



Projeto de Consultoria:

**“Assessoria Para Estudo Sobre Escassez Hídrica Conjuntural
no Reservatório da UHE Itupararanga”**

Preparado para:

Votorantim Energia

Relatório Técnico Consolidado

Documento	Data	Versão	Elaborado por	Revisado por
PROPOSTA_20210602_UHE_ITUPARARANGA_V1	15/06/2021	1.0	MHB	DSR

São Paulo, 15 de junho de 2021.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
2	SIMULAÇÃO DO RESERVATÓRIO	2
2.1	HISTÓRICO DE VAZÕES	2
2.2	MODELAGEM HIDRÁULICA	3
2.3	ESTUDO 1 – SIMULAÇÕES DA MLT	5
2.4	ESTUDO 2 – SIMULAÇÕES SEMELHANÇA HISTÓRICA	6
2.5	ESTUDO 3 – SIMULAÇÕES HISTÓRICA	12
2.6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	13

1 Introdução

A usina hidrelétrica Itupararanga possui um reservatório de volume máximo de 256,87 hm³ e volume mínimo 94,68 hm³; a vazão afluente ao reservatório tem média histórica de 12,4 m³/s, e nos meses de abril e maio de 2021 as vazões afluentes verificadas foram de 6,4 m³/s e 4,6 m³/s, respectivamente. São restrições na operação do reservatório: manter um desvio de vazão de 2,15 m³/s, destinados à captação de água pelo SAAE (Serviço Autônomo de Água e Esgoto), para atendimento ao abastecimento público, e manutenção de 6 m³/s defluentes para atendimento à vazão sanitária do rio.

Em consequência da baixa afluência e das restrições de vazão, captada e defluída, verificadas neste período, o reservatório está em deplecionamento, sendo que, nesse contexto, o trabalho em questão analisa estatisticamente a gravidade do deplecionamento em função de cenários hidrológicos futuros.

2 Simulação do Reservatório

2.1 Histórico de Vazões

Para realização dos estudos foram levantados junto à VE os dados históricos de vazão. O histórico de vazão considerado abrange o período de junho de 1914 até maio de 2021 (Figura 2-1).

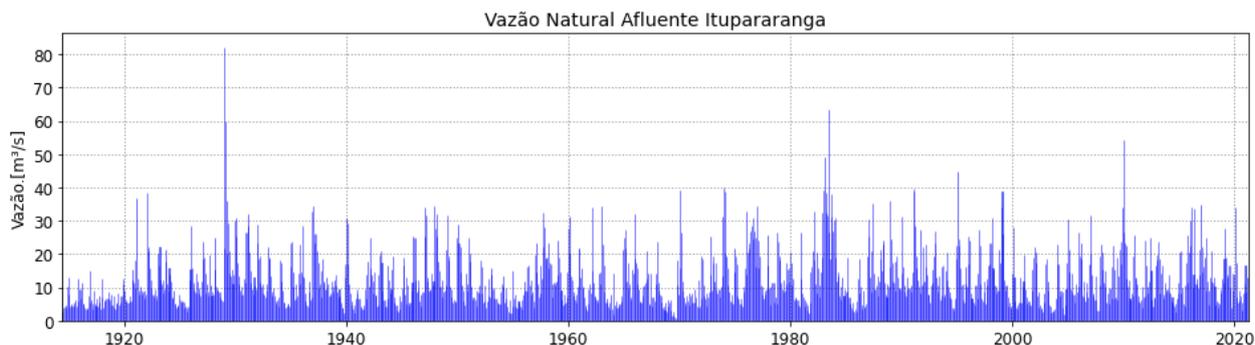


Figura 2-1 – Vazões naturais afluentes à UHE Itupararanga

A vazão natural da UHE Itupararanga tem uma média de 12,2 m³/s no período. Na Figura 2-2 pode-se verificar que os meses de junho, janeiro e fevereiro apresentaram os maiores valores do histórico. Não obstante, descartando as 10% melhores ocorrências em cada mês (linha amarela pontilhada superior) fica evidente o período úmido de dezembro a março.

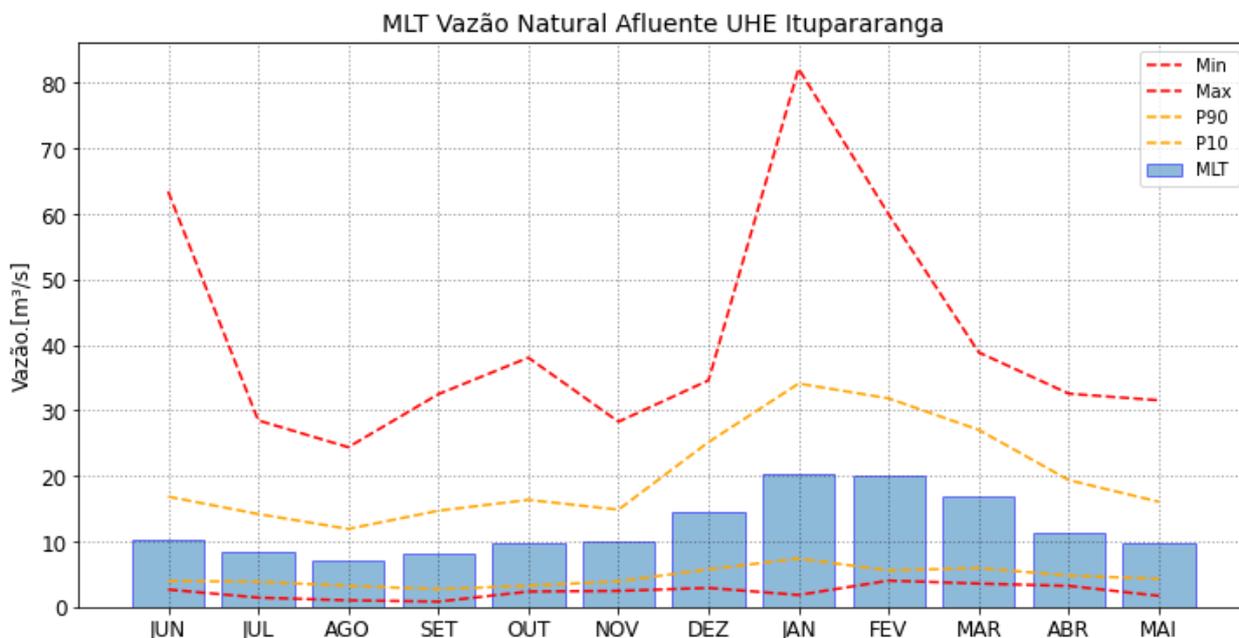


Figura 2-2 – Média de longo termo por mês

No histórico foi verificado o valor mínimo de vazão de 0,81 m³/s, correspondendo a apenas 6% da média em todo período.

Na Figura 2-3 é possível verificar o histograma da vazão natural afluyente da usina, onde também se verifica que a vazão média é 5 vezes menor que a vazão máxima verificada.

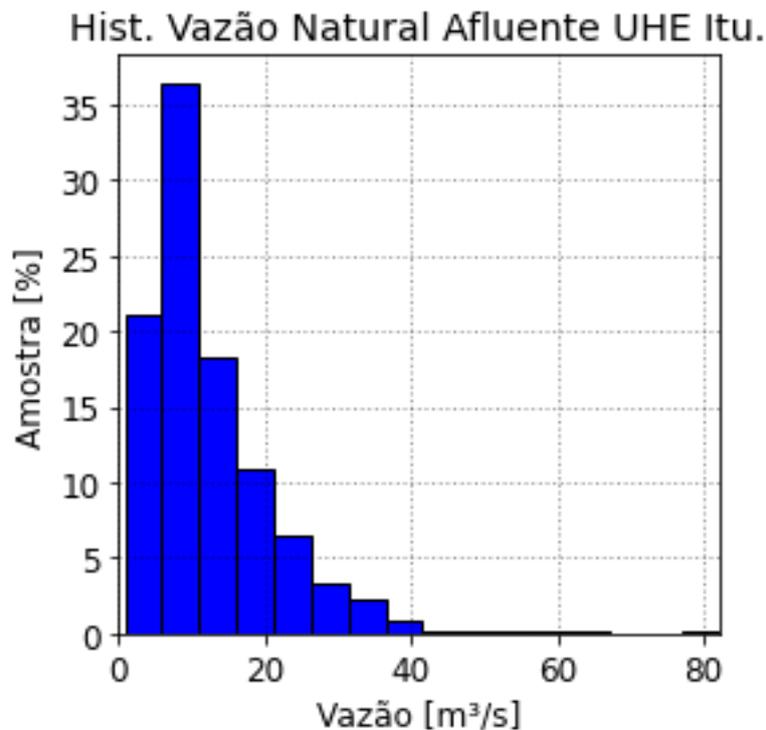


Figura 2-3 – Histograma vazão natural

2.2 Modelagem Hidráulica

O presente estudo utilizou o equacionamento do balanço hídrico do reservatório em níveis médios mensais de modo a quantificar o potencial impacto de baixas vazões afluentes.

As simulações se basearam nas condições de contorno de volumes máximos e mínimos do reservatório, assim como na premissa de que as vazões defluente e captada são fixas até que os limites de armazenamento, inferior ou superior, sejam atingidos.

- Data de Início da Simulação: 1/6/2021
- Duração da Simulação: 12 meses
- Volume Máximo: 256,9 hm³ (Cota 825,0 m)
- Volume Mínimo: 38,10 hm³ (Cota 813,5 m)
- Volume Inicial: 145,38 hm³ (Cota 820,3 m)

Estudo Sobre Escassez Hídrica Conjuntural no Reservatório da UHE Itupararanga

- Vazão Retirada SAAE: 2,15 m³/s
- Vazão Defluente: 6,00 m³/s

Os polinômios característicos do reservatório estão mostrados na Tabela 2-1.

Tabela 2-1 - Polinômios

	Pol. Cota Volume	Pol. Cota Área	Pol. Nível Jusante
Coef1	8,097880253E+02	-9,159470035E+05	6,035731555E+02
Coef2	1,120406409E-01	0,000000000E+00	4,650845573E-02
Coef3	-4,334980238E-04	8,199666683E+00	-4,647373733E-04
Coef4	1,355317789E-06	-1,335620805E-02	4,205046370E-06
Coef5	-1,828187467E-09	6,119362431E-06	-1,486629192E-08

A definição do volume final de cada mês é dada por:

$$Cfim_m = PPCV1 + PPCV2 * Vfim_m + PPCV3 * Vfim_m^2 + PPCV4 * Vfim_m^3 + PPCV5 * Vfim_m^4$$

$$Vfim_m = \begin{cases} se (Vini_m + \Delta V) > V_{max}, V_{max} \\ se (Vini_m + \Delta V) < V_{min}, V_{min} \\ Se não Vini_m + \Delta V \end{cases}$$

$$\Delta V = (Q_{aflu} - Q_{deflu} - Q_{ret}) * Horas_m * 0,00360 - V_{evap_m}$$

$$V_{evap_m} = (PPCA1 + PPCA2 * Cini_m + PPCA3 * Cini_m^2 + PPCA4 * Cini_m^3 + PPCA5 * Cini_m^4) * COEFEVAP_m * 0,001$$

Onde:

m: Mês referente ao período simulado.

Cfim_m: Cota do reservatório no final do mês *m*.

PPCVX: Coeficientes do polinômio cota volume.

Vfim_m: Volume final do reservatório ao final do mês.

V_{max}: Volume máximo do reservatório.

V_{min}: Volume mínimo do reservatório.

Q_{aflu}: Vazão afluyente.

Q_{deflu}: Vazão defluente.

Q_{ret}: Vazão retirada pelo SAAE.

Estudo Sobre Escassez Hídrica Conjuntural no Reservatório da UHE Itupararanga

$V_{evap\ m}$: Volume evaporado por mês.

$PPCAX$: Coeficientes do polinômio cota área.

$Cini_m$: Cota do reservatório no início do mês m .

$COEFEVAP_m$: Coeficiente de evaporação por mês.

Para fazer o acoplamento temporal da simulação o volume no fim do mês m é igualado ao volume do reservatório no mês seguinte ($m + 1$).

$$Vini_{m+1} = Vfim_m$$

2.3 Estudo 1 – Simulações da MLT

A Média de Longo Termo (MLT) é comumente utilizada como referência nas projeções de vazão para as bacias do SIN. Este estudo não tem como objetivo prever cenários futuros de vazão, mas sim quantificar o impacto de cenários adversos, caso ocorram.

Com isso, a simulação do balanço hidráulico do reservatório da UHE Itupararanga foi feita considerando 10 cenários percentuais da MLT. Os resultados das simulações são apresentados na Figura 2-4 e Tabela 2-2.

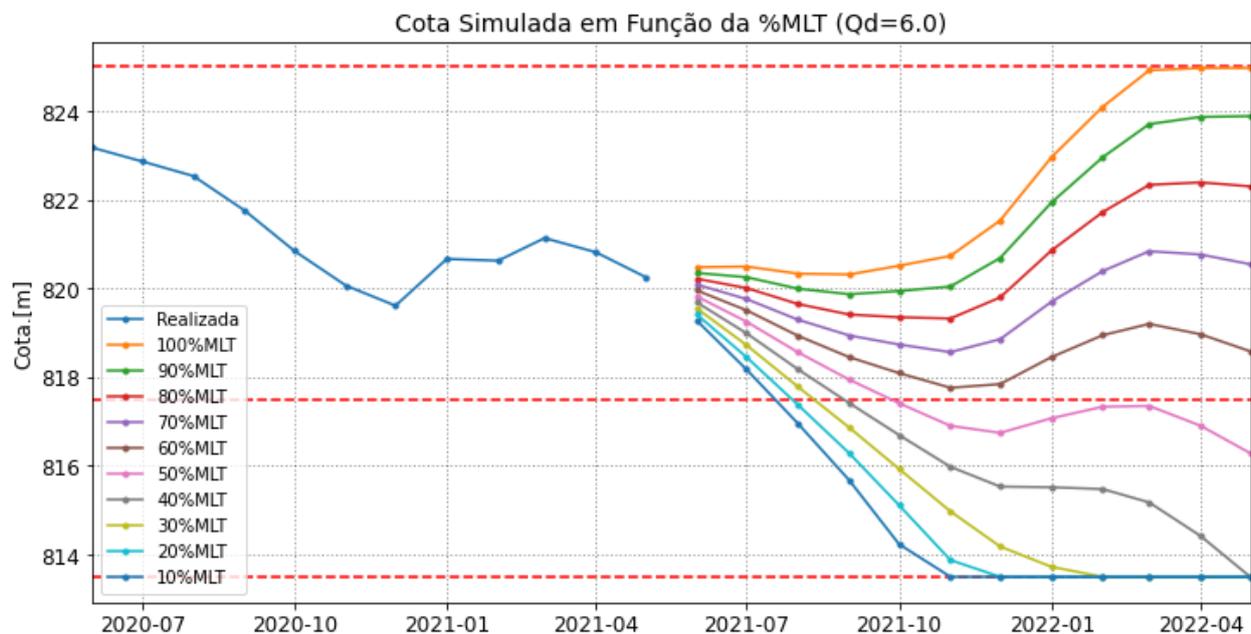


Figura 2-4 – Resultados da simulação MLT Qd=6,0 m³/s

Tabela 2-2 - Resultados da simulação MLT Qd=6,0 m³/s

Cenário	Quanto atinge cota 817,5	Quanto atinge cota 813,5
60 % da MLT	Não atinge	Não atinge
50 % da MLT	Out/2021	Não atinge
40 % da MLT	Set/2021	Mai/2022
30 % da MLT	Set/2021	Fev/2022
20 % da MLT	Ago/2021	Dez/2021

As simulações considerando percentuais da MLT para os próximos 12 meses e vazão defluente de 6 m³/s demonstram que expectativas de vazões de 50% da MLT ou menor podem fazer com que o reservatório opere abaixo da cota 817,5 m.s.n.m se a vazão defluente de 6 m³/s e a capitação de 2,15 m³/s forem mantidas até outubro.

Também se verifica que projeções de vazões de 40% da MLT ou menor para os próximos 12 meses podem deplecionar o reservatório para a cota de 813,5 m.s.n.m.

2.4 Estudo 2 – Simulações utilizando Semelhança Histórica

A análise por semelhança consiste na busca de séries históricas que tenham alguma relação com o passado recente. A busca por séries semelhantes toma como base o índice de semelhança definido como:

$$\text{índice de semelhança} = \sqrt{\sum_{M=m-1}^{m-12} (Real_M - Hist_M)^2}$$

Esse índice é composto pela distância geométrica das séries de vazões afluentes passadas em relação às séries realizadas dos últimos meses. Para o estudo em questão foram considerados 3 comprimentos da série de vazões afluentes realizadas para definição do índice, sendo 12, 6 e 3 meses.

Na Figura 2-5 apresenta-se um exemplo da busca por séries semelhantes no histórico. A curva em preto representa o passado recente (M-1 até M-12) da vazão afluente do reservatório. Para a definição do índice de semelhança da curva azul, calcula-se a distância geométrica dela em relação à curva preta. De forma análoga, o índice da curva vermelha em relação à curva preta também é calculado. A curva que apresentar o menor índice é considerada mais semelhante à curva preta. Definida a curva mais semelhante, considera-se como cenário futuro possível o prolongamento dela, isto é, a continuação da série (meses M0 até M12). Esse prolongamento é definido como possível cenário de projeção para simulação.

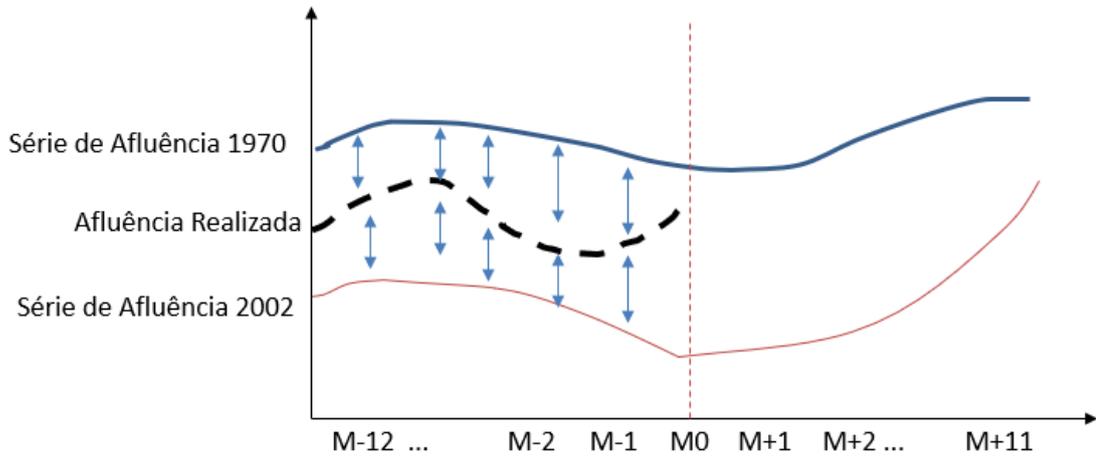


Figura 2-5 – Exemplo de cálculo de semelhança

A análise por semelhança, assim como a definição de cenários por MLT não tem como objetivo prever a expectativa de vazões dos próximos meses, mas busca encontrar um conjunto de cenários com correlação histórica. Neste estudo foram apresentados 12 cenários de vazão, sendo 4 por métrica de semelhança.

- Semelhança considerando 12 meses

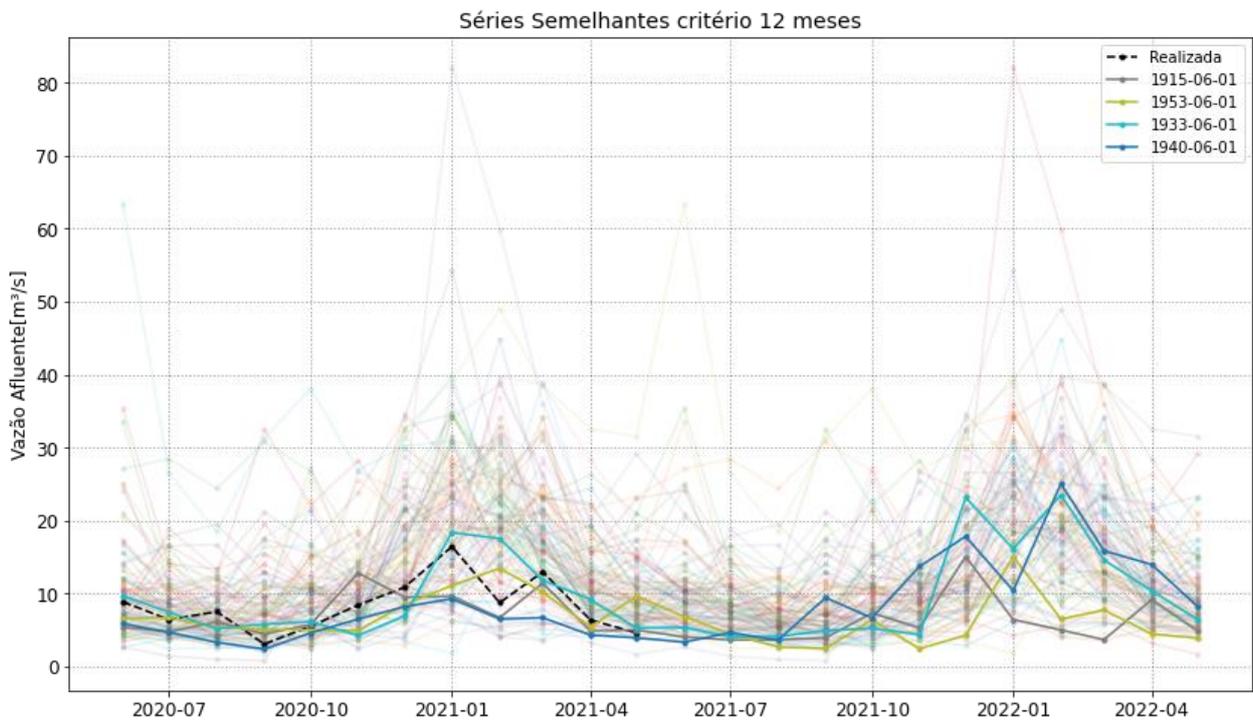


Figura 2-6 – Séries Semelhantes critério 12 meses

As séries “primas” encontradas para o critério de 12 meses foram: 1915, 1953, 1933 e 1940, sendo a ordenação da mais semelhante para a menos semelhante. A projeção é feita com o prolongamento das séries selecionadas (Figura 2-6).

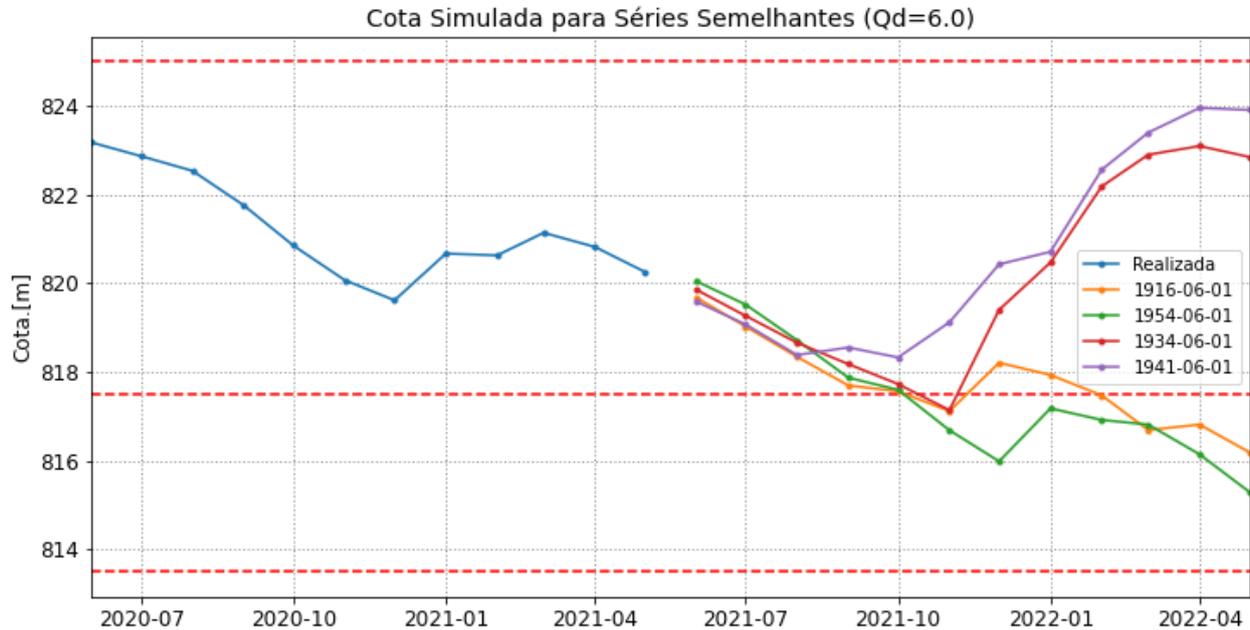


Figura 2-7 – Simulação Séries Semelhantes Qd=6.0 (critério 12 meses)

Nenhuma das séries semelhantes simuladas (Figura 2-7) chegou próximo à cota de 813,5 m.s.n.m, porém as 3 mais semelhantes tiveram valores próximos à cota de 817,5 m.s.n.m para o mês de outubro, e inferior a este valor para o mês de novembro.

- Semelhança considerando 6 meses

Estudo Sobre Escassez Hídrica Conjuntural no Reservatório da UHE Itupararanga

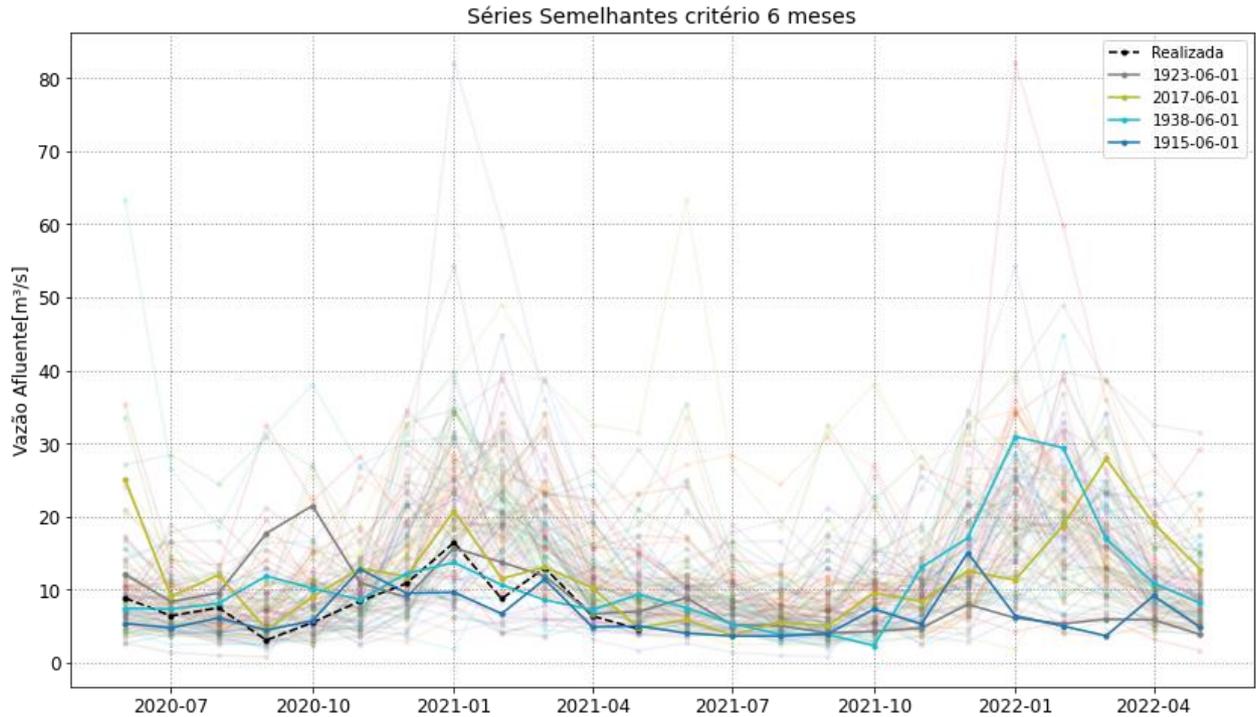


Figura 2-8 – Séries Semelhantes critério 6 meses

As séries “primas” encontradas para o critério de 6 meses foram: 1923, 2017, 1938 e 1915 da mais semelhante para a menos semelhante. A projeção é feita com o prolongamento das séries selecionadas.

Nenhuma das séries semelhantes chegou próximo à cota de 813,5 m.s.n.m, porém 2 das séries semelhantes tiveram valores inferiores a 817,5 ms.n.m.

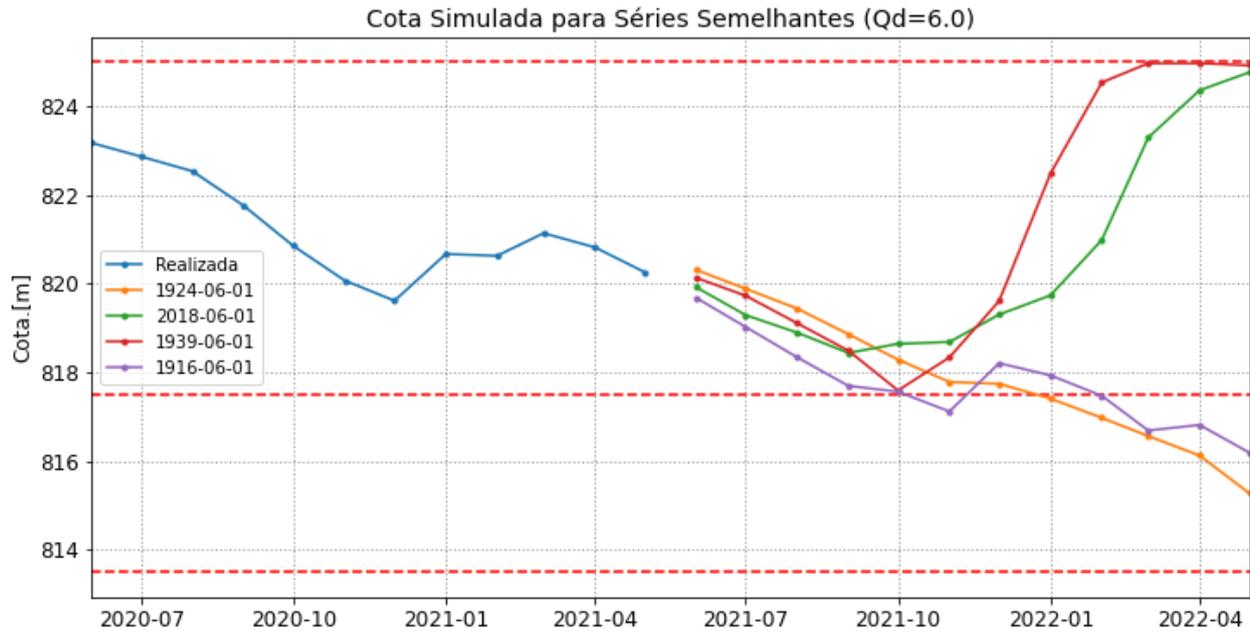


Figura 2-9 – Simulação Séries Semelhantes Qd=6.0 (critério 6 meses)

- Semelhança considerando 3 meses

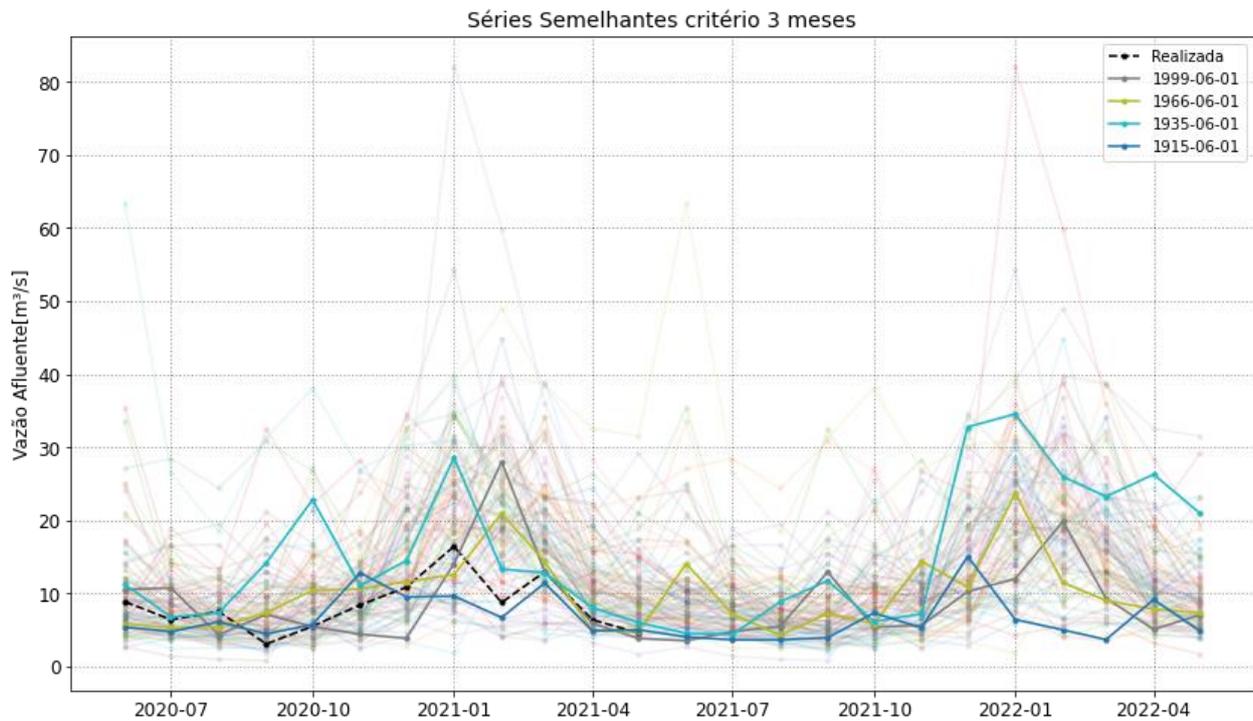


Figura 2-10 – Séries Semelhantes critério 3 meses

As séries “primas” encontradas para o critério de 3 meses foram: 1999, 1966, 1935 e 1915, ordenando-se da mais semelhante para a menos semelhante. A projeção é feita com o prolongamento das séries selecionadas.

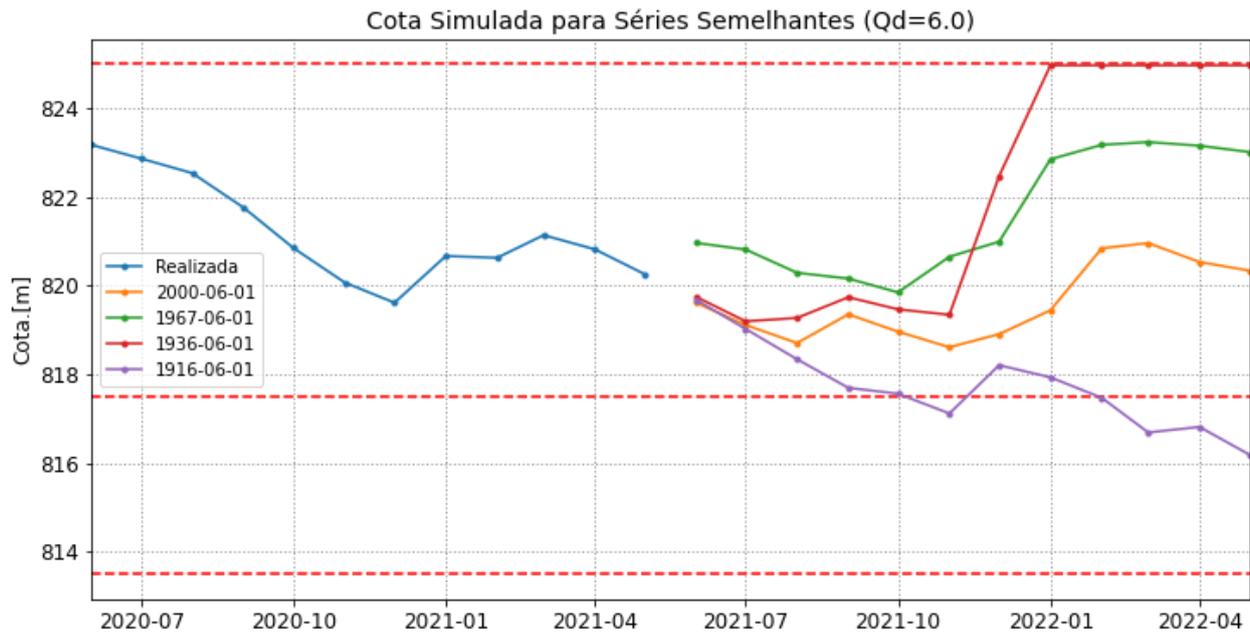


Figura 2-11 – Simulação Séries Semelhantes Qd=6.0 (critério 6 meses)

Apenas uma das séries semelhantes obteve valores de cotas inferiores a 817,5 ms.n.m.

• MLT das Séries Semelhantes

As séries semelhantes indicam cenários futuros entre 50% e 60% da MLT para os próximos 3 meses. Alertando para o risco de uma operação em cotas inferiores a 817,5 ms.n.m.

Tabela 2-3 – MLT das Séries Semelhantes

		Séries Semelhantes comparadas a MLT (Vazão Afluente/MLT)											
		jun/21	jul/21	ago/21	set/21	out/21	nov/21	dez/21	jan/22	fev/22	mar/22	abr/22	mai/22
12m	jun/1916	40%	43%	52%	49%	76%	54%	103%	32%	25%	22%	81%	50%
	jun/1954	67%	53%	38%	31%	67%	25%	29%	74%	33%	46%	40%	40%
	jun/1934	53%	48%	58%	61%	55%	44%	159%	79%	118%	86%	92%	66%
	jun/1941	33%	55%	51%	116%	69%	139%	122%	51%	126%	94%	123%	84%
	Média	48%	50%	50%	64%	67%	65%	103%	59%	75%	62%	84%	60%
6m	jun/1924	87%	61%	71%	50%	44%	48%	55%	30%	27%	35%	52%	40%
	jun/2018	57%	45%	78%	62%	99%	85%	86%	56%	94%	165%	168%	131%
	jun/1939	73%	63%	55%	48%	24%	132%	117%	152%	148%	100%	96%	83%
	jun/1916	40%	43%	52%	49%	76%	54%	103%	32%	25%	22%	81%	50%
	Média	64%	53%	64%	52%	61%	80%	90%	68%	73%	80%	99%	76%
3m	jun/2000	35%	56%	77%	159%	56%	57%	70%	59%	100%	55%	45%	72%
	jun/1967	138%	85%	61%	89%	61%	146%	75%	117%	58%	53%	69%	75%
	jun/1936	44%	52%	125%	144%	64%	73%	224%	170%	130%	137%	232%	215%
	jun/1916	40%	43%	52%	49%	76%	54%	103%	32%	25%	22%	81%	50%
	Média	64%	59%	79%	110%	64%	82%	118%	94%	78%	67%	107%	103%

A série projetada iniciando em junho de 1916 (semelhança de jun/1915) foi selecionada independentemente do critério de semelhança utilizado, indicando a sua alta relação com a situação atual.

2.5 Estudo 3 – Simulações Histórica

A utilização de séries semelhantes para identificar momentos históricos com alguma correlação à atualidade é um ótimo direcionamento, contudo uma análise completa do histórico, mesmo que de maneira agregada, não se faz menos importante.

Nesta seção foram simulados todos os períodos de 12 meses, de junho a maio, contidos na série histórica de vazão da UHE Itupararanga.

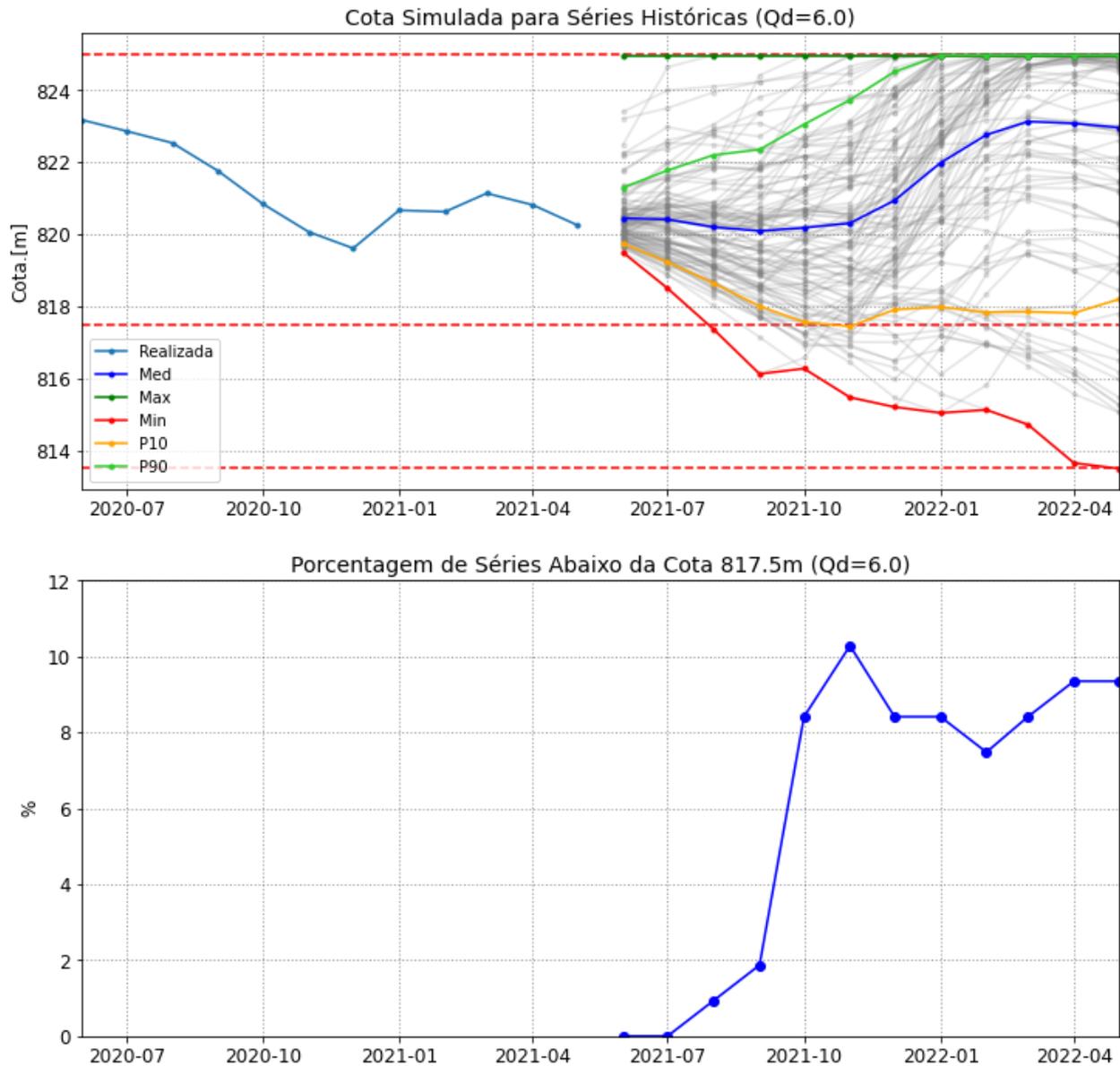


Figura 2-12 – Simulação do histórico e porcentagem de cenários na cota 817.5 (Qd=6,0)

No primeiro gráfico da Figura 2-12 pode-se constatar que apenas uma das séries verificadas no histórico acarretaria uma operação onde o nível do reservatório chegaria a 813,5 ms.n.m, sendo que este nível pode ser alcançado em maio de 2022.

No segundo gráfico, Figura 2-12, é apresentada a proporção de séries históricas que implicariam em operação com reservatório inferior a 817,5 m.s.n.m. Este número é de 1 a 2% em agosto e setembro e passa a valores superiores a 8% das séries simuladas de outubro em diante. Se as séries verificadas no histórico forem consideradas equiprováveis (desvinculando-as com o passado recente, ou seja, desconsiderando-se a tendência hidrológica) esta porcentagem representa a probabilidade do reservatório operar abaixo de 817,5 m.s.n.m.

2.6 Considerações Finais

A simulação considerando projeção perceptual da MLT mostrou que valores de precipitação iguais a 50% para os próximos meses podem acarretar o deplecionamento do reservatório a valores inferiores a 817,5 m.s.n.m em outubro de 2021 se a vazão defluente mínima e/ou retirada (SAAE) não forem flexibilizadas.

A Redução da vazão defluente mínima de 6 m³/s já em junho pode ajudar na manutenção do nível do reservatório. A quantificação da redução da vazão mínima defluente pode ser tangibilizada em estudos futuros.

A análise de séries por semelhança indicou séries com perspectivas de vazões baixas para os próximos meses, entre 50% e 60% da MLT. Das 12 séries selecionadas apenas 1 delas teve uma projeção de vazão acima de 100% da MLT, todas as demais têm perspectivas menos favoráveis.

A série projetada iniciando em junho de 1916 (semelhança de junho de 1915) foi selecionada independentemente do critério de semelhança utilizado, indicando a sua alta relação com a situação atual. Essa série tem projeções próximas a 40% para os meses de junho e julho. Apesar dessa projeção baixa, a série desperta um alerta por apresentar um período úmido em janeiro, fevereiro e março de 2022 com valores próximos à 30% da MLT. Neste caso orienta-se a manter o supervisionamento da evolução dos níveis do reservatório para que esses valores críticos possam ser mitigados.

Ao se analisar todo o histórico, de forma equiprovável, constata-se que a probabilidade de uma operação em cotas inferiores a 817,5 m.s.n.m tem valores baixos em junho e julho, passando a 1% e 2% em agosto e setembro respectivamente, subindo para valores em torno de 9% de outubro em diante. Também se nota que considerando o histórico, apenas uma série atingiu níveis próximos a 813,5 m.s.n.m em abril de 2022.