

**MODELAGEM E SIMULAÇÃO DO PROCESSO DE PRODUÇÃO DE REFRIGERANTES POR MEIO DE SIMULAÇÃO DE EVENTOS DISCRETOS COM FOCO NA GESTÃO DE EFLUENTES**

**MODELING AND SIMULATION OF THE SOFT DRINK PRODUCTION PROCESS BY MEANS OF DISCRETE EVENTS SIMULATION WITH A FOCUS ON EFFLUENT MANAGEMENT**

**MODELADO Y SIMULACIÓN DEL PROCESO DE PRODUCCIÓN DE REFRESCOS MEDIANTE SIMULACIÓN DE EVENTOS DISCRETOS CON ENFOQUE EN LA GESTIÓN DE EFLUENTES**

Emerson Avelhaneda Geanezi  
Pós graduação em Engenharia da Manutenção, MBA em Gestão Empresarial  
<https://orcid.org/0000-0003-4603-2457>

Gisele Tessari Santos  
Professora do curso de Engenharia de Produção e Administração do Ibmecc-BH - Instituto Brasileiro de Mercado de Capitais  
<https://orcid.org/0000-0002-8768-1464>

Editor Científico: José Edson Lara  
Organização Comitê Científico  
Double Blind Review pelo SEER/OJS  
Recebido em 31/07/2021  
Aprovado em 14/12/2022

This work is licensed under a Creative Commons Attribution – Non-Commercial 3.0 Brazil

## Resumo

**Objetivo:** Modelar e simular os processos de produção de refrigerantes com foco na geração de efluentes analisando como as principais variáveis do processo podem impactar no volume e disponibilidade da linha de produção.

**Metodologia/abordagem:** Desenvolveu-se um modelo de simulação de eventos discretos a fim de simular diferentes cenários e analisar o processo de produção de refrigerantes, especificamente. O modelo foi implementado no software AnyLogic® combinando as bibliotecas de *process modeling* e *fluid*.

**Originalidade/relevância:** O tratamento de efluentes é uma das prioridades da maioria das indústrias de refrigerantes em função do elevado grau de complexidade da composição dos efluentes gerados nessas indústrias. O trabalho contribui com a literatura de gestão de processos demonstrando a eficiência da modelagem e simulação para análise de processos no contexto específico das indústrias de refrigerantes e gestão de efluentes nessas indústrias.

**Principais resultados:** A partir da análise de resultados, comprovou-se que é necessária uma gestão de efluentes eficiente nesse tipo de indústria, já que as variações de parâmetros importantes, como a demanda química de oxigênio e a vazão, impactam diretamente no volume produzido e na disponibilidade da linha de produção, podendo causar um colapso no sistema de tratamento de efluentes e impactar o meio ambiente.

**Contribuições teóricas/metodológicas:** A simulação por eventos discretos tem como filosofia a aleatoriedade. O presente trabalho destacou o uso dessa metodologia para análise do impacto da aleatoriedade em sistemas com alto nível de detalhe dos processos.

**Palavras-chave:** Simulação de eventos discretos. Gestão de processos. Tratamento de efluentes. Indústria de bebidas e refrigerantes.

## Abstract

**Objective:** Model and simulate the production processes of soft drinks with a focus on the generation of effluents and analyze how the main variables of the process can impact the volume and availability of the production line.

**Methodology / approach:** A discrete event simulation model was developed to simulate different scenarios and analyze the soft drink production process, specifically. The model was implemented in the AnyLogic® software combining the process modeling and fluid libraries.

**Originality / relevance:** Effluent treatment is one of the priorities of most soft drink industries due to the high degree of complexity in the composition of the effluents generated in these industries. The work contributes to the process management literature demonstrating the efficiency of modeling and simulation for analysis of processes in the specific context of the soft drink industries and effluent management in these industries.

**Main results:** Based on the analysis of the results, it was proved that efficient effluent management is necessary for this type of industry, since the variations of important parameters, such as chemical oxygen demand and flow, directly impact the volume produced and the

availability of the production line, which may cause a collapse in the effluent treatment system and impact the environment.

**Theoretical / methodological contributions:** The simulation by discrete events has a philosophy of randomness. The present work highlighted the use of this methodology to analyze the impact of randomness in systems with a high level of process detail.

**Keywords:** Discrete events simulation. Processes management. Wastewater treatment. Beverage and soft drink industry.

## Resumen

**Objetivo:** Modelar y simular los procesos de producción de refrescos con enfoque en la generación de efluentes y analizar cómo las principales variables del proceso pueden impactar el volumen y disponibilidad de la línea de producción.

**Metodología / enfoque:** Se desarrolló un modelo de simulación de eventos discretos con el fin de simular diferentes escenarios y analizar el proceso de producción de refrescos, específicamente. El modelo se implementó en el software AnyLogic® combinando el modelado de procesos y las bibliotecas de fluidos.

**Originalidad / relevancia:** El tratamiento de efluentes es una de las prioridades de la mayoría de las industrias de refrescos debido al alto grado de complejidad en la composición de los efluentes generados en estas industrias. El trabajo contribuye a la literatura de gestión de procesos que demuestra la eficiencia del modelado y la simulación para el análisis de procesos en el contexto específico de las industrias de refrescos y la gestión de efluentes en estas industrias.

**Principales resultados:** Con base en el análisis de resultados, se comprobó que la gestión eficiente de los efluentes es necesaria en este tipo de industria, ya que las variaciones de parámetros importantes, como la demanda y el flujo de oxígeno químico, impactan directamente en el volumen producido y en la disponibilidad de la línea de producción, que puede causar un colapso en el sistema de tratamiento de efluentes e impactar el medio ambiente.

**Aportes teóricos / metodológicos:** La simulación por eventos discretos tiene una filosofía de aleatoriedad. El presente trabajo destacó el uso de esta metodología para analizar el impacto de la aleatoriedad en sistemas con un alto nivel de detalle de procesos.

**Palabras clave:** Simulación de eventos discretos. Gestión de procesos. Tratamiento de aguas residuales. Industria de bebidas y refrescos.

## 1 INTRODUÇÃO

Com mais de 147 fábricas e gerando mais de 1,6 milhão de empregos diretos e indiretos, segundo a Associação Brasileira das Indústrias de Refrigerantes e de Bebidas não Alcoólicas (ABIR), em 2017, o Brasil produziu mais de 30 bilhões de litros de bebidas não alcoólicas,

sendo que mais de 12 bilhões de litros correspondiam apenas a refrigerantes, contabilizando um consumo per capita de 61,82 litros por habitante por ano (ABIR, 2019).

Nos últimos anos, o setor vem ampliando seu portfólio, migrando para a produção de outros produtos além do refrigerante, como chás prontos, isotônicos e sucos, acompanhando, assim, o movimento da economia e da transformação de consumo (ABIR, 2019).

De acordo com Ramos e Ferreira (2017), o processo de fabricação de bebidas não alcoólicas, de forma geral, envolve os processos de preparo de matéria-prima em tanques, finalização da base de bebidas, envase, embalagem e estoque. E esses processos são caracterizados por dois estágios bem definidos, o preparo e o envase de bebidas, que são dependentes e devem ser sincronizados.

Em geral, o planejamento de produção e dimensionamento de lotes é feito para atender uma demanda preestabelecida, mas também são comuns demandas urgentes. A diversidade de produtos oferecidos aos consumidores, a escala de plantas e a complexidade das modernas linhas de envase requerem a adoção de programas que tenham por base otimização para gerar planos de produção eficientes (Ferreira, Morabito, & Rangel, 2009).

Cabe destacar que a cada troca de sabor nos tanques de preparo e, ou, de refrigerantes nas linhas de enchimento é necessário um tempo de troca, dependente da sequência, sendo necessária a limpeza e, ou, ajustes da máquina (Ferreira et al., 2009).

Assim, ao se terminar de envasar um lote, é necessário iniciar a limpeza do sistema de preparo de matéria-prima para o preparo de outro lote. Essa limpeza é chamada de *cleaned in place* (CIP) e ocorre durante as trocas de sabores e entre intervalos de tempo predeterminados (Toscano, Ferreira, & Morabito, 2019). Ressalta-se que essas etapas de lavagens, além de limpeza de vasilhames, instalações e equipamentos, são responsáveis pela geração de efluentes,

a qual está diretamente ligada aos fatores citados anteriormente, como dimensionamento dos lotes de produção e programação da produção (Santos & Ribeiro, 2005).

Segundo Hsine, Benhammou e Pons (2004), o tratamento de efluentes é uma das prioridades da maioria das indústrias de refrigerantes. Em função do elevado grau de complexidade da composição dos efluentes gerados nessas indústrias, faz-se necessário um alto grau de tratamento da água do processo de produção, o que exige uma combinação de processos para que a remoção dos poluentes seja eficiente.

Santos e Ribeiro (2005) citam que além da composição do efluente, que é bastante variável, há, também, variação na vazão de geração de efluente. No entanto, o envio de efluente estável, sem variações bruscas em sua composição e vazão, para o sistema de tratamento de efluentes em uma indústria de bebidas é pré-requisito para um comportamento estável desse sistema (Serenó *et al.*, 2013). Portanto, para uma melhor gestão, previsão e entendimento do comportamento desse tipo sistema, técnicas de simulações podem ser utilizadas de modo a permitir a avaliação do desempenho do sistema sem intervenção física, ou seja, antes que as mudanças sejam implementadas na vida real, além de permitir a análise do impacto de diferentes cenários (Antonelli, Litwin, & Stadnicka, 2018).

A simulação por eventos discretos (SED), especificamente, tem como filosofia a aleatoriedade. Dessa maneira, por meio dessa metodologia é possível realizar um estudo do impacto da aleatoriedade no comportamento do sistema. Outra característica da metodologia de SED é sua orientação a processo com foco no nível tático-operacional. Ao analisar um sistema por meio de SED, pode-se considerar, portanto, um alto nível de detalhe dos processos que representam o sistema (Jovanoski, Minovski, Voessner, & Lichtenegger, 2012; Antonelli *et al.*, 2018). Assim, os *softwares* de SED permitem contemplar várias restrições, como troca de formatos, quebra de equipamentos, programações de turno e chegada de entidades, dentre outras (Sachidananda, Erkoyuncu, Steenstra, & Michalska, 2016).

Amplamente utilizada em várias áreas da indústria e com diferentes aplicações, a simulação por eventos discretos foi utilizada por Glenn, Norris e Sommerfeld (1990) na análise e projeto de estações de tratamento de águas residuais. Zandieh e Motallebi (2018), por sua vez, utilizaram a SED para determinar políticas de planejamento de produção para diferentes produtos em indústria de processos.

Especificamente, na indústria de bebidas, Osterroth, Klein, Nophut, & Voigt (2017) previram a demanda de energia elétrica em uma indústria de engarrafamento a fim de auxiliar a tomada de decisão com foco na redução dessa demanda por meio de um modelo SED. Já Nicoletti, Correa, Oliveira e Helleno (2016) estudaram, por meio de um modelo de SED, a disponibilidade fabril de uma linha de envase de latas em uma indústria de bebidas. Por meio do modelo, os autores identificaram a disponibilidade ótima (90%) de seus equipamentos para o melhor custo-benefício em termos de produtividade da linha. A simulação permitiu identificar que a fonte de desperdícios era a enchedora, sendo necessário reduzir seus tempos de parada em termos de sua distribuição de paradas não programadas.

Diante do exposto, o presente trabalho tem como objetivo modelar e simular os processos de produção de refrigerantes de uma planta instalada em Minas Gerais por meio de um modelo de simulação de eventos discretos com foco na gestão de efluentes. Como a SED estima o desempenho do sistema, sendo que o estado do sistema muda no tempo não obedecendo um padrão determinístico (Souza, 2017), as vazões serão analisadas como eventos discretos e diferentes métodos de simulação serão integrados por meio das bibliotecas *fluid* e *process modeling* disponíveis no software AnyLogic®. Pretende-se, por meio da análise dos resultados da simulação, auxiliar os gestores na tomada de decisão referente à programação da produção, além de, a partir da simulação de diferentes cenários, analisar como as principais variáveis do processo podem impactar na programação da produção.

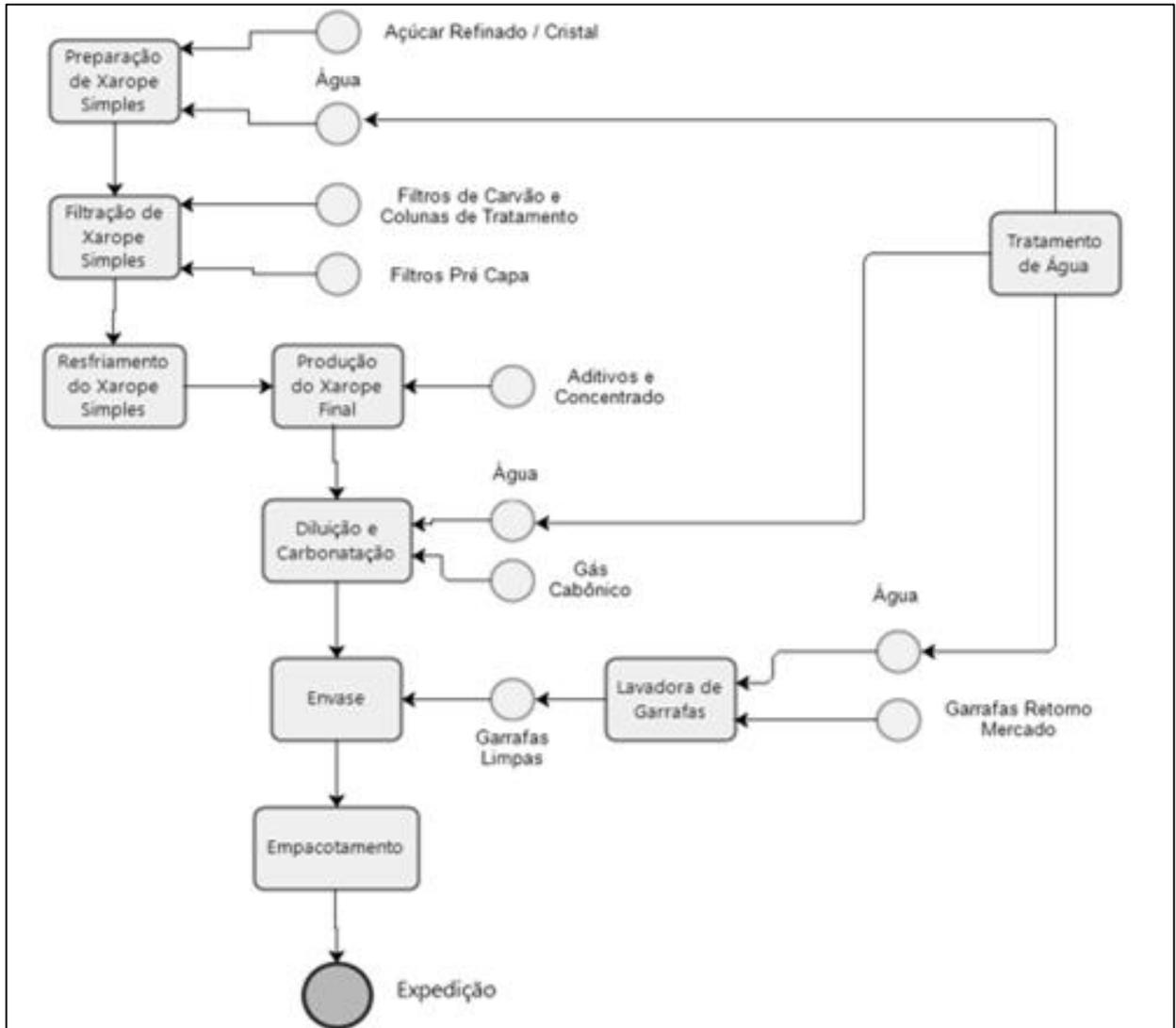
## 2 Referencial teórico

### 2.1 Fluxo do processo de refrigerantes

Conforme Santos e Ribeiro (2005), a produção de refrigerante se divide em três processos principais: fabricação do xarope simples (dissolução de açúcar), fabricação do xarope final (mistura do xarope simples e componentes base de bebidas para o envase) e o envase. Pode-se observar, na Figura 1, o fluxograma básico de processo de fabricação de refrigerantes.

As gerações de águas residuais nesse tipo de indústria são oriundas desses processos de CIP e de etapas de lavagem de vasilhames e são proporcionais ao tamanho dos lotes de produção. Portanto, é necessário o estudo dos perfis dos efluentes e as correlações entre vazão, a demanda química de oxigênio (DQO) e eficiência de tratamento, conforme histórico da indústria em questão.

A carga orgânica aplicada é uma relação entre a DQO e vazão. A DQO é um parâmetro que mede a quantidade de matéria orgânica por meio do oxigênio dissolvido e é um parâmetro do efluente bruto. A carga orgânica é a capacidade da estação em tratar, considerando determinada vazão e a DQO presente no efluente. Combina-se, então, a vazão projetada de efluente da fábrica e a caracterização do efluente em laboratório, permitindo, assim, projetar uma estação de tratamento de efluentes (ETE).



**Figura 1** – Fluxograma básico do processo de produção de refrigerantes

Fonte: Do autor, 2020.

A Equação 1 representa a relação entre a DQO e a vazão:

$$CO = Q \cdot DQO \cdot t \quad (1)$$

em que:

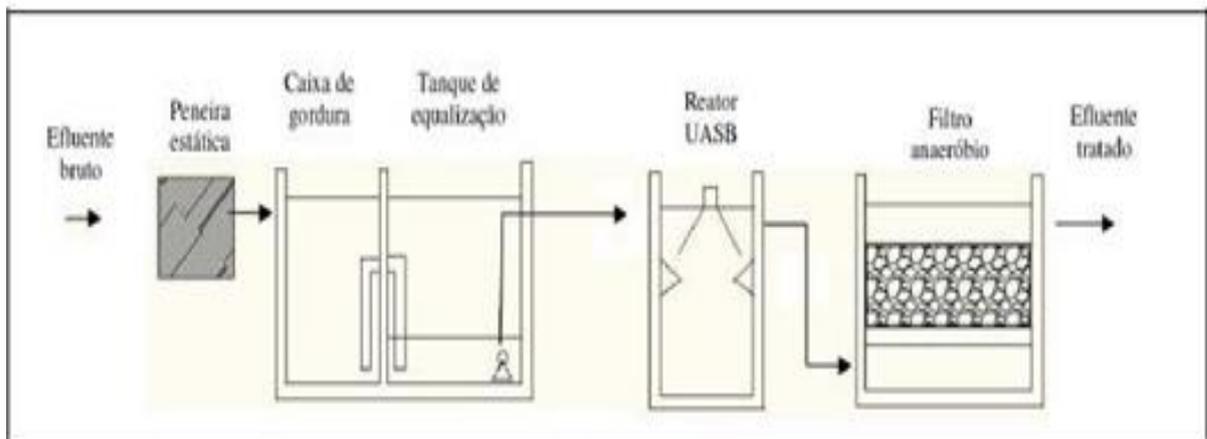
CO = a carga orgânica aplicada, kg de DQO/dia

Q = vazão, em m<sup>3</sup>/h

t = tempo, horas – considerado 24 horas

DQO = demanda química de oxigênio, mg/L

Na Figura 2, representa-se o fluxograma de uma estação de tratamento de efluentes.



**Figura 2** – Fluxograma básico de uma estação de tratamento de efluentes

Fonte: Rodrigues, L. S., Lopes, B. C., Lima, C.A., Ribeiro, M. C., Santos, R. P., Silva, I. J. Tratamento de efluentes de abatedouro de frangos por meio de reator UASB seguido de filtro anaeróbio. Arquivo Brasileiro de Medicina Veterinária e Zootecnia. (2016).

O efluente bruto entra no processo de tratamento na estação pela peneira estática para retenção de resíduos sólidos e na caixa de gordura para separação de óleo e graxas. O tanque de equalização tem como função estabilizar os parâmetros de pH e temperatura para ser tratado no filtro anaeróbio ou reator upflow anaerobic sludge blanket (UASB).

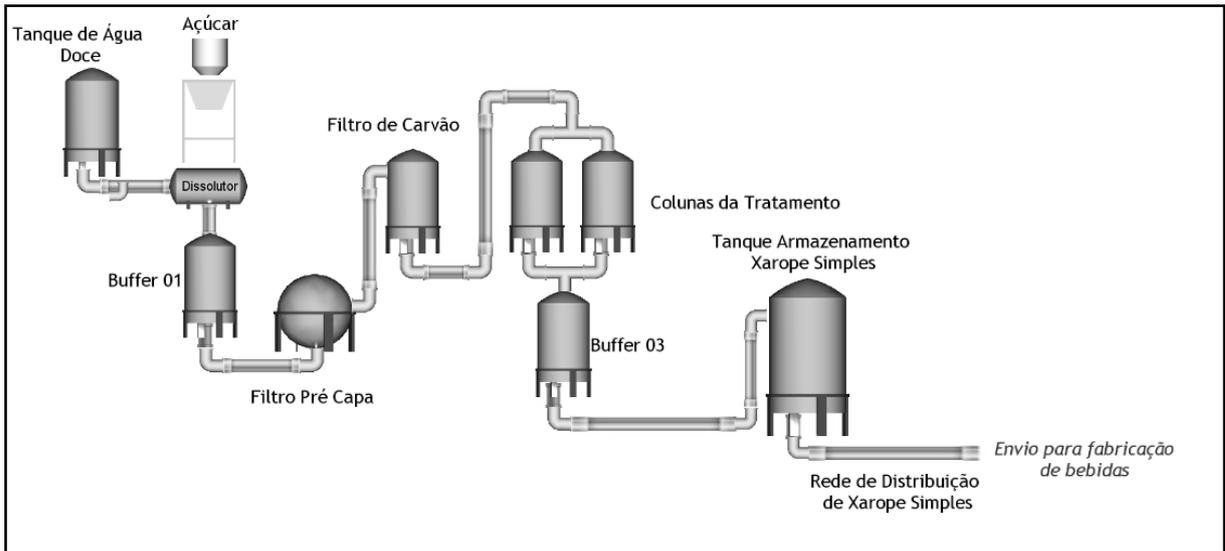
Esse reator é composto de microrganismos anaeróbios que propiciam o processo de biodegradação da matéria orgânica, convertendo-a em metano, dióxido de carbono e água. O reator aeróbio complementa a decomposição da matéria orgânica, além de remover nitrogênio e fósforo. A presente pesquisa será realizada até o processo referente ao tanque de equalização.

Carvalho (2002) descreve que as variações de vazão e carga orgânica podem causar impactos na estação de tratamento de efluentes que operam com reatores UASB e alguns parâmetros são indicadores da eficiência de operação e afetações externas ou internas dos processos que ocorrem no reator. Podem-se destacar a alcalinidade, que é a capacidade tampão do sistema e não significa que o pH está alto (Chernicharo, 1997), o potencial hidrogeniônico (pH), os ácidos graxos voláteis (AGV) e a temperatura como os fatores mais preponderantes (Serenio et al., 2013). Esses parâmetros são sensíveis às variações de carga orgânica e hidráulica e podem, quando afetados, prejudicar o desempenho do reator, colocando em risco o objetivo final, que é o atendimento dos parâmetros legais de lançamento do efluente tratado.

### *2.1.1 Caracterização do processo de fabricação de bebidas*

O fluxograma representado na Figura 1 identifica os processos básicos para a produção de refrigerante. Cada equipamento que necessite de sanitização nesses processos é detalhado conforme as Figuras 3, 4 e 5, além da lavadora de garrafas.

Na Figura 3, pode-se observar os equipamentos do processo de dissolução de açúcar, que têm como procedimento a realização de sanitização com periodicidade fixa e estão representados no modelo de simulação desenvolvido conforme nomenclatura apresentada na Tabela 1. Após a dissolução do açúcar, o produto final desse processo, chamado de xarope simples, é enviado através de tubulações para a sala de preparo de bebidas. Essas tubulações também têm sua simulação de sanitização representada no modelo.



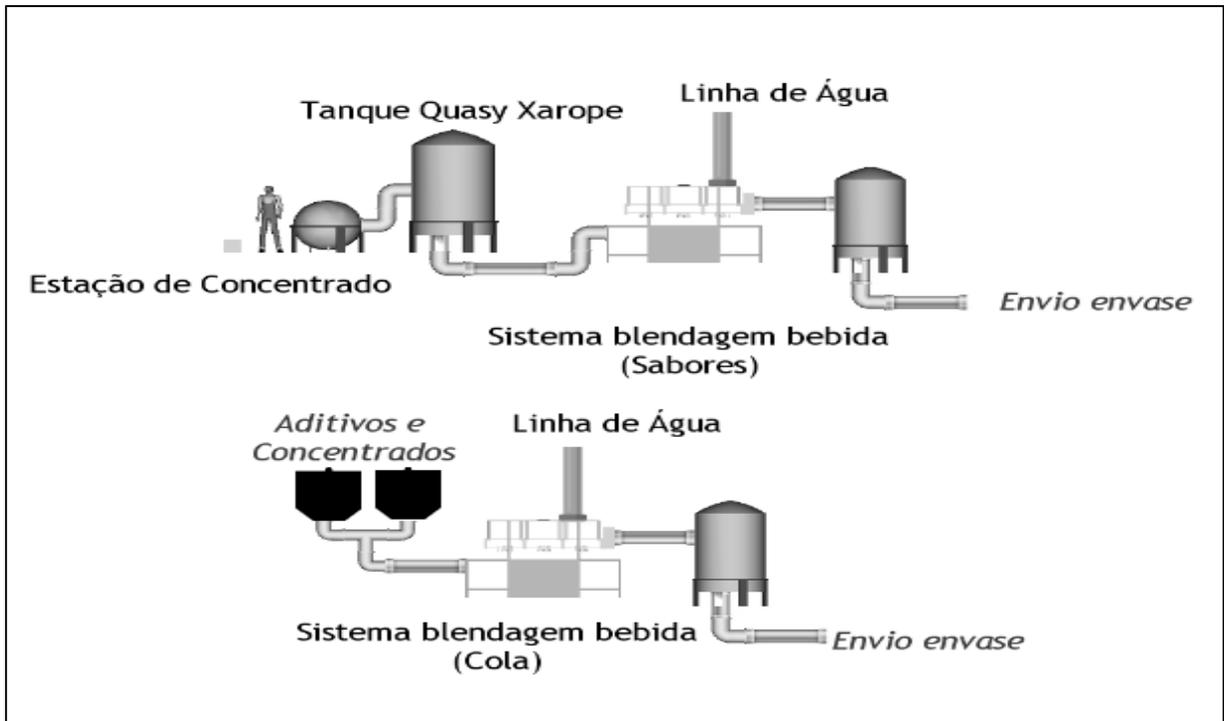
**Figura 3** – Equipamentos do processo de dissolução contínua de açúcar

Fonte: Do autor, 2020.

O processo de fabricação de bebida está representado na Figura 4.

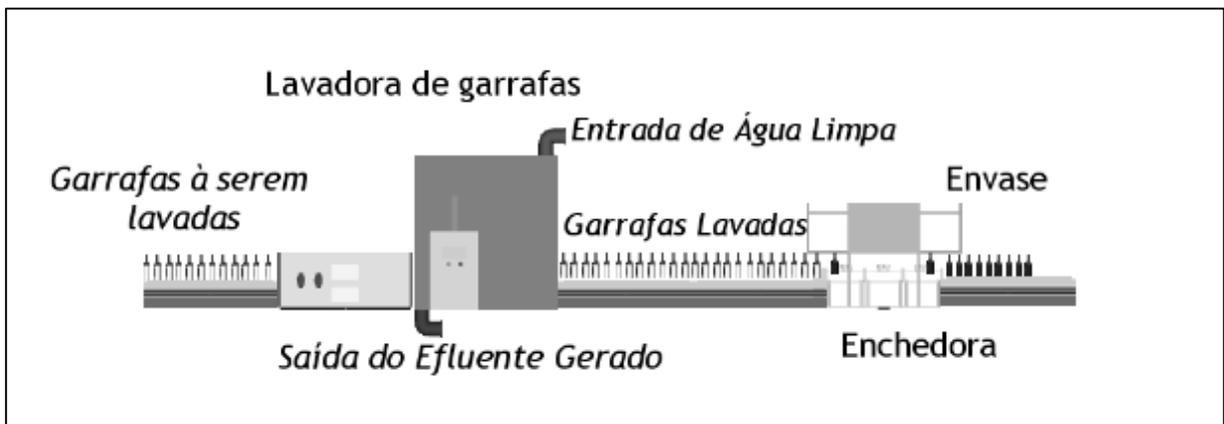
O produto desse processo, chamado de bebida final, é enviado para a sala de envase, onde receberá o gás carbônico e será envasado em um equipamento chamado enchedora, representado na Figura 5.

Na Figura 6, observam-se os processos e equipamentos da estação de tratamento de efluentes. Todo efluente gerado na fábrica é drenado para o tanque equalizado e pode ser tratado internamente ou externamente.



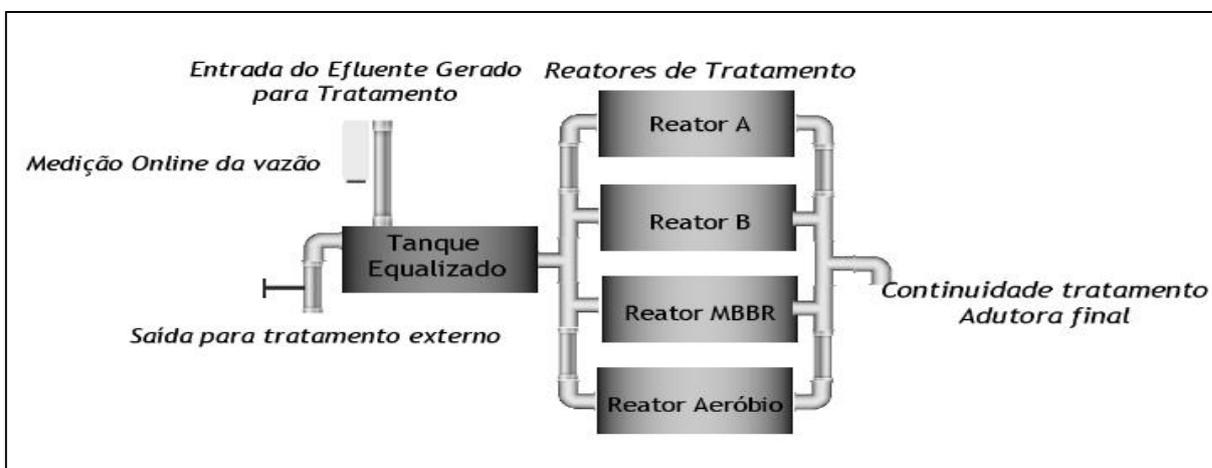
**Figura 4** – Equipamento do processo de fabricação de bebidas

Fonte: Do autor, 2020.



**Figura 5** – Equipamentos do processo lavagem de garrafas e envase

Fonte: Do autor, 2020.



**Figura 6** – Equipamentos da estação de tratamento de efluentes  
Fonte: Do autor, 2020.

### 3 METODOLOGIA

#### 3.1 Modelo de simulação do processo de produção de refrigerantes

Avaliar as consequências de decisões tomadas e analisar o comportamento dos sistemas ao longo do tempo procurando entender a complexidade do mundo real, é um dos objetivos de se construir um modelo computacional, (Medeiros, Rodrigues, Simonetto, & Santos, 2020). O modelo de simulação desenvolvido foi implementado na versão livre do *software* AnyLogic® que tem restrições para utilização da biblioteca de fluido, permitindo apenas uma hora de simulação. Portanto, nas simulações realizadas, consideraram-se que um segundo é equivalente à uma hora de produção e  $1 \text{ m}^3/\text{s}$  equivalente à  $1 \text{ m}^3/\text{h}$ .

Os processos observados nas Figuras 3-6 foram representados no modelo de simulação e estão representados na Tabela 1 com a nomenclatura inserida no modelo.

O modelo de simulação desenvolvido foi subdividido nas seguintes quatro partes e pode ser observado nas Figuras 7-10: sistema de preparo de bebidas (Figura 7), sistema de dissolução de açúcar (Figura 8), estação de tratamento de efluentes (Figura 9), e sistema de lavagem de garrafas e envase de bebidas (Figura 10). Essa parte do programa foi modelada utilizando a

biblioteca *fluid* em conjunto com a de *process modeling e system dynamics* do AnyLogic® para análise na perspectiva de simulação de eventos discretos.

**Tabela 1**

**Representação dos nomes dos equipamentos utilizados no modelo de simulação desenvolvido**

Equipamento	Nome utilizado no modelo de simulação	Equipamento representado em
Tanque de água doce	tqaguadoce	Figura 3
Dissolutor	dissolutor	Figura 3
Buffer 01	buffer1	Figura 3
Filtro pré-capá	precapa	Figura 3
Filtro de carvão	filtrocarvao	Figura 3
Colunas de tratamento	colunaMiteco	Figura 3
Colunas de tratamento	coluna VDM	Figura 3
Buffer 03	buffer3	Figura 3
Tanque armazenamento de xarope simples	tanqueXS	Figura 3
Rede distribuição de xarope simples	redeXS	Figura 3
Estação de concentrado	estconc	Figura 4
Tanque de quasy xarope	mixingtank	Figura 5
Linha de água	waterlinecn	Figura 5
Sistema de blendagem de bebida (sabores)	contnew	Figura 5
Sistema de blendagem de bebida (cola)	contnewp	Figura 5

---

Enchedora	filler	Figura 5
	fillerline1	
Lavadora de garrafas	lavadora	Figura 5
Tanque equalizado	Equalizado	Figura 6
Reator A	vazaoRA	Figura 6
Reator B	vazaoRB	Figura 6
Reator MBBR	MBBR	Figura 6
Reator anaeróbio	vazaoAero	Figura 6
Saída tratamento externo	controltratext	Figura 6
Vazão constante de fábrica	Fluisource1	Figura 9

---

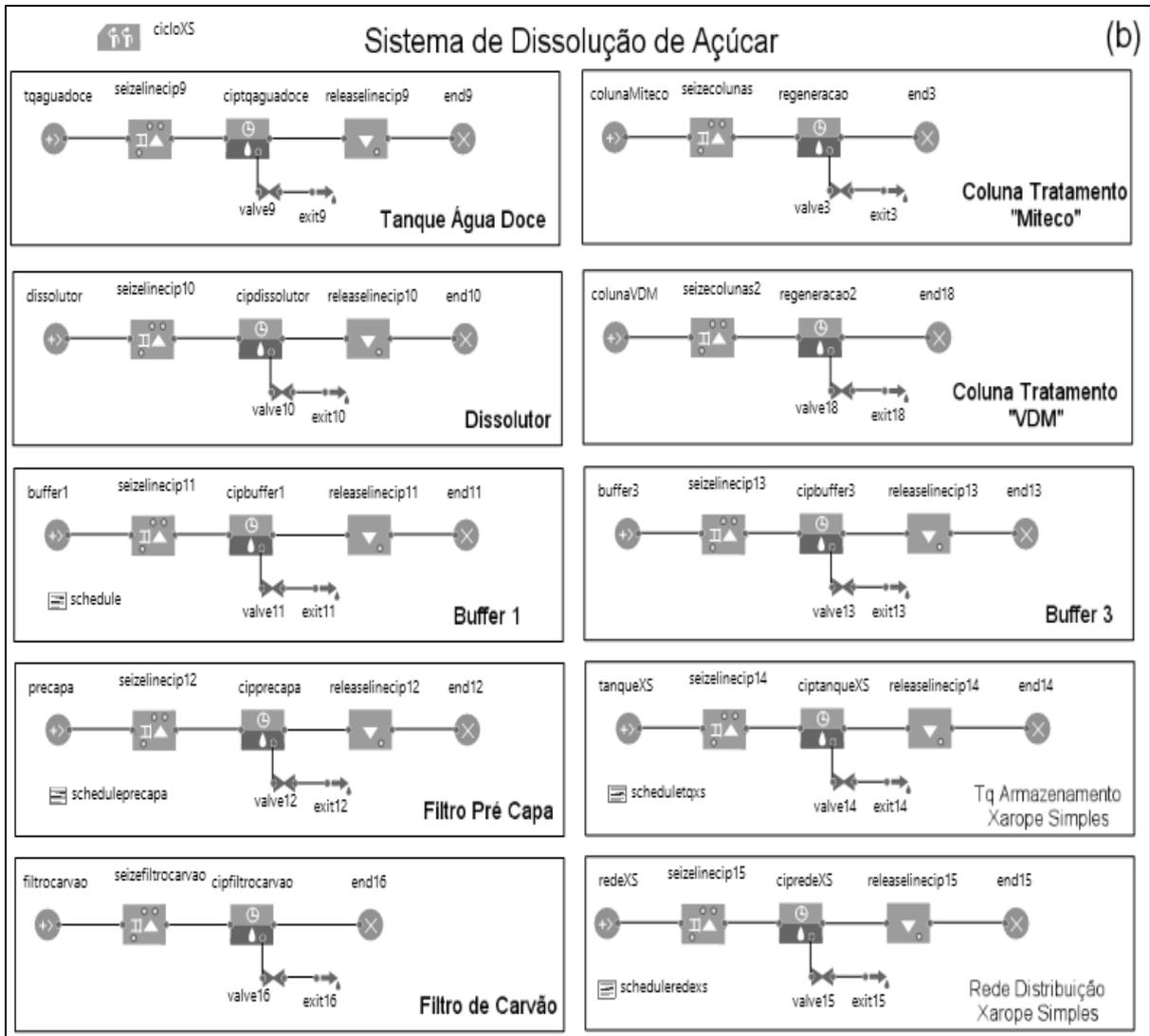
Fonte: Do autor, 2020.

Desenvolveu-se a parte do modelo que representa o sistema de preparação de bebidas e o sistema de dissolução de açúcar considerando-se dois modelos de programação para simulação: sanitizações com uma periodicidade pré-determinada, conforme determina requisitos de qualidade, e sanitizações planejadas de acordo com o programa de produção.

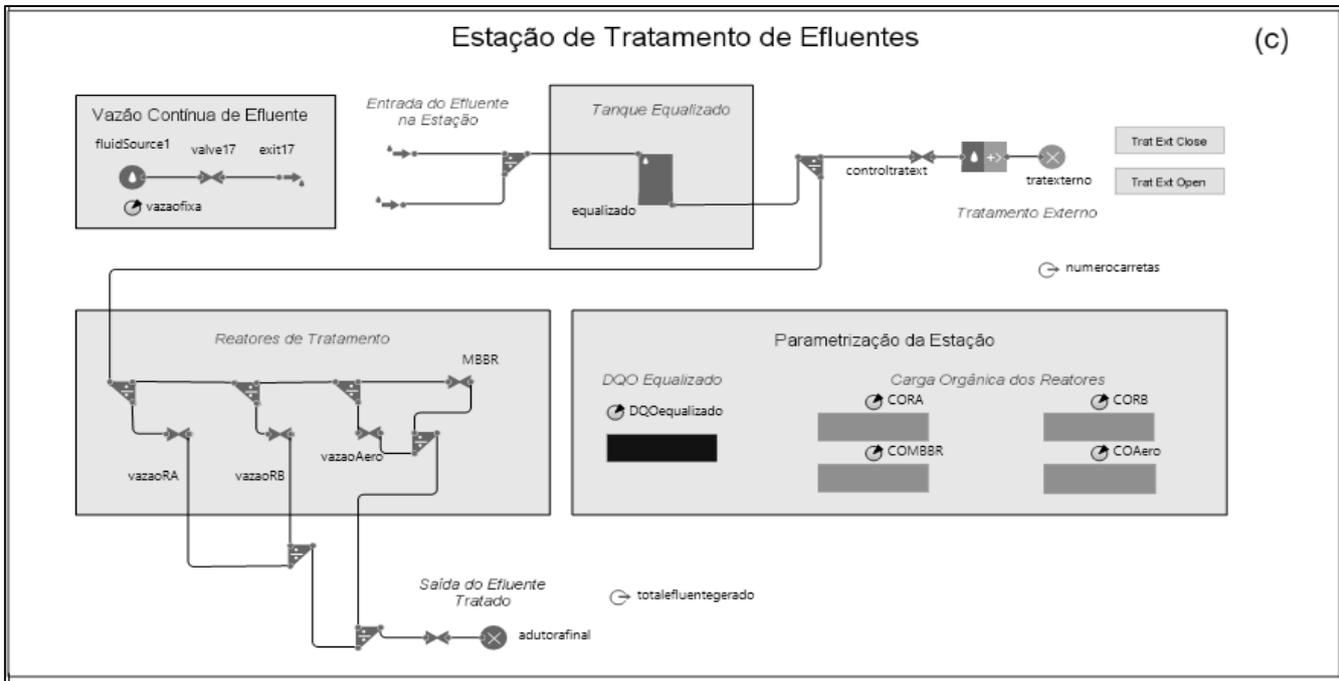
Na parte de sistema de lavagem de garrafas e envase de bebidas, simulam-se o processo de envase de bebidas, a sanitização e também a geração de efluentes de uma lavadora. Na simulação da linha de produção para envase, utilizou-se da simulação por eventos discretos para análise dos impactos da quantidade produzida e tempo de produção durante os cenários estudados.

Todo efluente gerado nos processos citados é direcionado para a estação de tratamento de efluentes, que simula o tratamento do mesmo. A vazão de geração de efluente constante

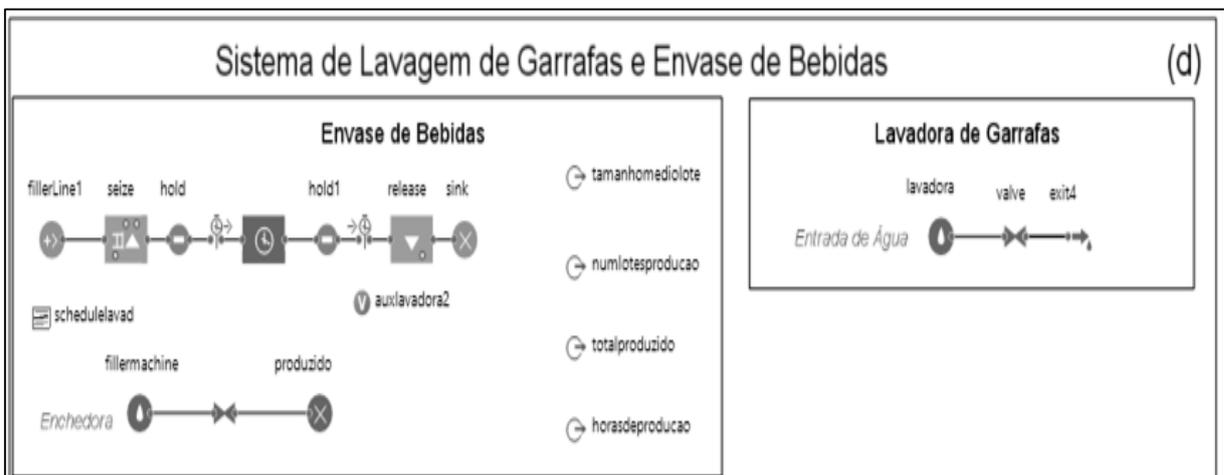




**Figura 8** – Modelo de simulação: sistema de dissolução de açúcar  
Fonte: Do autor, 2020.



**Figura 9** – Modelo de simulação: Estação de Tratamento de Efluentes  
Fonte: Do autor, 2020.



**Figura 10**– Modelo de Simulação: sistema de lavagem de garrafas e envase de bebidas  
Fonte: Do autor, 2020

O tanque equalizado e os reatores de tratamento e seus parâmetros de capacidade e a parametrização da DQO estão também representados nessa parte do modelo referente à estação de tratamento. Por meio da combinação biblioteca de *fluid* com a biblioteca *system dynamics*, os reatores, representados por meio do objeto *valve*, são parametrizados de acordo a Equação 1 para o cálculo da carga orgânica. A DQO é um parâmetro de simulação do programa. Na parte do modelo referente à estação de tratamento também foi parametrizada a utilização de tratamento externo.

O tanque equalizado, representado pelo objeto “equalizado” na Tabela 1, recebe o efluente gerado na fábrica e sua capacidade foi parametrizada previamente com volume de 720 m<sup>3</sup>.

### 3.2 Coleta e tratamento de dados

Os dados de entrada foram obtidos a partir da base de dados de uma fábrica de refrigerantes instalada em Minas Gerais. Os dados referentes aos tempos de sanitização foram coletados no período de abril a outubro de 2019. Nesse período, devido à baixa demanda, os lotes são reduzidos e, como consequência, há um aumento no número de sanitizações. Para a lavadora foram utilizados os dados de dezembro de 2019, pois é o período de maior utilização desse equipamento.

Todas as sanitizações foram obtidas por meio de dados históricos registrados em um sistema de coleta de dados automático que armazena o tempo gasto para cada sanitização realizada em cada equipamento. A vazão é determinada pelo projeto de instalação e o tempo de sanitização é a variável simulada. O volume de efluente gerado para a estação de tratamento é obtido pela multiplicação desse tempo, a vazão de projeto e o fator de simultaneidade de sanitizações nesse objeto.

Para garantir a aleatoriedade do processo, ajustaram-se distribuições de probabilidade aos dados coletados. E para garantir que as distribuições são adequadas para representar os dados, realizaram-se os testes de aderência de Kolmogorov-Smirnov e de Anderson-Darling

por meio do *software* Stat-Fit® *version 3.0.11.1 Student* e verificaram-se se o p-valor é maior do que 0,10 (Chwif & Medina, 2007).

Os principais dados de entrada utilizados no modelo de simulação estão descritos nas Tabelas 2 a 5. O p-value, representado na Tabela 2, é referente ao teste Kolmogorov-Smirnov.

**Tabela 1**  
Dados de entrada do modelo de simulação proposto

Objeto AnyLogic® ( <i>fluidDropoff</i> )	Distribuição	p-value	Equação AnyLogic® (tempo em horas)	Vazão Projeto m <sup>3</sup> / h
cipestconc	lognormal	0,942	lognormal(-0.20407, 0.146193, 0)	12
tankquasy	lognormal	0,826	lognormal(-0.754, 0.323, 0.783)	20
cipcontnew	lognormal	0,86	lognormal(-0.228, 0.186, 0.305)	15
cipwaterlinecn	normal	0,52	normal(0.284023, 1.72782)	20
cipfiller	lognormal	0,775	lognormal(5.611, 5.356E-4, -290.619)	14
cipcontnewp	lognormal	0,774	lognormal(0.174, 0.264, 0.722)	25
cipbuffer1	lognormal	0,999	lognormal(-0.527, 0.204, 0.939)	22,75
ciptqaguadoce	lognormal	0,955	lognormal(0.867, 0.158, -0.631)	20,75
cipdissolutor	lognormal	0,466	lognormal(3.451, 0.009297, -29.904)	30,9
cipprecapa	lognormal	0,936	lognormal(0.581, 0.0891, 0.3547)	26
cipbuffer3	lognormal	0,936	lognormal(-0.134, 0.4047, 0.759)	30,4
ciptanqueXS	uniform	0,772	uniform(1.659, 3.784)	30

Do autor, 2020

**Tabela 2**  
Dados de entrada do modelo de simulação proposto – lavadora

Objeto AnyLogic® ( <i>fluidDropoff</i> )	Distribuição	p-value	Equação AnyLogic® (m <sup>3</sup> / h)
lavadora	normal	0,311	normal(3.0545, 14.9)

Fonte: Do autor, 2020

**Tabela 3**  
Dados de entrada do modelo de simulação proposto – colunas e filtro

Objeto AnyLogic® ( <i>source</i> )	Distribuição	p-value	Equação AnyLogic® (intervalor de ocorrência em horas)
colunaMiteco	lognormal	0,953	lognormal(2.969, 0.5823, 15.825)
colunaVDM	lognormal	0,98	lognormal(3.838, 0.29706, -9.41004)
filtrocarvao	-	-	168

Fonte: Do autor, 2020.

#### Tabela 4

Dados de entrada do modelo de simulação proposto – geração de efluentes e vazão de projeto para colunas e filtro

Objeto AnyLogic® ( <i>fluidDropoff</i> )	Geração de Efluente m <sup>3</sup>	Vazão Projeto m <sup>3</sup> / h
regerenacao (ref. colunaMiteco)	155	25.8
regerenacao2 (ref. colunaVDM)	105	17.5
cipfiltrocarvao	185	23.12

Fonte: Do autor, 2020.

Para a validação do modelo proposto foram utilizados como base a média diária de geração de efluente do ano de 2019 (993,82 m<sup>3</sup>) e o valor médio da DQO de 2019 do tanque equalizado e os valores de projeto dos reatores para carga orgânica. E para a simulação da produção de envase, o objeto *source fillermachine* (Figura 10) foi parametrizado com vazão de 40 m<sup>3</sup>/h, simulando uma enchedora de 20 mil garrafas/horas, comumente usada na indústria de bebidas.

Os dados da vazão real da geração de efluentes foram coletados a partir dos registros históricos internos que são gerados por um medidor de vazão *online* antes de entrar no sistema (Figura 6). Portanto, para a carga orgânica aplicada nos reatores, foram utilizados os dados de projeto, isto é, sem considerar as possíveis restrições e fechamentos de válvulas na estação de tratamento de efluentes (Tabela 6). A vazão do tanque equalizado (parâmetro no AnyLogic@ “DQOequalizado”) foi considerada a média do ano de 2019 sendo 4592 mg/l.

#### Tabela 5

Valores de projeto dos reatores considerados para validação do modelo

Reator	Carga Orgânica – Projeto (kg de DQO/dia)	Parâmetro AnyLogic®
A	4000	CORA
B	4000	CORB
MBBR	2800	COMBBR
Aeróbio	1200	COAero

Fonte: Do autor, 2020.

Para os estudos dos cenários propostos, foi considerado o desempenho atual da estação de tratamento, conforme apresentado na Tabela 7, ao invés de sua capacidade nominal. No entanto, para que o modelo fosse parametrizado e validado, consideraram-se os dados conforme metodologia anteriormente descrita quanto à capacidade nominal (de projeto).

**Tabela 7**

Dados de estação de tratamento de efluentes para simulação dos cenários

Objeto AnyLogic® (fluidDropoff)	Distribuição	p-value	Equação AnyLogic® (kg de DQO/dia)
CORA	normal	0,79	normal(187.408, 1040.53)
CORB	normal	0,79	normal(187.408, 1040.53)
COMBBR	lognormal	0,94	lognormal(9.11859, 0.0554368, -6672.26)
COAero	-	-	850

Fonte: Do autor, 2020.

### 3.3 Definição dos cenários de simulação

Para a construção dos cenários de simulação, partiu-se do cenário base com 1.682 horas de simulação, em que programaram-se 601 horas de produção.

Os parâmetros que serão variados são DQO, vazão e a capacidade de tratamento da carga orgânica de cada reator. A partir da variação desses parâmetros, podem-se criar três cenários de simulação:

- Cenário 1: parametrização da estação de tratamento com a capacidade de tratamento de carga orgânica (em kg de DQO/dia) atual a fim de comparar o desempenho do sistema com o cenário base que foi parametrizado com sua capacidade nominal (de projeto). Realizou-se a simulação sem a possibilidade de tratamento externo do efluente e depois considerando essa possibilidade;
- Cenário 2: avaliação das variações de DQO em comparação ao cenário 1. Essa comparação, faz-se necessária já que a média de DQO, em 2019, foi de 4.592 mg/l. Entretanto, em 46% dos dias, constatou-se uma DQO acima da média e, em 1% dos dias, constatou-se uma DQO acima da capacidade nominal de projeto;

- c) Cenário 3: avaliação das variações de vazão em comparação ao cenário 1, já que foram constatadas vazões acima da média analisada em 48% dos dias do ano de 2019.

## 4 Resultados e discussões

### 4.1 Validação do modelo de simulação

Para a validação do modelo, considerou-se, no AnyLogic®, um nível de confiança de 95% e 5% de erro. O número mínimo de replicações considerado para cada rodada do modelo foi de 50 desde que fosse atingido o nível de confiança e erros parametrizados.

Na validação desse modelo, verificou-se se o somatório do volume gerado de efluentes em determinado tempo de simulação (1.680 horas) se aproxima do valor real da média diária de 2019 (993,82 m<sup>3</sup>/dia) ou 69,567,55 m<sup>3</sup> no período determinado. E se o número de horas programadas de produção de envase e a produção esperada em m<sup>3</sup> também são válidas de acordo com os dados do cenário base. Cabe destacar que no cenário base foram retiradas as restrições impostas no modelo em relação à estação de tratamento.

Para verificar o quanto o modelo se aproxima do real, utilizou-se como parâmetro o erro relativo percentual (Freitas, 2017). O erro relativo médio percentual deve ser menor do que 5% segundo as expectativas dos gestores da fábrica analisada.

A expressão que representa o cálculo do erro relativo percentual é:

$$\varepsilon = \left| \frac{X_{r,i} - X_{s,i}}{X_{r,i}} \right| \times 100\% \quad (2)$$

em que:

$X_{r,i}$  = valores reais do indicador selecionado nos meses estudados;

$X_{s,i}$  = valores simulados.

Em relação à geração de volume de efluentes no sistema no período estudado, pode-se observar, na Tabela 8, que o  $\varepsilon$  médio no período foi de 0,46%. Assim, já que o  $\varepsilon$  médio encontrado foi menor do que 1 m<sup>3</sup>/hora, pode-se concluir que o modelo proposto é válido quanto a esse indicador.

Em relação à quantidade produzida, programou-se, para esse cenário de 1.680 horas de simulação, 601 horas de envase, tendo sido produzidos 24.040 m<sup>3</sup> de bebida.

A partir de 10 simulações com 50 replicações cada, obteve-se um  $\varepsilon$  médio de 0,83% quanto ao volume produzido e de 1,16% quanto ao tempo de envase (horas de produção) o que indica que o modelo proposto também é válido para simular esses indicadores.

**Tabela 8**

Erro relativo percentual em relação à geração de efluentes no cenário base

Simulação	Volume de efluente nominal (m <sup>3</sup> )	Volume de efluente simulado (m <sup>3</sup> )	Erro relativo (%)
1	69.567,55	69.456,41	0,16
2	69.567,55	69.781,85	0,31
3	69.567,55	69.630,49	0,09
4	69.567,55	69.419,78	0,21
5	69.567,55	69.884,80	0,46
6	69.567,55	70.399,11	1,20
7	69.567,55	69.919,63	0,51
8	69.567,55	70.219,75	0,94
9	69.567,55	69.983,44	0,60

---

10	69.567,55	69.716,55	0,21
Média	69.567,55	69.841,13	0,46

---

Fonte: Do autor, 2020.

## 4.2 Análise dos cenários simulados

### 4.2.1 Cenário 1

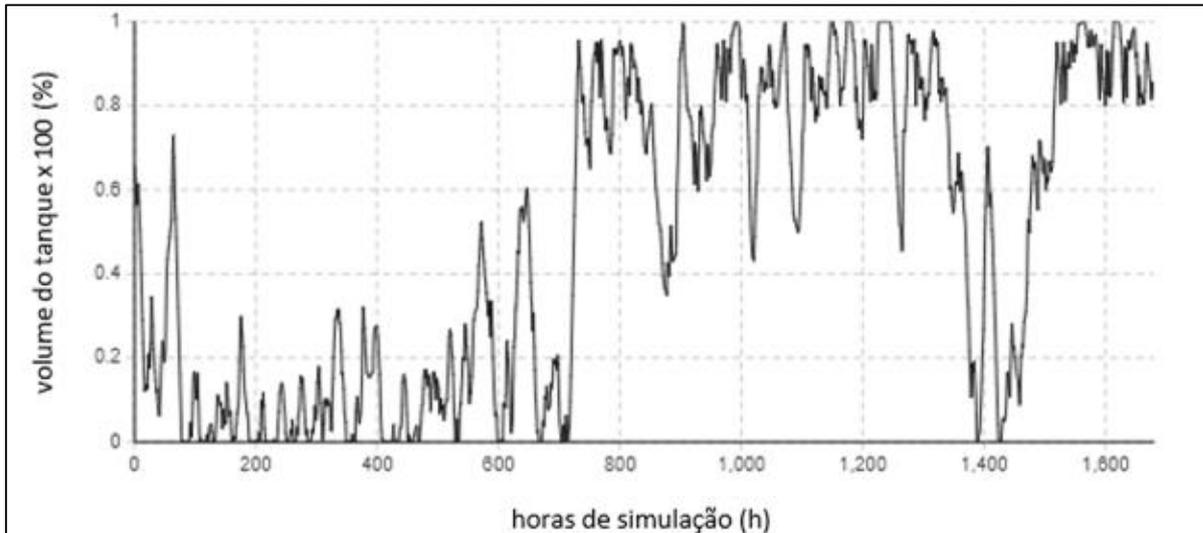
Para essa análise, considerou-se a estação de tratamento de efluente com sua capacidade atual e sem a possibilidade de tratamento externo. Cabe lembrar que aqui foram consideradas todas as restrições da estação de tratamento. Assim, as válvulas são abertas e fechadas de acordo com o volume do tanque equalizador.

De acordo com os resultados do cenário 1, pode-se observar que houve um desvio médio de 0,53% em relação ao cenário base quanto à geração de efluente e um desvio médio de 0,15% quanto ao volume produzido. Assim, com o modelo parametrizado com os valores atualmente praticados na fábrica (cenário 1) foi possível tratar todo o efluente gerado e também produzir todo o volume programado.

No entanto, para a produção desse mesmo volume, no cenário base foram necessárias apenas 594 horas de produção, enquanto no cenário 1 foram necessárias cerca de 642,93 horas, o que equivale a um desvio relativo médio de 6,98%.

A diferença média no tempo para a produção do mesmo volume significa que a linha de produção teve sua ocupação elevada em 8,14% sem aumentar o seu desempenho. A diferença média absoluta foi de 30,93 horas, que, segundo a parametrização do modelo, seria capaz de produzir mais 1.237,20 m<sup>3</sup>. Entretanto, isso não foi possível devido à capacidade máxima da estação de tratamento de efluente. Na Figura 11 que representa o gráfico obtido no Anylogic, é possível observar a variação do volume do tanque equalizado durante uma simulação em que,

em vários momentos, se atinge sua capacidade máxima, causando colapso no sistema, ou seja, parando a linha de produção.



**Figura 11** – Volume do tanque equalizado no cenário 1

Fonte: Do autor, 2020.

Constata-se, portanto, uma perda de eficiência na produção e colapso no sistema de tratamento de efluentes em alguns momentos no cenário 1. Uma possível solução é a realização do tratamento externo do efluente.

De acordo com os resultados da simulação, para se obterem os mesmos valores do cenário base quanto ao tempo de produção (601 horas) e volume produzido ( $23.840 \text{ m}^3$ ), é necessário o tratamento externo de  $2.381,04 \text{ m}^3$  de efluente em média. Em 100% das simulações esses valores foram atingidos validando a solução sugerida.

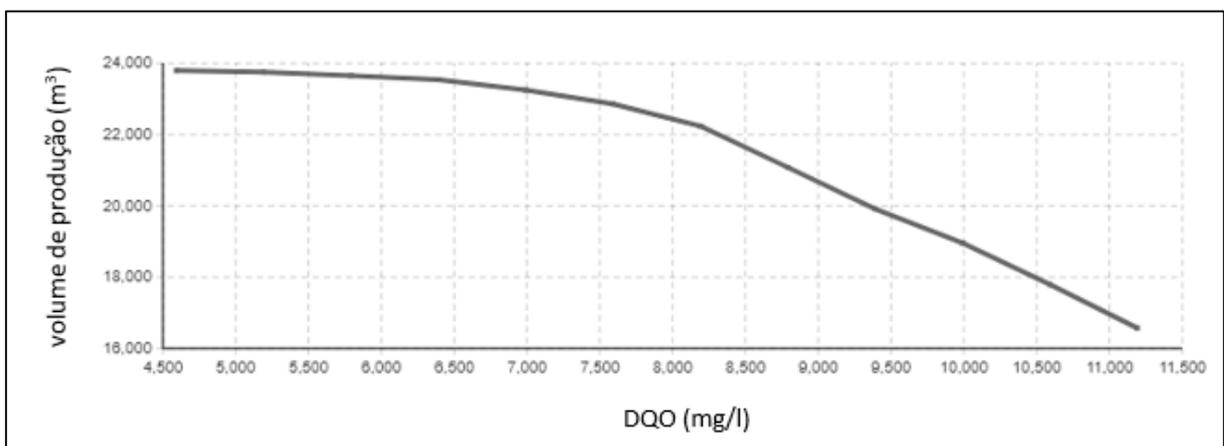
#### 4.2.1 Cenário 2

Durante o estudo do cenário 1, constatou-se que a estação de tratamento é capaz de tratar todo efluente gerado e realizar a produção planejada para o período simulado. Entretanto, para

isso, há um aumento do tempo de utilização da linha de produção, ou seja, há uma perda de eficiência comparada ao cenário base, ou deve-se utilizar tratamento externo de efluente.

Conforme observado, a DQO é um dos parâmetros que pode causar colapso no sistema. O objetivo nesse cenário, então, é avaliar o impacto das variações de DQO no sistema e comparar os resultados aos do cenário 1.

De acordo com os resultados (Figura 12), pode-se observar o impacto direto do aumento de DQO e redução do volume de produção. O volume produzido é impactado em menos de 5% para uma DQO menor que 8.192 mg/l. Entretanto, para valores maiores que 8.192 mg/l, o volume de produção é altamente impactado, podendo reduzir mais de 50% em relação ao volume obtido no cenário 1 caso o DQO atinja valores maiores do que 11.792 mg/l. Cabe lembrar que, de acordo com os dados do cenário 1, obteve-se um volume médio de produção de 23.804,01 m<sup>3</sup> e uma geração de efluente média de 69.894,81 m<sup>3</sup>.

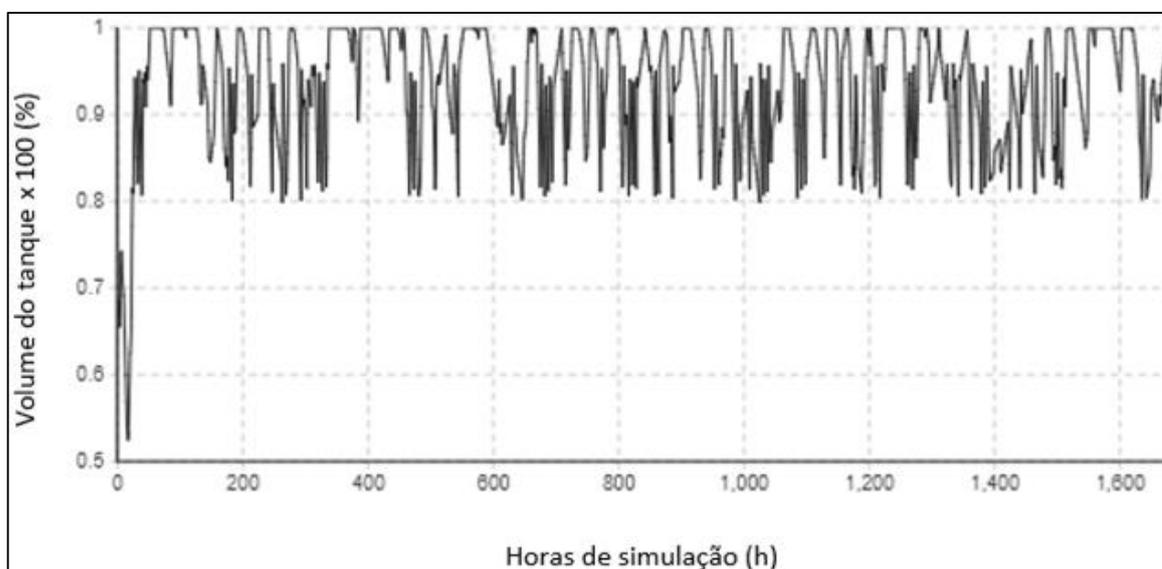


**Figura 12 – Variação do volume produzido (m<sup>3</sup>) em relação à variação da DQO (mg/l)**

Fonte: Do autor, 2020.

Para analisar, no cenário 2, a geração de efluentes ( $m^3$ ) e o tempo de produção (h) e comparar aos valores obtidos no cenário 1, que foi simulado com a mesma capacidade de tratamento, considerou-se uma DQO de 8.192 mg/l a qual reduziu o volume produzido em 7,52% em relação ao cenário 1. Assim, ao analisar os resultados da simulação com esse parâmetro, constatou-se uma redução média de 25,3% no volume de produção com um acréscimo de 128,1% no número de horas de ocupação da linha de produção. Isto é, apesar de a linha estar sendo utilizada, devido às restrições impostas pela estação de tratamento de efluentes, o volume de produção programado não foi atingido.

Evidenciou-se, ainda, que o volume de efluente gerado foi, em média, 33,9% menor do que no cenário 1, demonstrando que não foi possível realizar os processos de sanitização programados em 1.680 horas de simulação. Esse impacto pode ser observado na Figura 13, em que é possível verificar que o volume do tanque equalizado atinge 100% de seu volume quase na totalidade do tempo programado para a simulação.



**Figura 13** – Variação do volume do tanque equalizado com DQO de 8.192 mg/l

Fonte: Do autor, 2020.

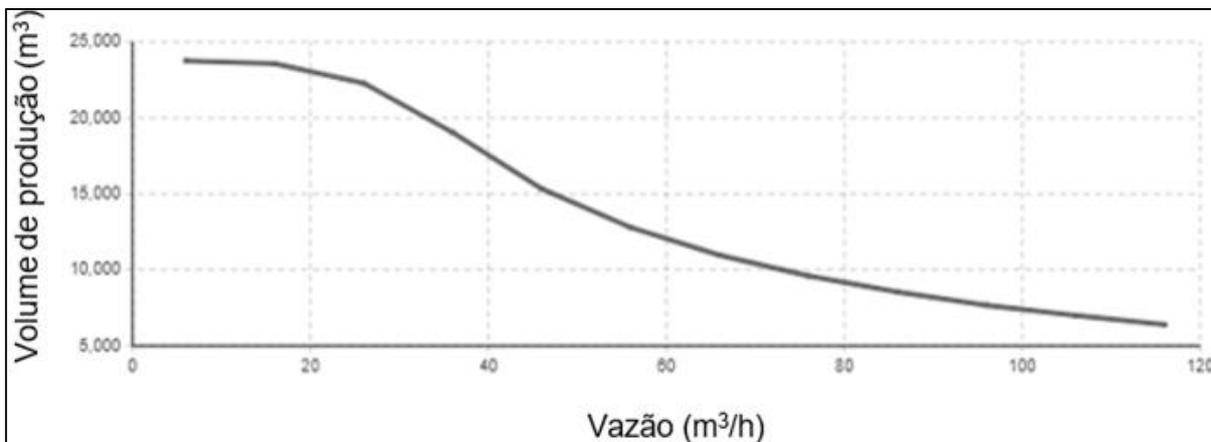
Nesse cenário, uma possível solução para atender toda a demanda seria a realização do tratamento do efluente externamente. Considerando essa opção na simulação, obteve-se uma média de 26.796,24 m<sup>3</sup> de volume de tratamento externo necessário em 1.680 horas de simulação. Dessa maneira, é possível atingir os mesmos valores do cenário 1, conseguindo produzir todo o volume programado (23.040 m<sup>3</sup>) e no mesmo tempo médio (642,94 horas).

#### 4.2.1 Cenário 3

Nesse cenário, variou-se a vazão a fim de comparar os resultados aos do cenário 1, já que, em 2019, em 48% dos dias, a vazão média diária de tratamento obtida foi superior à média, justificando essa análise comparativa.

Para essa simulação, manteve-se a DQO parametrizada em 4.592 mg/l e variou-se a vazão fixa – parâmetro estabelecido na coleta de dados como vazões fixas da fábrica em questão. Vale lembrar que, de acordo com os dados do cenário 1, atingiu-se uma produção média de 23.804,01 m<sup>3</sup> e uma geração de efluente média de 69.894,81 m<sup>3</sup>.

Pode-se observar no Figura 14 a relação direta entre o aumento da vazão de geração de efluente (m<sup>3</sup>/h) e a redução do volume produzido (m<sup>3</sup>). Com um acréscimo de vazão de 20 m<sup>3</sup>/h, estabelecendo uma vazão fixa de 26 m<sup>3</sup>/h, verifica-se uma redução no volume produzido de 6,84% em relação aos valores obtidos no cenário 1. Para vazões maiores do que 26 m<sup>3</sup>/h, esse impacto é ainda maior, podendo reduzir o volume produzido em mais de 270% para uma vazão de 116 m<sup>3</sup>/h.



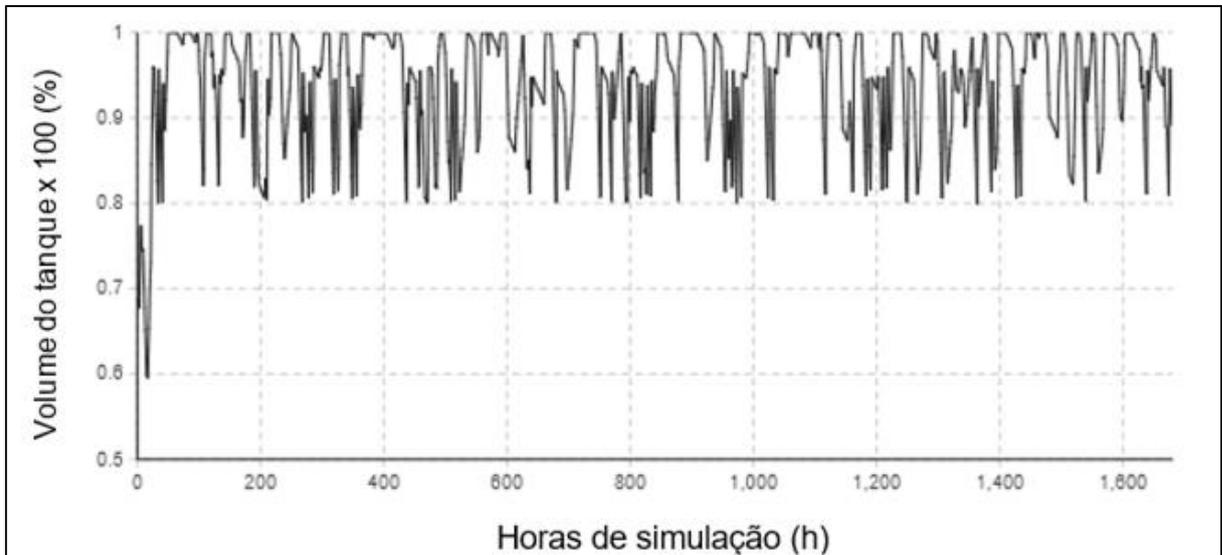
**Figura 14** –Variação do volume de produção (m<sup>3</sup>) em relação à variação da vazão de geração de efluente (m<sup>3</sup>/h)

Fonte: Do autor, 2020.

A fim de analisar o impacto da variação da vazão no volume e tempo de produção em relação aos valores do cenário 1, fixou-se a vazão em 26 m<sup>3</sup>/h. A partir dos resultados, pode-se observar um aumento médio de 28% na geração de efluentes (m<sup>3</sup>) em relação aos valores obtidos no cenário 1. Esse aumento era esperado já que houve um aumento da vazão da geração do efluente a ser tratado.

Impacto similar foi obtido com o aumento da DQO, com redução do volume de produção e aumento do tempo de ocupação da linha de produção. Isso quer dizer que o impacto de um aumento hidráulico no sistema reduziu em média 6,3% a produção e ocupou 80,4% a mais a linha em relação aos valores do cenário 1.

A partir da variação na vazão, pode-se constatar novamente o colapso no sistema, conforme resultado apresentado no Figura 15. É possível notar que o tanque equalizado atinge seu nível máximo em vários momentos da simulação.



**Figura 15** – Variação do volume do tanque equalizado com aumento da geração de efluente (vazão)

Fonte: Do autor, 2020.

Ao considerar, na simulação, a utilização de tratamento externo do efluente para atender toda a demanda, observa-se, nesse cenário, que seria necessário o envio de 24.862.32 m<sup>3</sup> em média para alcançar os mesmos valores observados no cenário 1.

#### 4.2.4 Resumo comparativo dos cenários

Neste trabalho foram simulados três cenários além do cenário base (dados de projeto):

- Cenário 1: variação da capacidade de tratamento da carga orgânica e comparação ao cenário base;
- Cenário 2: variação da DQO e comparação ao cenário 1;
- Cenário 3: variação da vazão e comparação ao cenário 1.

De acordo com a Tabela 9, observa-se que, no cenário 1, alterando os parâmetros de capacidade de tratamento em relação ao cenário base, todo efluente pode ser tratado sem haver impacto no volume de envase. No entanto, há um acréscimo de 6,98% na utilização da linha sem efetivamente aumentar a produção e gerando custos de produção ou restrição da utilização da linha para um possível aumento de demanda. Portanto, constata-se que o tratamento de efluentes é uma das principais prioridades da maioria das indústrias de refrigerantes.

**Tabela 9**

Valores médios dos indicadores do cenário 1 e desvio em relação ao cenário base

Cenários comparativos	DQO (mg/l)	Vazão fixa (m <sup>3</sup> /h)	Geração de efluente (m <sup>3</sup> )	Desvio relativo quanto à geração efluente (%)	Volume produzido (m <sup>3</sup> )	Desvio relativo quanto ao volume produzido (%)	Tempo de produção (h)	Desvio relativo quanto ao tempo de produção (%)
1 x Base	4592	6	69.894.81	0,53	23.804,01	0,15	642,94	6,98

Fonte: Do autor, 2020

Conforme falado anteriormente, uma possível solução para minimizar os impactos observados é considerar o tratamento externo do efluente de modo a evitar o colapso hidráulico no sistema e manter os indicadores de produção e de utilização de linha próximos aos cenários comparativos. Os resultados dessa simulação podem ser vistos na Tabela 10 na qual confirma-se que essa é uma solução factível, já que os volumes produzidos e o tempo de produção não tiveram desvio em relação ao cenário base.

**Tabela 10**

Valores médios dos indicadores do cenário 1 com tratamento externo e desvio em relação ao cenário base

Cenários comparativos	DQO (mg/l)	Vazão fixa (m <sup>3</sup> /h)	Volume de tratamento externo (m <sup>3</sup> )	Volume produzido (m <sup>3</sup> )	Desvio relativo quanto ao volume produzido (%)	Tempo de produção (h)	Desvio relativo quanto ao tempo de produção (%)
1 x Base	4592	6	2.381,04	23.840,00	0,00	601	0

Fonte: Do autor, 2020.

De acordo com Santos e Ribeiro (2005), a composição do efluente assim como a vazão são bastante variáveis. Os resultados dos cenários 2 e 3 demonstraram o impacto das variações de DQO e vazão, mantendo-se a capacidade de tratamento do cenário 1. É possível constatar, a partir dos dados da Tabela 11, que a variação de DQO e de vazão impactam diretamente o volume de produção e a disponibilidade de horas de linha.

**Tabela 11**

Valores médios dos indicadores do cenário 2 e 3 e desvio em relação ao cenário 1

Cenários comparativos	DQO (mg/l)	Vazão fixa (m <sup>3</sup> /h)	Geração de efluente (m <sup>3</sup> )	Desvio relativo quanto à geração efluente (%)	Volume produzido (m <sup>3</sup> )	Desvio relativo quanto ao volume produzido (%)	Tempo de produção (h)	Desvio relativo quanto ao tempo de produção (%)
2 x 1	8192	6	46.196,96	33,9	17.786,56	25,3	1.466,49	128,1
3 x 1	4592	26	89.433,88	28,0	22.504,34	6,3	1.159,80	80,4

Fonte: Do autor, 2020.

Com uma redução de 25,3% no volume de produção e aumento de 128,1% na utilização da linha em relação ao cenário 1, demonstra-se que a variação de DQO (cenário 2) afeta todo o sistema, reforçando que é necessário o comprometimento de todos os setores da indústria, monitoramento e controle rígido do processo para garantir a gestão dos efluentes e minimizar os impactos que reduzem a eficiência do tratamento de efluente, conforme citado por Sereno *et al.* (2013). No cenário 3, com o crescimento 28% na geração de efluente, também se constatou um impacto na utilização de linha (aumento de 80,4%) e no volume de produção (redução de 6,3%).

A Tabela 12 resume os volumes necessários para que sejam eliminados os impactos constatados nos cenários 2 e 3 por meio de tratamento externo.

**Tabela 12**

Valores médios dos indicadores do cenário 1, 2 e 3 com tratamento externo e desvio em relação ao cenário base e cenário 1

Cenários comparativos	DQO (mg/l)	Vazão fixa (m <sup>3</sup> /h)	Volume de tratamento externo (m <sup>3</sup> )	Volume produzido (m <sup>3</sup> )	Desvio relativo quanto ao volume produzido (%)	Tempo de produção (h)	Desvio relativo quanto ao tempo de produção (%)
<b>1 x Base</b>	4592	6	2.381,04	23.840,00	0,00	601	0
<b>2 x 1</b>	8192	6	26.796,24	23.799,00	0,1	654,12	1,7
<b>3 x 1</b>	4592	26	24.862,32	23.800,14	0,1	648,78	0,9

Fonte: Do autor, 2020

Os resultados desses cenários norteiam os gestores na avaliação de alternativas para minimizar os impactos identificados e auxiliam na tomada de decisão a fim de melhor atenderem a fábrica ou servirem como base para novos projetos que solucionarão o problema de maneira definitiva.

## 5 CONCLUSÃO

Ao desenvolver um modelo de simulação de eventos discretos para simular os processos de produção de refrigerantes, com foco na gestão de efluentes, foi possível analisar o impacto causado no volume produzido e na disponibilidade de uma linha de produção por meio da variação dos principais parâmetros de processos – DQO, vazão e capacidade de tratamento da carga orgânica.

Neste trabalho foram simulados quatro cenários, o cenário-base e mais três cenários, considerando um período de simulação de 1.680 horas, a fim de se avaliar a relação e impacto da capacidade de tratamento da fábrica analisada, as variações de DQO e de vazão no processo de fabricação de refrigerantes. De acordo com os resultados das simulações, pode-se concluir que:

1. No cenário-base, os reatores de tratamento foram parametrizados com a capacidade nominal de projeto, e, no cenário 1, com a capacidade atual de tratamento, que é menor do que a de projeto. Ao comparar os dois resultados é possível perceber um impacto direto na disponibilidade de linha, sendo que no cenário 1 foram necessárias mais horas de utilização da linha de produção para produzir o mesmo volume de bebidas. Esse estudo é relevante, já que auxilia os gestores a tomar decisões quanto à necessidade de aumento da capacidade de tratamento e buscar soluções alternativas, como tratamento externo.
2. No cenário 2, procurou-se demonstrar o impacto da variação da DQO no sistema. A DQO é uma variável inerente ao efluente gerado. Portanto, é necessário, além da compreensão técnica, o comprometimento de todos, já que as variações desse parâmetro, como demonstrado, impactam significativamente o volume produzido e a disponibilidade de linha. Um aumento do perfil da DQO de 4.592 mg/l para 8.192 mg/l causou um colapso no sistema, reduzindo em 28% o volume produzido com um aumento da utilização de linha de 128% em relação aos resultados do cenário 1. É importante ressaltar que, neste trabalho, respeitou-se a capacidade de tratamento da estação, cabendo ao gestor, ao deparar-se com esse cenário, avaliar as causas da mudança do perfil da DQO para reduzi-la ou buscar soluções para o aumento da capacidade de tratamento. Nesse cenário, também foi considerado o tratamento externo, cabendo ao gestor analisar os custos e viabilidade.
3. O incremento da vazão da geração de efluentes foi analisado no cenário 3. Considerando um acréscimo de 20 m<sup>3</sup>/h, observou-se uma redução de 6,3% no volume produzido e aumento de utilização de linha de 80% em relação ao cenário 1. Esse cenário é importante para o gestor já que o direciona na tomada de decisão quando é necessária a concepção de um novo projeto ou há alteração do processo atual gerando maior volume de efluente.

Como conclusão final, pode-se afirmar que a simulação de eventos discretos demonstrou ser uma ferramenta eficaz para o estudo do processo de geração de efluentes em uma indústria de refrigerantes, já que permitiu avaliar os impactos diretos dos parâmetros escolhidos no volume produzido e na disponibilidade de linha da fábrica analisada.

## REFERÊNCIAS

- Antonelli, D., Litwin, P., & Stadnicka, D. (2018). Multiple system dynamics and discrete event simulation for manufacturing system performance evaluation, *Procedia CIRP*, 78, 178-183.
- Carvalho, K. Q. de. (2002). *Resposta dinâmica dos reatores UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket) submetidos a cargas orgânicas e hidráulicas cíclicas: modelação matemática simplificada*. Dissertação de mestrado, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, Brasil.
- Chernicharo, C. A. L. (1997). *Princípios do tratamento biológico de águas residuárias: reatores anaeróbios*. (1a ed). Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais.
- Chwif, L.; & Medina, A. (2006) *Modelagem e simulação de eventos discretos: teoria e aplicações*. (1a ed). São Paulo: Ed. dos Autores.
- Ferreira, D., Morabito, R., & Rangel, S. (2009). Solution approaches for the soft drink integrated production lot sizing and scheduling problem. *European Journal of Operational Research*, 196 (2), 697-706.
- Freitas, R. O. M. de, (2017). *Análise do abastecimento hídrico de Belo Horizonte e Região Metropolitana: uma abordagem por meio de dinâmica de sistemas*. Dissertação de mestrado, Faculdade IETEC, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil.
- Glenn, S. L.; Norris, R. T., Jr. & Sommerfeld, J. T. (1990) Discrete-event simulation in wastewater treatment. *Journal of Environmental Science and Health. Part A: Environmental Science and Engineering and Toxicology*, 25 (4), 407-423.
- Hsine, E. A., Benhammou, A., & Pons, M. N. (2004, March). Design of a beverage industry wastewater treatment facility using process simulation. *9th IFAC International Symposium on Computer Applications in Biotechnology*, Nancy, France, 299-302.
- Jovanoski, B., Minovski, R., Voessner, S. & Lichtenegger, G. (2012). Combining system dynamics and discrete event simulations: overview of hybrid simulation models. *Journal of Applied Engineering Science*, 10, 135-142.
- Medeiros, F. S. B., Rodrigues, G. O., Simonetto, E. de O. & Santos, W. F. (2020). Use of systems dynamics for comparative between rail and road models for the transport of solid urban waste. *Revista Gestão & Tecnologia*, 20 (3), 80-105.
- Nicoletti, A., Jr., Correa, M. S., Oliveira, M. C. de & Helleno, A. L. (2016). Simulação de eventos discretos para análise da disponibilidade fabril em uma linha de envase de bebidas. *Revista de Ciência & Tecnologia*, 19 (37), 19-29.
- Osterroth, I., Klein, S., Nophut, C. & Voigt, T. (2017). Operational state related modelling and simulation of the electrical power demand of beverage bottling plants. *Journal of Cleaner Production*, 162, 587-600
- Ramos, V. M. N., Ferreira, D. (2017). Planejamento da produção na indústria de bebidas não alcoólicas: um novo modelo matemático. Trabalho apresentado no XXXVII CNMAC, São José dos Campos, SP, Brasil.
- Revista Abir. *Panorama brasileiro da indústria de bebidas não alcoólicas*. Recuperado em 12 fevereiro, 2020 de <https://abir.org.br/abir/wp-content/uploads/2019/01/REVISTA-ABIR-2019.pdf>

- Rodrigues, L. S., Lopes, B. C., Lima, C.A., Ribeiro, M. C., Santos, R. P. & Silva, I. J. (2016) Tratamento de efluentes de abatedouro de frangos por meio de reator UASB seguido de filtro anaeróbio. *Arquivo Brasileiro de Medicina Veterinária e Zootecnia*, 68 (1), 97-103.
- Sachidananda, M., Erkoyuncu, J., & Steenstra, S. (2016). Discrete event simulation modelling for dynamic decision making in biopharmaceutical manufacturing. *Procedia CIRP*, 49, 39-44.
- Santos, M. S. dos; Ribeiro, F. M. (2005). *Cervejas e refrigerantes*. São Paulo, SP: CETESB.
- Sereno, J. A., Filho, Santos, A. F. de M. S., Bahé, J. M. C. de F., Gobbi, C. N., Lins, G. A. & Almeida, J. R. de (2013) . Tratamento de efluentes da indústria de bebidas em reator anaeróbio de circulação interna (IC). *Revista Internacional de Ciências*, 3 (1), 21-42.
- Souza, W. A. P. de, Martins, J. H., Amantéa, R. P. & Fortes, M. (2021). Simulação do processo de triagem neonatal usando modelagem por eventos discretos. *Revista Gestão & Tecnologia*, 17 (2), 111-133.
- Toscano, A., Ferreira, D., & Morabito, R. A. (2019). Decomposition heuristic to solve the two-stage lot sizing and scheduling problem with temporal cleaning. *Flexible Services and Manufacturing Journal*, 31 (1), 142-173.
- Zandieh, M., & Motallebi, S. (2018). Determination of production planning policies for different products in process industries: using discrete event simulation. *Production Engineering*, 12 (6), 737-746.