atividade local ter sido nula nos últimos sete meses, no nosso entendimento considera-se que não seja necessário manter as estações sismográficas locais no entorno do reservatório.

São Paulo, 31 de Janeiro de 2021.



Rayane Teixeira de Brito, Geofísica
Alta Resolução Geofísica e Geologia



Adriano Marchioreto DSc.
Alta Resolução Geofísica e Geologia

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BAECHER, G.B. & KEENEY, R.L., 1982, Estatistical examination of Reservoir-induced seismicity. Bulletin of the Seismological Society of America, Vol 72, nº2 p.553-569.

GEVIN, P. 1979. La seismicite induite par lês lacsreservoirsdanssoncontexte-eologiquedynamiquementconsiderere. Paris (France), Revue Française de Géotechnique, nº7, p.1-8.

GOUGH, D. I. Incremental stress under a two-dimensional artificial lake. Canadian Journal of Earth Sciences, v. 6, n. 5, p. 1067–1075, 1969.

SIMPSON, D.; LEITH, W.; SCHOLZ, C. Two Types of Reservoir-Induced Seismicity. Bulletin of the Seismological Society of America, v. 78, p. 2025–2040, 1988.

TALWANI, P. On the Nature of Reservoir-induced SeismicityPure and Applied Geophysics, p 473-492, 1997.

ANEXO – LISTA DE INFORMAÇÕES DOS EVENTOS SÍSMICOS LOCAIS REGISTRADOS DURANTE A FASE PÓS-ENCHIMENTO

Evento	Data	Horário (UTC)	Magnitude (m_d)	Tipo de evento	Distância epicentral (km)
1	07-07-2019	02:34	1.26	SIR	25-30
2	19-07-2019	12:09	0.29	SIR	20-25
3	20-07-2019	02:37	1.65	SIR	30-35
4	21-07-2019	02:57	1.50	SIR	25-30
5	26-07-2019	15:59	1.52	SIR	25-30
6	02-08-2019	03:20	1.52	SIR	25-30
7	05-08-2019	00:59	1.19	SIR	25-30
8	11-08-2019	09:45	1.55	SIR	25-30
9	22-08-2019	18:42	1.38	SIR	25-30
10	23-08-2019	13:02	1.57	SIR	30-35
11	24-08-2019	16:22	1.26	SIR	25-30
12	25-08-2019	02:39	1.24	SIR	25-30
13	25-08-2019	18:45	0.99	SIR	20-35
14	27-08-2019	09:38	1.16	SIR	25-30
15	28-08-2019	18:56	0.17	SIR	25-30
16	08-09-2019	05:19	1.50	SIR	25-30
17	12-09-2019	03:16	1.32	SIR	25-30
18	13-09-2019	15:06	0.29	SIR	15-20
19	15-09-2019	02:30	1.52	SIR	25-30
20	16-09-2019	21:45	1.41	SIR	25-30
21	16-09-2019	23:00	1.22	SIR	25-30
22	16-09-2019	23:37	1.35	SIR	25-30
23	20-09-2019	18:11	1.74	SIR	30-35
24	24-09-2019	14:31	-0.11	SIR	10-15
25	25-09-2019	02:29	1.62	SIR	25-30
26	25-09-2019	12:31	1.44	SIR	25-30
27	26-09-2019	02:36	1.41	SIR	25-30
28	26-09-2019	03:32	1.01	SIR	25-30
29	01-10-2019	02:04	1.08	SIR	25-30
30	04-10-2019	02:14	1.55	SIR	30-35
31	05-10-2019	04:46	1.40	SIR	25-30
32	06-10-2019	14:13	1.82	SIR	30-35

33	08-10-2019	02:36	1.59	SIR	25-30
34	09-10-2019	02:13	1.65	SIR	25-30
35	10-10-2019	01:54	1.60	SIR	30-35
36	13-10-2019	17:48	1.60	SIR	30-35
37	15-10-2019	03:24	1.55	SIR	30-35
38	31-10-2019	00:31	1.78	SIR	30-35
39	05-11-2019	04:58	1.57	SIR	30-35
40	05-11-2019	15:01	-0.07	SIR	20-25
41	16-11-2019	14:29	1.85	SIR	30-35
42	16-11-2019	16:54	1.40	SIR	25-30
43	16-11-2019	21:04	1.85	SIR	30-35
44	12-12-2019	20:39	-1.05	SIR	20-25
45	04-01-2020	02:28	1.52	SIR	30-35
46	08-04-2020	20:04	1.57	SIR	30-35
47	18-04-2020	20:42	1.52	SIR	30-35