

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA
FACULDADE DE ENGENHARIA
ENGENHARIA AMBIENTAL E SANITÁRIA**

Luís Fernando Oliveira Cuco

Análise crítica de projetos de reatores UASB e concepção de sistema pré-fabricado de distribuição de esgoto para reatores de escala plena

**Juiz de Fora
2019**

Luís Fernando Oliveira Cuco

Análise crítica de projetos de reatores UASB e concepção de sistema pré-fabricado de distribuição de esgoto para reatores de escala plena

Trabalho Final de Curso apresentado ao colegiado do curso de Engenharia Ambiental e Sanitária da Universidade Federal de Juiz de Fora como requisito parcial a obtenção do título de Engenheiro Ambiental e Sanitarista.

Orientador: Dr. Edgard Henrique de Oliveira Dias

Coorientador: Dr. Paulo Gustavo Sertório de Almeida

Juiz de Fora

2019

Luís Fernando Oliveira Cuco

Análise crítica de projetos de reatores UASB e concepção de sistema pré-fabricado de distribuição de esgoto para reatores de escala plena

Trabalho Final de Curso apresentado ao colegiado do curso de Engenharia Ambiental e Sanitária da Universidade Federal de Juiz de Fora como requisito parcial a obtenção do título de Engenheiro Ambiental e Sanitarista.

Aprovada em 04 de dezembro de 2019

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Edgard Henrique de Oliveira Dias – Orientador
Universidade Federal de Juiz de Fora

Prof. Dr. Paulo Gustavo Sertório de Almeida – Coorientador
Universidade Federal de Minas Gerais

Prof. Dr. Emanuel Manfred Freire Brandt
Universidade Federal de Juiz de Fora

Prof.^a. Dr.^a Renata de Oliveira Pereira
Universidade Federal de Juiz de Fora

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente aos meus pais, José e Regina, por terem possibilitado todas as minhas conquistas, pela paciência e amor incondicional; meu irmão Pedro pelo apoio e por estar sempre presente nos momentos difíceis; a todos os amigos e familiares pelo incentivo e apoio durante essa jornada.

Agradeço a todos os professores do Departamento de Engenharia Ambiental e Sanitária e da UFJF com quem pude aprender e evoluir ao longo do curso. Em especial aos professores Edgard Dias, Emanuel Brandt e Paulo Almeida pelas orientações, confiança e oportunidades. Aos professores Otávio de Aquino Branco e Maria Helena por estarem sempre disponíveis a ajudar.

A Porte Empresa Júnior e a Secretaria de Meio Ambiente e Ordenamento Urbano pela oportunidade de crescimento profissional e pessoal.

E finalmente a todos os envolvidos na execução deste trabalho que de alguma forma contribuíram.

RESUMO

A aplicação de Reatores Anaeróbios de Fluxo Ascendente (UASB) no tratamento de esgotos domésticos é uma alternativa tecnológica potencial para o setor de saneamento no Brasil. No entanto, problemas tem sido reportados em estações de tratamento de esgoto (ETEs), no que tange a inadequações de projeto, construção e operação órgãos constitutivos dos reatores UASB, a exemplo dos dispositivos de distribuição de esgoto, coleta de efluente tratado, gerenciamento de lodo, espuma e gases. Tal fato compromete o desempenho da tecnologia, implicando em prejuízos a adequada operação da ETE e eficiência no tratamento de esgoto. Apesar dos estudos técnicos e científicos e normatizações, a sistematização e padronização de métodos para a concepção desse sistema ainda tende a ser um desafio no que se refere ao adequado funcionamento da tecnologia. Este trabalho apresenta uma revisão da literatura visando a sistematização e a análise crítica de recomendações e critérios relativos ao dimensionamento e projeto de dispositivos componentes de reatores UASB. Em seguida, um estudo de caso é apresentado com o objetivo de propor uma alternativa simplificada para a padronização de órgãos constitutivos, com ênfase em dispositivos de distribuição do afluente (esgoto pré-tratado).

Palavras chave: reatores UASB, padronização de projetos, sistema de distribuição do esgoto.

ABSTRACT

The application of Upflow Anaerobic Sludge Blanket (UASB) reactors in the treatment of domestic wastewater is a potentially alternative to improve the sanitation sector in Brazil. Despite the potential and numerous advantages of this technology, several problems have been reported in wastewater treatment plants (WWTP) regarding the design, construction and operation of UASB reactors, more specifically associated with auxiliary devices, like distribution system, treatment effluent collection system, sludge and gas management. This compromises the better use of this treatment system, which could result in several problems to the operation and maintenance of the WWTP and, consequently, the treatment efficacy. Although there are numerous technical and scientific studies on the subject, the main difficulties are associated with the lack of standardization of design strategies of UASB reactors. Within this context, this work proposes a literature review on legislations and specialized technical books, papers and reports followed by a critical analysis of recommendations and design criteria related of UASB reactors, with the aim at seeking alternatives to design, construction and operation of auxiliary devices of this wastewater treatment system. It is also presented a case study involving the design of a pre-made, standardized distribution system for a full-scale WWTP.

Keywords: UASB reactor, project standardization, wastewater distribution system

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Índice de atendimento urbano por rede coletora de esgotos, por estado, para o ano de 2017 (faixa percentual).	1
Figura 2. Esquema simplificado de um reator UASB. Fonte: Chernicharo (2007).....	5
Figura 3. Dispositivos e órgãos constitutivos de reatores UASB, e principais aspectos de atenção associados.	11
Figura 4. Sistema de remoção hidrostática de espuma. 1) Operação normal do reator: a linha de biogás está pressurizada e o nível de espuma está abaixo do nível da borda superior da calha interna (cerca de 5 cm). 2) Alívio da pressão interna da coifa de biogás: elevação do nível de espuma e sua captação pela calha interna. 3) Fechamento do registro de esgotamento da calha interna. 4) Retorno à condição operacional com o aumento da pressão interna da linha de biogás.	15
Figura 5. Problemas associados a entrada do esgoto e saída do efluente tratado em reatores UASB.	21
Figura 6. Problemas associados ao acúmulo de espuma em reatores UASB.	22
Figura 7. Problemas em dispositivos de amostragem e descarte de lodo em reatores UASB.	22
Figura 8. Corrosão de estruturas em ETE.	26
Figura 9. Esquema da configuração atual da ETE: acima (reatores UASB 1 a 4) a linha de reatores sem órgãos constitutivos instalados; abaixo (reatores UASB 5 a 8) a linha de reatores com instalação plena.	28
Figura 10. Esquema da caixa de distribuição de vazão existente na ETE.	30
Figura 11. Adução de esgoto e canal de distribuição da fase líquida para o interior de reatores UASB.	31
Figura 12. Tubos para distribuição do afluente nos reatores UASB. A esquerda, vista interna do reator; à direita, tubos e vertedores triangulares no canal de distribuição de esgoto bruto.	32
Figura 13. Tubos de distribuição do afluente no fundo e bocais nos reatores UASB.	34
Figura 14. Tubos de distribuição com 3 (três) vertedores triangulares.....	35
Figura 15. Áreas de influência dos tubos de distribuição do afluente no fundo dos reatores UASB conforme proposta de adequação.	37
Figura 16. Placas pré-moldadas de concreto acima dos compartimentos de decantação dos reatores UASB.	38
Figura 17. Áreas de influência dos tubos de distribuição do afluente no fundo dos reatores UASB.	39
Figura 18. Representação da localização das placas pré-moldadas em concreto, acima dos compartimentos de decantação dos reatores UASB.	39

Figura 19. Esquema da configuração proposta para alocação dos novos compartimentos de distribuição (caixas e canais).....	40
Figura 20. Representação das cotas de projeto para alocação dos novos compartimentos de distribuição propostos para os reatores UASB.....	41
Figura 21. Caixa de distribuição do esgoto proposta para os reatores UASB.	42
Figura 22. Esquema do canal de distribuição proposto para os reatores UASB.	43
Figura 23. Configuração proposta para um módulo de reator UASB.	43
Figura 24. Esquema em corte transversal da configuração proposta para um módulo de reator UASB.....	45
Figura 25. Esquema em corte longitudinal da configuração proposta para um módulo de reator UASB.....	46

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Índices de coleta e tratamento de esgotos em 2017, segundo o SNIS.....	2
Tabela 2. Índices de coleta e tratamento de esgotos em 2013, segundo a ANA.....	2
Tabela 3. Tempos de detenção hidráulica para projeto de reatores UASB.....	6
Tabela 4. Tempos de detenção hidráulica para projeto de reatores UASB.....	7
Tabela 5. Velocidades ascendentes (m/h) no reator UASB, conforme norma técnica.....	9
Tabela 6. Critérios e parâmetros de projeto para o pré-dimensionamento de reatores UASB	10
Tabela 7. Diretrizes para a área de influência de distribuidores de vazão em reatores UASB.	12
Tabela 8. Problemas operacionais associados ao não atendimento de recomendações referentes a dispositivos de entrada de afluente em reatores UASB.....	20
Tabela 9. Problemas operacionais associados ao não atendimento das recomendações relativas a dispositivos do compartimento de decantação e de coleta do efluente tratado em reatores UASB.....	21
Tabela 10. Problemas operacionais associados ao não atendimento das recomendações relativas a dispositivos de gerenciamento de espuma em reatores UASB.....	22
Tabela 11. Problemas operacionais associados ao não atendimento das recomendações relativas a dispositivos de amostragem e descarte de lodo em reatores UASB.	23
Tabela 12. Problemas operacionais associados ao não atendimento das recomendações relativas a dispositivos de gerenciamento de biogás em reatores UASB (continua).....	24
Tabela 13. Problemas operacionais associados ao não atendimento das recomendações relativas a dispositivos de gerenciamento de emissões fugitivas em reatores UASB.....	25
Tabela 14. Vazões de projeto da ETE.....	29
Tabela 15. Dimensões úteis de cada reator UASB	29
Tabela 16. Síntese dos parâmetros do sistema de distribuição do afluente nos reatores UASB 5 a 8 considerando propostas de adequação.....	37

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	1
2.	OBJETIVOS	4
3.	REVISÃO DA LITERATURA	5
3.1.	Diretrizes para o pré-dimensionamento de reatores UASB	6
3.2.	Dispositivos e órgãos constitutivos de reatores UASB	10
3.2.1.	Dispositivos de distribuição de afluente	11
3.2.2.	Dispositivos do compartimento de decantação e de coleta do efluente tratado .	13
3.2.3.	Dispositivos de coleta de espuma	14
3.2.4.	Dispositivos de amostragem de lodo	15
3.2.5.	Dispositivos de descarte de lodo	16
3.2.6.	Dispositivos de gerenciamento de gases.....	17
3.2.6.1.	Gerenciamento do Biogás	17
3.2.6.2.	Gerenciamento de emissões fugitivas.....	18
3.3.	Principais problemas operacionais	19
3.4.	Análise crítica sobre problemas em órgãos constitutivos de reatores UASB	26
4.	MATERIAL E MÉTODOS	27
4.1.	Estudo de caso	27
5.	ESTUDO DE CASO	30
5.1.	Caracterização e avaliação do sistema de distribuição de afluente já implantados... 30	
5.1.1.	Sistema de distribuição de afluente no topo dos reatores UASB.....	31
5.1.2.	Distribuição do esgoto no fundo dos reatores UASB 5 a 8	33
5.1.3.	Comentário sobre inconformidades do sistema de distribuição implantado.....	34
5.2.	Propostas de adequação do sistema de distribuição de esgoto.....	35
5.2.1.	Vertedores dos canais de distribuição.....	35
5.2.2.	Parte vertical dos tubos de distribuição	35
5.2.3.	Parte horizontal dos tubos de distribuição	36
5.3.	Proposição preliminar para sistema de distribuição de reatores UASB	37
6.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	47
7.	REFERÊNCIAS.....	48

1. INTRODUÇÃO

O lançamento de esgotos, sejam domésticos ou não domésticos, sem tratamento em corpos hídricos é responsável pela deterioração da qualidade das águas, impactando a saúde pública e o meio ambiente, e prejudicando os diversos usos desse importante recurso. Embora o tratamento adequado dos esgotos sanitários seja fundamental, o Brasil ainda apresenta um déficit significativo no atendimento a esse serviço (ANA, 2017).

Diante desse cenário, o Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS) fornece informações e indicadores acerca de aspectos da gestão dos serviços de saneamento no Brasil: água, esgoto, resíduos sólidos e drenagem urbana. A Figura 1 apresenta os índices de atendimento urbano de coleta de esgoto nos estados brasileiros em 2017.

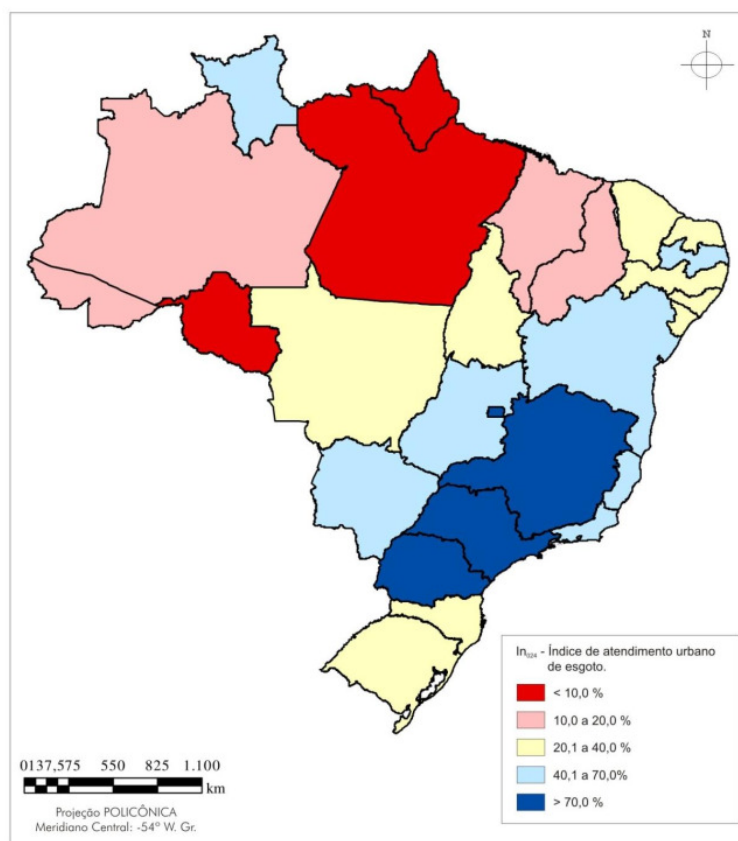


Figura 1. Índice de atendimento urbano por rede coletora de esgotos, por estado, para o ano de 2017 (faixa percentual).
Fonte: SNIS 2019.

Estima-se que, no Brasil, o índice de atendimento da população urbana com sistemas de coleta de esgotos seja de 52,4%, ao passo que o índice de tratamento de esgotos gerados e coletados são, respectivamente, 46,0% e 73,7%. Na Tabela 1 são apresentados índices de coleta e tratamento de esgoto no ano de 2017 no Brasil, na macrorregião Sudeste e no estado de Minas Gerais, conforme o SNIS. Já na Tabela 2 são apresentados os mesmos dados, conforme levantamento da Agência Nacional de Águas (ANA) para o ano de 2013.

Tabela 1. Índices de coleta e tratamento de esgotos em 2017, segundo o SNIS.

Localidade	Coleta de esgoto (%)	Tratamento de esgoto gerado (%)	Tratamento do esgoto coletado (%)
Brasil	52,4	46,0	73,7
Sudeste	78,6	50,4	67,3
Minas Gerais	70,0	37,9	41,6

Fonte: SNIS (2019).

Tabela 2. Índices de coleta e tratamento de esgotos em 2013, segundo a ANA.

Localidade	Coleta de esgoto (%)	Tratamento de esgoto (%)	Tratamento do esgoto coletado (%)
Brasil	61,4	42,6	69,4
Sudeste	83,0	54,0	65,0
Minas Gerais	86,0	44,0	51,0

Fonte: ANA (2017).

Como se observa, no âmbito nacional, uma parcela de 40% a 50 % de todo esgoto gerado não é sequer coletado, enquanto menos da metade de todo o esgoto gerado tratado. No âmbito estadual, o percentual de esgoto coletado se eleva, mas a parcela de esgoto tratado, em relação ao coletado, diminui consideravelmente.

Nesse contexto, a busca por soluções eficazes e de baixo custo para o tratamento de esgotos domésticos se faz necessária para melhorias em relação ao atual cenário do saneamento em todos os âmbitos. Sendo assim, a implementação de Reatores Anaeróbios de Fluxo Ascendente (RAFA), ou em inglês *Upflow Anaerobic Sludge Blanket* (UASB), vem sendo uma opção bem aceita, considerando as vantagens na aplicação dessa tecnologia. Esses reatores apresentam, em relação a técnicas de tratamento aeróbio, vantagens como baixo custo de implantação e operação, baixa produção de lodo, baixo consumo de energia, além de ser um sistema compacto e com baixa demanda de área. O potencial de aplicação dessa

tecnologia é nitidamente comprovado pela sua ampla utilização no Brasil, que é o país com o maior número de reatores anaeróbios para tratamento de esgotos domésticos no mundo. Além disso, aproximadamente 40% de todas as estações de tratamento de esgoto (ETEs) nas regiões Sul, Sudeste e Centro-Oeste adotam essa forma de tratamento (CHERNICHARO *et al.*, 2018).

No entanto, para o bom desempenho da tecnologia, é fundamental a adequada implementação do sistema em termos de projeto e operação. Inúmeros aspectos associados às etapas de concepção do projeto e processos construtivos são observados, resultando em problemas operacionais. Muitos desses entraves estão diretamente relacionados à inadequação de órgãos constitutivos do sistema, como os de distribuição de afluente, coleta de efluente, sistemas de gerenciamento de espuma, lodo e gases (MIKI, 2010).

Buscando favorecer a adequada aplicação da tecnologia (reatores UASB), e conseqüentemente o aprimoramento deste sistema para o tratamento de esgotos domésticos, o presente trabalho pretende contribuir reunindo os principais aspectos técnicos e problemas envolvendo a implantação de órgãos constitutivos nos reatores UASB, possibilitando o entendimento das dificuldades associadas ao processo e o desenvolvimento de soluções. Adicionalmente, este estudo contribui especificamente na busca de alternativas para a correção de problemas de projeto, construção e operação de dispositivos de distribuição de afluente em ETEs, através do estudo de caso realizado.

2. OBJETIVOS

Os objetivos deste trabalho foram:

- Apresentar uma síntese de atualizações em termos de critérios e recomendações técnicas para o projeto de reatores UASB tratando esgotos domésticos;
- Apresentar uma análise crítica sobre problemas de projeto e implementação de órgãos constitutivos do sistema (reatores UASB);
- Avaliar o sistema de distribuição de afluente de reatores UASB de uma ETE em escala real e propor uma padronização simplificada para o sistema de distribuição do esgoto.

3. REVISÃO DA LITERATURA

O processo de tratamento de esgoto por reatores UASB consiste, basicamente, no fluxo ascensional do efluente através de uma massa de lodo densa, caracterizada pela atividade da biomassa anaeróbia, com elevado tempo médio de residência, responsável pela estabilização da matéria orgânica. O lodo é mais denso no fundo (leito de lodo) e mais leve e disperso na parte superior (manta de lodo). O efluente é inserido ao sistema pelo fundo e, a mistura decorrente do fluxo ascendente e da geração de gases é fundamental para favorecer o contato da biomassa com o substrato. Ainda, deve-se prever um sistema de separação da fase gasosa, garantindo a sedimentação dos sólidos na parte superior do reator (CHERNICHARO, 2007).

Os reatores UASB convencionais apresentam alguns componentes fundamentais para o bom funcionamento do sistema. A câmara de digestão, na qual o esgoto ascende pelo leito e manta de lodo, é o local onde ocorre a digestão anaeróbia da matéria orgânica presente no efluente a ser tratado. O separador trifásico consiste em um dispositivo para separação física das fases sólida, líquida e gasosa. A zona de sedimentação, onde ocorre a ascensão do líquido, para os vertedores de coleta, com velocidade propícia à sedimentação dos sólidos que retornam ao compartimento de digestão. A zona de acumulação de gases, que fica na parte superior sendo responsável por reter os gases gerados durante a digestão anaeróbia para posterior aproveitamento ou queima. Os defletores de gás têm a função de direcionar os gases para o separador trifásico impedindo o arraste de sólidos para os vertedores de coleta. (JORDÃO E PESSOA, 2017). A Figura 2 representa esquematicamente os componentes básicos de um reator UASB.

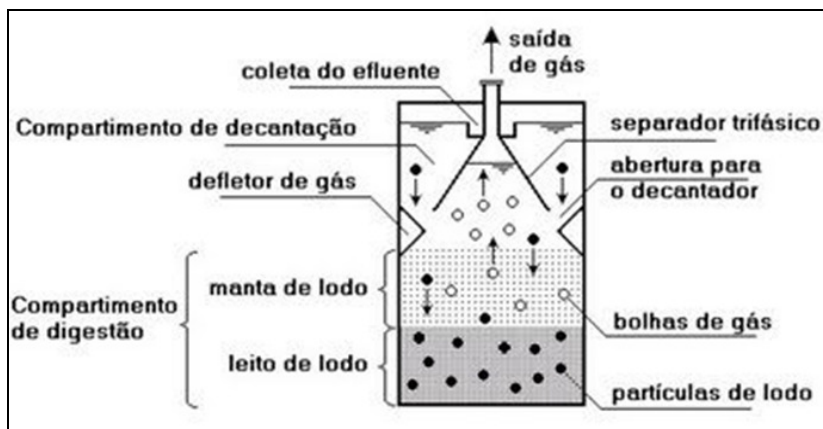


Figura 2. Esquema simplificado de um reator UASB. Fonte: Chernicharo (2007).

O afluente é conduzido pelo fundo do tanque, através de um sistema de distribuição, que tem a função de promover um fluxo ascendente e homogêneo do esgoto, de modo a manter o adequado contato entre a biomassa e o substrato. Neste reator, a remoção do lodo excedente deve ser realizada para que não haja perda de sólidos junto ao efluente final e comprometa a eficiência do tratamento. O descarte de lodo é realizado com base em concentrações de sólidos ao longo do compartimento de digestão, por sua vez obtidas por meio de dispositivos de gerenciamento de lodo (MIKI, 2010).

Outra questão importante refere-se à formação de espuma durante o processo, que pode se acumular no interior dos separadores trifásicos e solidificar. Nesse caso, pode impedir à passagem do biogás, comprometer a retenção de sólidos e causar danos a estruturas devido ao aumento da pressão interna, devendo ser previstos dispositivos para controle dessa espuma (LOBATO *et al.*, 2018). Ainda, deve-se atentar aos gases gerados pela digestão anaeróbia que tendem a se desprender e causar problemas de corrosão em estruturas, odores e intensificar a difusão de gases de efeito estufa, devendo ser previstos dispositivos para sua captação e gerenciamento. (BRANDT *et al.*, 2018).

3.1. Diretrizes para o pré-dimensionamento de reatores UASB

Quanto a aplicação de reatores UASB no tratamento de esgotos domésticos, tem-se que a eficiência média de remoção de matéria orgânica, considerando um reator operando adequadamente é de aproximadamente 65% para DQO e 70% para DBO. Tais valores estão diretamente associados ao tempo de detenção hidráulica (TDH) no reator (JORDÃO E PESSOA, 2017). O TDH a ser adotado pode seguir as recomendações da ABNT NBR 12.209/2011 (ABNT, 2011), conforme indicado na Tabela 3, de acordo com a variação da temperatura (T) do esgoto e considerando vazões médias de projeto.

Tabela 3. Tempos de detenção hidráulica para projeto de reatores UASB

Temperatura do esgoto - T (°C)	Tempo de detenção hidráulica - TDH (h)
T > 25	TDH ≥ 6
22 < T < 25	TDH ≥ 7
18 < T < 21	TDH ≥ 8
15 < T < 17	TDH ≥ 10

Fonte: ABNT (2011)

Chernicharo (2007) recomenda os valores apresentados na Tabela 4, para vazões média (Q_{med}) e máxima (Q_{max}) e considerando a temperatura do esgoto.

Tabela 4. Tempos de detenção hidráulica para projeto de reatores UASB

Temperatura do esgoto - T (°C)	Tempo de detenção hidráulica - TDH (h)	
	Q_{med}	Q_{max}
T > 25	TDH ≥ 6	TDH ≥ 4,0
22 < T < 25	TDH ≥ 7	TDH ≥ 4,5
18 < T < 22	TDH ≥ 8	TDH ≥ 5,5
15 < T < 18	TDH ≥ 10	TDH ≥ 7,0

Fonte: Chernicharo (2007).

Adotado o TDH e considerando a vazão média de projeto (Q_{med}), calcula-se o volume (V) do reator UASB a partir da Eq. 1 (CHERNICHARO, 2007; JORDÃO E PESSOA, 2017).

$$V = Q_{med} \times TDH \quad \text{Eq. 1}$$

Onde:

V = volume do reator (m³)

Q_{med} = vazão média (m³/d); TDH = tempo de detenção hidráulica (d).

O inverso do TDH fornece o parâmetro de carga hidráulica volumétrica (CHV), que representa a vazão de esgotos aplicados por unidade de volume do reator, sendo representado pela Eq. 2 (CHERNICHARO, 2007). Aplicações práticas indicam que a CHV não deve ser maior do que 5,0 m³/m³.d (CHERNICHARO, 2007).

$$CHV = \frac{Q_{med}}{V} \quad \text{Eq. 2}$$

Onde:

V = volume do reator (m³)

CHV = carga hidráulica volumétrica (m³/m³.d)

Q_{med} = vazão média (m³/d)

Ainda, pode-se optar pelo parâmetro da carga orgânica volumétrica (COV) aplicada, que se relaciona ao TDH, através da Eq. 3 (CHERNICHARO, 2007; JORDÃO E PESSOA, 2017). No caso de esgotos domésticos os valores típicos de carga orgânica volumétrica aplicada se encontram entre 2,5 a 3,5 kgDQO/m³.d (CHERNICHARO, 2007; CAMPOS, 1999 *apud* JORDÃO E PESSOA, 2017).

$$V = Q_{med} \times \frac{S_0}{COV} \quad \text{Eq. 3}$$

Onde:

V = volume do reator (m³)

Q_{med} = vazão média (m³/d)

S₀ = DQO afluente (kgDQO/m³)

COV = carga orgânica volumétrica (kgDQO/m³.d).

Analogamente, pode se optar também pela determinação do volume considerando a carga biológica (CB), ou seja, a carga orgânica aplicada por unidade de biomassa presente no reator, conforme a Eq. 4 (CAMPOS, 1999 *apud* JORDÃO E PESSOA, 2017; CHERNICHARO, 2007). A concentração de STV pode ser determinada em condições controladas de laboratório. Para tratamento de esgotos domésticos, Chernicharo (2007) recomenda aplicações de CB entre 0,30 a 0,50 kgDQO/kgSTV.d, ao passo que Campos (1999, *apud* JORDÃO E PESSOA, 2017) recomenda 0,30 a 0,40 kgDQO/kgSTV.d.

$$CB = \frac{Q_{med} \times S_0}{STV \times V} \quad \text{Eq. 4}$$

Onde:

V = volume do reator (m³).

CB = carga biológica (kgDQO/kgSTV.d)

Q_{med} = vazão média (m³/d)

S₀ = DQO afluente (kgDQO/m³)

STV = sólidos totais voláteis (kgSTV/m³),

Posteriormente, pode se adotar a velocidade ascensional no compartimento de digestão (v), parâmetro este que leva em consideração o melhor contato entre o substrato e a biomassa, garante o TDH do projeto, além de permitir o cálculo da área da seção transversal (A) do reator pela Eq. 5 (CHERNICHARO, 2007; JORDÃO E PESSOA, 2017). Os limites máximos de velocidades ascensionais no compartimento de digestão, para cada vazão, podem ser definidos conforme recomendação da ABNT NBR 12.209/2011 (ABNT, 2011) ou Chernicharo (2007), de acordo com a Tabela 5. Para vazões de pico (Q_{pico}), com duração entre 2h e 4h, recomenda-se velocidade ascensional igual ou inferior a 1,5 m/h (CAMPOS, 1999 *apud* JORDÃO E PESSOA, 2017; LETTINGA E HULSHOFF POL, 1995 *apud* CHERNICHARO, 2007).

$$A = \frac{Q_{med}}{v} \quad \text{Eq. 5}$$

Onde:

A = área da seção transversal do reator (m^2)

Q_{med} = vazão média (m^3/h)

v = velocidade ascensional do fluxo (m/h).

Tabela 5. Velocidades ascendentes (m/h) no reator UASB, conforme norma técnica.

Vazão	Velocidade ascensional (m/h)	
	ABNT (2011)	Chernicharo (2007)
Vazão média	$\leq 0,7$	0,5 – 0,7
Vazão máxima	$\leq 1,2$	$\leq 1,1$

A profundidade (ou altura) do reator é um parâmetro que pode ser calculado a partir do volume e área da seção transversal (previamente determinada com base na velocidade ascensional). Ou ainda, pode ser fixada, com a posterior verificação da área, velocidade ascensional e TDH. A ABNT NBR 12.209/2011 (ABNT, 2011) recomenda profundidade útil de 4,0 m a 6,0 m, com mínimo de 2,5 m para o compartimento de digestão e 1,5 m para o de decantação. Chernicharo (2007) recomenda profundidade útil entre 4,0 m e 5,0 m, sendo a do compartimento de digestão entre 2,5 m e 3,5 m, e o de decantação entre 1,5 m e 2,0 m. A Tabela 6 apresenta uma síntese dos principais critérios e parâmetros de projeto para o dimensionamento de reatores UASB aplicados ao tratamento de esgotos domésticos.

Tabela 6. Critérios e parâmetros de projeto para o pré-dimensionamento de reatores UASB

Critérios e parâmetros de projeto	Valores recomendados	Referência	
Tempo de detenção hidráulica (h) *conforme vazões e temperatura (T) do esgoto em °C	Q_{med}	≥ 6 (T > 25)	Chernicharo, 2007
		≥ 7 (22 < T < 25)	
		≥ 8 (18 < T < 22)	
	≥ 10 (15 < T < 18)		
	Q_{max}	≥ 4 (T > 25)	
$\geq 4,5$ (22 < T < 25)			
$\geq 5,5$ (18 < T < 22)			
	≥ 7 (15 < T < 18)		
Carga hidráulica volumétrica (m ³ /m ³ .d)	≤ 5	Chernicharo, 2007	
Carga orgânica volumétrica (kgDQO/m ³ .d)	2,5 – 3,5	Campos, 1999 <i>apud</i> Jordão e Pessoa, 2017; Chernicharo, 2007	
Carga biológica (kgDQO/kgSTV.d)	0,30 – 0,50	Chernicharo, 2007	
Velocidade ascensional (m/h)	$Q_{med} \leq 0,7$	ABNT, 2011	
	$Q_{max} \leq 1,2$		
	$Q_{pico} \leq 1,5$		
Profundidade útil do reator (m)	4 – 6	ABNT, 2011	
Profundidade útil do compartimento de digestão (m)	2,5 – 3,5	Chernicharo, 2007	
Profundidade útil do compartimento de decantação (m)	1,5 – 2,0	Chernicharo, 2007	

3.2. Dispositivos e órgãos constitutivos de reatores UASB

O projeto de reatores UASB deve prever a instalação de diversos dispositivos auxiliares para o bom funcionamento do sistema. Tais dispositivos irão interferir em aspectos operacionais e de manutenção nos reatores, podendo levar, em alguns casos, à perda de eficiência em termos de remoção de constituintes presentes no esgoto. Problemas referentes à implantação desses dispositivos têm sido reportados pela literatura (CHERNICHARO *et al.*, 2018).

A Figura 3 identifica os principais órgãos constitutivos de reatores UASB, em relação aos quais frequentemente observa-se problemas em sistemas de escala plena. Em linhas gerais, os dispositivos de distribuição do efluente, coleta do efluente tratado, remoção de espuma e lodo, bem como dispositivos de coleta de gases necessitam especial atenção. O projeto detalhado desses dispositivos deve ser contemplado juntamente ao dimensionamento do reator propriamente dito, de modo a evitar adequações e adaptações durante as fases de construção e operação desta tecnologia. Para tal, é de fundamental importância considerar recomendações das normas técnicas e da literatura especializada. Em seguida, o levantamento de recomendações e critérios de projeto dos dispositivos auxiliares de reatores UASB é apresentado.

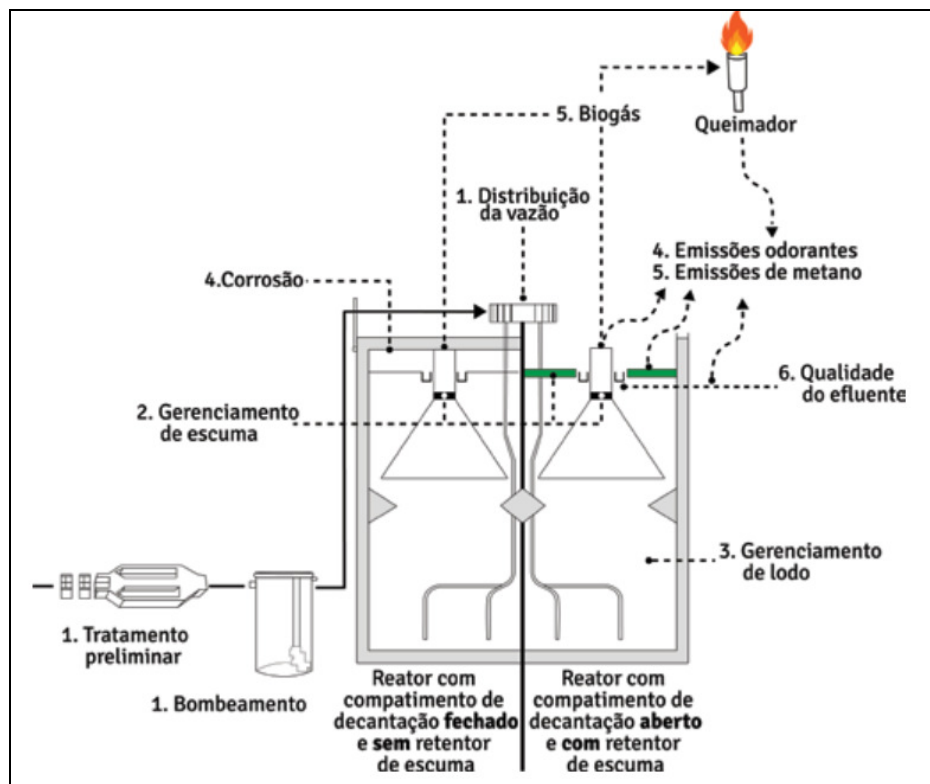


Figura 3. Dispositivos e órgãos constitutivos de reatores UASB, e principais aspectos de atenção associados.

Fonte: Chernicharo *et al.* (2018).

3.2.1. Dispositivos de distribuição de afluente

Os dispositivos de entrada e saída de sistemas de tratamento devem ser dimensionados considerando-se as vazões máximas horárias (ABNT, 2011), de modo que o sistema tenha garantia de operação adequada nos piores cenários possíveis, evitando obstruções de tubulações e afogamento de vertedores. Quanto às caixas de distribuição de esgoto para os reatores, Ribeiro *et al.* (2018) recomendam que as mesmas tenham fundo inclinado, evitando acúmulo de detritos e entupimento dos tubos de alimentação. Os autores recomendam, ainda, o dimensionamento dos vertedores das caixas considerando as lâminas de água para vazões máximas, de modo a garantir a uniformidade na distribuição das vazões.

Os dispositivos de entrada devem promover, no fundo do reator, a distribuição homogênea do esgoto por toda área da seção transversal, de modo a favorecer o contato entre a biomassa e o substrato, além de evitar curtos-circuitos e zonas mortas (CHERNICHARO, 2007). Sistemas de distribuição com ramificações, quedas e pontos de turbulência não são recomendados (VIEIRA, GARCIA Jr., 1992 *apud* MIKI, 2010). Ainda, Jordão e Pessoa

(2017) propõem a distribuição através de caixas localizadas na parte superior do reator, com tubos verticais para direcionar o esgoto ao fundo, evitando-se a utilização de tubulações dispostas horizontalmente.

A ABNT NBR 12.209/2011 (ABNT, 2011) preconiza que os tubos de distribuição tenham no mínimo 75 mm de diâmetro, de forma a evitar obstruções, e sejam resistentes à corrosão. Ribeiro *et al.* (2018) atentam para a garantia de fixação da tubulação às estruturas do reator, de modo a evitar sua desconexão e garantir a distribuição no fundo do tanque. Além disso, a área de influência dos pontos de descarga de cada tubo deve ser de 3 m² no máximo, respeitar uma distância de 0,10 a 0,20 m do fundo, além de permitir identificação de pontos de entupimento e impedir o arraste de ar para dentro do reator. Chernicharo (2007) recomenda velocidade descendente inferior a 0,2 m/s no interior dos tubos, de forma a evitar o arraste de ar para dentro do reator. Além disso, recomenda-se de redução do diâmetro do tubo junto ao fundo, com o intuito de aumentar a velocidade do jato, usualmente acima de 0,4 m/s e evitar obstruções. Para determinar o número de tubos de distribuição em cada reator, Chernicharo (2007) recomenda a utilização da Eq. 6.

$$N_d = \frac{A}{A_d} \tag{Eq. 6}$$

Onde:

N_d = nº de distribuidores

A = área da seção transversal do reator (m²)

A_d = área de influência de cada distribuidor (m²).

A área de influência de cada distribuidor pode ser determinada, de acordo com as características do lodo a ser gerado, conforme apresentado na Tabela 7.

Tabela 7. Diretrizes para a área de influência de distribuidores de vazão em reatores UASB.

Tipo de lodo	Carga orgânica aplicada (kgDQO/m ³ .d)	Área de influência de cada distribuidor (m ²)
Denso e flocofento (> 40 kgSST/m ³)	<1,0	0,5 a 1,0
	1,0 a 2,0	1,0 a 2,0
	>2,0	2,0 a 3,0
Mediano (20 a 40 kgSST/m ³)	<1,0 a 2,0	1,0 a 2,0
	>2,0	2,0 a 5,0
Granular (< 20 kgSST/m ³)	<2,0	0,5 a 1,0
	2,0 a 4,0	0,5 a 2,0
	>4,0	>2,0

Fonte: Adaptado de Lettinga e Hulshoff Pol (1991) *apud* Metcalf e Eddy (2016).

3.2.2. Dispositivos do compartimento de decantação e de coleta do efluente tratado

Após a digestão anaeróbia, o efluente é direcionado para a câmara de decantação. Jordão e Pessoa (2017) recomendam inclinação mínima de 50° das paredes do decantador (em relação ao plano horizontal) com o objetivo de reduzir o acúmulo de lodo nas paredes do decantador e possibilitando retorno dos sólidos ao compartimento de digestão.

Em relação ao projeto do separador trifásico, Chernicharo (2007) sugere as seguintes recomendações: distância mínima de 0,10 m para o trespasse dos defletores de gases (em relação à abertura de passagem para o decantador); largura da abertura dupla de passagem para o decantador igual ao dobro da abertura de passagem simples para o decantador; altura mínima de 0,30 m da parede vertical do compartimento de decantação.

Outro critério importante a ser observado, segundo Chernicharo (2007), é a taxa de liberação de biogás, que deve ser de tal forma que o gás consiga superar a camada de espuma e não arraste sólidos para a saída do sistema. Essa taxa pode ser calculada pela Eq. 7. Segundo Souza (1986, *apud* Chernicharo, 2007), é recomendada taxa liberação de biogás mínima de 1,0 m³gás/m².h e máxima de 5,0 m³gás/m².h.

$$K_g = \frac{Q_{\text{biogás}}}{A_t} \quad \text{Eq. 7}$$

Onde:

K_g = taxa de liberação de biogás (m³/m².h);

$Q_{\text{biogás}}$ = geração volumétrica de biogás (m³/h);

A_t = área da interface líquido-gás (m²).

A coleta do efluente tratado é realizada na parte superior do compartimento de decantação através de canaletas ou calhas. Almeida *et al.* (2018) atentam para o nivelamento dos vertedores instalados nos dispositivos de saída do efluente, evitando desta forma fluxos preferenciais e acúmulo excessivo de espuma no compartimento de decantação, o que pode comprometer a qualidade do efluente final devido à elevada concentração de sólidos.

Para a utilização de vertedores afogados para coleta do efluente é recomendada a inclinação mínima de 1%, de modo a favorecer a sua limpeza. As vantagens dessa alternativa são menor propensão à turbulência e desprendimento de gases fugitivos (CHERNICHARO, 2007).

3.2.3. Dispositivos de coleta de espuma

Os defletores do separador trifásico direcionam os gases e a espuma para a coifa de biogás. A ABNT NBR 12.209/2011 preconiza a instalação de dispositivos para retirada da espuma, mas não apresentam informações sobre dimensionamento destes (ABNT, 2011). A não remoção desse material pode resultar no espessamento da camada de espuma e seu endurecimento no interior da coifa, criando uma barreira à captação do gás, que tende a sair pelos compartimentos de decantação, arrastando sólidos junto ao efluente final e comprometendo sua qualidade (ALMEIDA et al., 2018). Além disso, o biogás se acumula, aumentando a pressão sobre as estruturas e podendo provocar seu rompimento (LOBATO et al., 2018). De acordo com Chernicharo (2007), deve-se instalar pontos de inspeção para espuma acumulada internamente nas coifas. A ABNT NBR 12.209/2011 (ABNT, 2011) indica a instalação de aberturas de acesso com dimensão mínima de 0,80 m.

Chernicharo (2007) recomenda, também, a previsão de mecanismos para retirada de espuma de consistência não fluida quando for o caso, através de escotilhas de fechamento hermético no separador trifásico, com acesso na laje superior do reator, de modo que possibilite a remoção manual ou por mangote de sucção e caminhão limpa-fossa. Para a remoção de espuma fluida, Chernicharo (2007) recomenda a instalação de calhas internas aos separadores trifásicos, de modo a promover a remoção hidrostática da espuma pelo controle da pressão do biogás, conforme ilustrado na Figura 4.

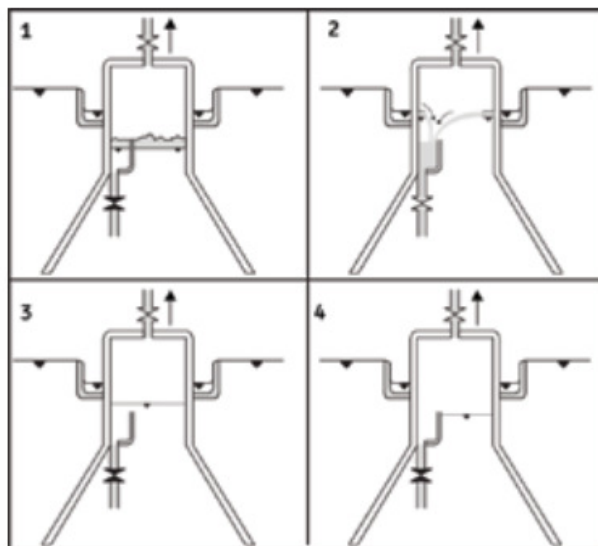


Figura 4. Sistema de remoção hidrostática de espuma. 1) Operação normal do reator: a linha de biogás está pressurizada e o nível de espuma está abaixo do nível da borda superior da calha interna (cerca de 5 cm). 2) Alívio da pressão interna da coifa de biogás: elevação do nível de espuma e sua capturação pela calha interna. 3) Fechamento do registro de esgotamento da calha interna. 4) Retorno à condição operacional com o aumento da pressão interna da linha de biogás.

Fonte: Lobato *et al.* (2018).

3.2.4. Dispositivos de amostragem de lodo

De acordo com a ABNT NBR 12.209/2011, os reatores devem contemplar sistemas de amostragem e de lodo em diferentes alturas, desde o fundo até o nível de transição para o compartimento de decantação (ABNT, 2011). A qualidade de efluentes na saída dos reatores UASB está intimamente associada aos aspectos de projeto, execução e operação que garantam o adequado gerenciamento do lodo anaeróbico. Os dispositivos de amostragem são fundamentais para a quantificação da quantidade de lodo excedente, o que reflete diretamente na qualidade do efluente final.

A determinação e monitoramento do perfil de sólidos ao longo de todo o sistema é fundamental para a determinação da rotina de descarte e só é possível através da implantação e operação correta do sistema de amostragem (LOBATO, 2018). Chernicharo (2007) recomenda a instalação de pontos de amostragem a cada 50 cm, desde o fundo até o nível de transição para o compartimento de decantação. Indica-se, ainda, tubulações e registros tipo esfera, em material PVC, com 50 mm de diâmetro (CHERNICHARO, 2007; JORDÃO e PESSOA, 2017).

3.2.5. Dispositivos de descarte de lodo

O descarte de lodo é crucial para o adequado funcionamento do sistema, uma vez que a biomassa, em crescimento, tende a se acumular no sistema e pode sair juntamente com o efluente tratado, deteriorando sua qualidade. A determinação das condições ideais de descarte é realizada a partir do conhecimento do perfil de sólidos no sistema, através da realização de amostragem do lodo a diferentes alturas (JORDÃO e PESSOA, 2017). A falta de protocolos sistemáticos de descarte de lodo anaeróbio é uma das causas do excesso de lodo nos reatores UASB, o que compromete a qualidade do efluente final devido à maior concentração de sólidos sedimentáveis que saem junto ao efluente (ALMEIDA *et al.*, 2018).

A ABNT NBR 12.209/2011 estabelece que os reatores devem possuir pontos de descarga junto ao fundo e à meia altura. Cada ponto de descarte de lodo deve atender a uma área máxima de 100 m², além de ter carga hidráulica mínima de 1,5 mca (ABNT, 2011). Os pontos de fundo devem auxiliar o esgotamento do reator, quando necessário. Já os pontos de meia altura devem estar a 0,8 e 1,3 m do fundo (ABNT, 2011). Ainda de acordo com a norma técnica brasileira, o diâmetro mínimo dessas tubulações deve ser de 100 mm e as linhas de transporte com escoamento livre devem ter declividade mínima de 3%. Já Chernicharo (2007) recomenda valores ligeiramente diferentes: pontos de descarte de lodo a meia altura entre 1,0 e 1,5 m acima do fundo e diâmetro mínimo de 150 mm. O autor sugere, ainda, a presença de válvula de acionamento individualizado para tubulações inferiores.

O lodo descartado a alturas inferiores tende a ser mais concentrado e com maior sedimentabilidade, ao passo que o lodo eliminado a alturas superiores possui menor densidade e tende a ser menos sedimentável. O descarte a diferentes alturas possibilita regular o descarte de lodos de qualidade superior (mais sedimentável) e inferior (menos sedimentável) de tal maneira que favoreça: aumento da idade do lodo; descarte de lodo mais estabilizado; retenção de sólidos e menor perda de sólidos junto ao efluente final; resultando na maior qualidade do efluente final (LOBATO *et al.*, 2018).

Para a determinação do balanço de massa de lodo no sistema, ou seja, a definição da quantidade de lodo a ser descartado e a ser mantido, leva em consideração a carga orgânica aplicada e a atividade metanogênica específica (AME), além do monitoramento do perfil de sólidos no sistema (suspensos, sedimentáveis e totais)(CHERNICHARO, 2007).

3.2.6. Dispositivos de gerenciamento de gases

Segundo Brandt *et al.* (2018), o tratamento de esgoto por processos anaeróbios implica na ocorrência dois processos distintos, em relação aos gases gerados:

- Emissão de biogás: gases gerados no compartimento de digestão e captados pela coifa, os quais são constituídos principalmente por metano com potencial de aproveitamento energético, mas com concentrações significativas de sulfeto de hidrogênio (H_2S), associado a problemas de corrosão e odores;
- Emissões fugitivas: difusão de gases sem medidas de controle, associados principalmente à problemas de corrosão e odores, em elevatórias de esgoto (EE), canais do tratamento preliminar e compartimentos de decantação. O principal gás responsável é o H_2S , mas também outros compostos de enxofre, ácidos orgânicos voláteis, aldeídos, álcoois, fenóis, amônia e amina.

3.2.6.1. Gerenciamento do Biogás

O Biogás gerado é rico em metano, gás com potencial de intensificação do efeito estufa, mas com enorme potencial de aproveitamento energético. No entanto, o biogás gerado contém outros compostos além do CH_4 , como o gás carbônico, sulfeto de hidrogênio e siloxanos, sendo fundamental o tratamento para sua purificação e remoção de umidade, possibilitando o reaproveitamento energético (MIKI, 2010).

É crucial a instalação de *flares* ou queimadores em todas as ETEs com tratamento anaeróbio. Os *flares* apresentam a função, no caso de ausência de aproveitamento energético, de minimizar odores e emissões de gases de efeito estufa (GEE) pela combustão do CH_4 e compostos odorantes, ou ainda, no caso de estações com reaproveitamento, para queima do excedente e como unidade de segurança (BRANDT *et al.*, 2018).

A ABNT NBR 12.209/2011 recomenda instalação de dispositivos para desprendimento e coleta de gases gerados e, além disso, as câmaras de gás internas ao reator devem ser protegidas contra corrosão e impermeáveis ao gás (ABNT, 2011). Chernicharo (2007) propõe a instalação mínima de tubulação de coleta de gases, compartimento hermético, com selo hídrico e purga de biogás, tanque pulmão ou válvula corta-chama e queimador de gases (quando não houver reaproveitamento do biogás), atentando à alocação segura dos mesmos. Para reatores de portes mais elevados, o autor recomenda, ainda, a instalação de equipamentos

de prevenção a acidentes como: válvula corta-chama, manômetro, válvula de alívio de pressão e vácuo, tanque de pressurização e sedimentação, medidor de vazão e queimador de gases. O autor indica também: registros de purga de umidade, para pontos localizados abaixo da linha de biogás; tubulação de transporte de biogás resistente à corrosão e dimensionada para atender à velocidade interna máxima de 4 m/s, referente à vazão média de produção do biogás; garantir ao menos 0,15 mca no interior das câmaras de gás (CHERNICHARO, 2007).

Já a ABNT NBR 12.209/2011, também recomenda a manutenção da pressão mínima de 0,15 mca, seja pela utilização de selo hídrico ou de válvula reguladora de pressão. Contudo, em relação a tubulação de biogás, deve ser preferencialmente aérea, buscando manter a linearidade e velocidade interna máxima de 5 m/s em relação à vazão média de gás, sendo recomendado o diâmetro mínimo de 50 mm (ABNT, 2011).

Quanto ao biogás, quando não for aproveitado, a norma técnica ABNT NBR 12.209/2011 propõe a queima completa e, quando houver coleta deve ser instalado pelo menos um queimador de segurança. Os queimadores devem conter protetor de chama e ignição automática. Para estações com capacidade acima de 250 L/s, é sugerida ainda a presença de um queimador reserva, totalizando um mínimo de dois queimadores, além de painel de controle automático com sensor de chama. A norma recomenda, ainda, a instalação de dispositivos de segurança, com no mínimo removedores de condensados e sedimentos, nos pontos baixos de tubulação, válvulas de alívio de pressão e vácuo e corta-chama. Também é recomendada a presença de sistema de medição de vazão em cada reator, contendo *by pass* (ABNT, 2011).

Para as tubulações e dispositivos de captação e condução dos gases, Metcalf e Eddy (2016) indicam os materiais PVC, polímeros reforçados com fibra de vidro e polietileno de alta densidade entre outros materiais resistentes à corrosão.

3.2.6.2. Gerenciamento de emissões fugitivas

Para o controle de emissões odorantes e corrosivas, seja no tratamento preliminar, em compartimentos de distribuição, decantação ou coleta de efluente, recomenda-se a criação de uma zona de confinamento com pressão negativa. Neste caso, faz-se necessário o cobrimento de canais e compartimentos, com a instalação de exaustores de gases e cortinas de PVC com a

a função de diminuir a área livre da seção do canal e garantir maior velocidade do gás a ser encaminhado para tratamento (BRANDT *et al.*, 2018).

No caso de áreas cobertas sobre o sistema de decantação, as mesmas devem receber tratamento anticorrosivo, de acordo com a ABNT NBR 12.209/2011 (ABNT, 2011). Brandt *et al.* (2018) indicam, caso se deseje a contenção total dos gases emanados, a opção pelo confinamento total através de galpão.

Brandt *et al.* (2018) teceram, ainda, recomendações sobre especificações técnicas e critérios de projeto a serem adotados para o gerenciamento dos gases emitidos. Com relação à vazão de exaustão, os autores propõem taxa de renovação da atmosfera confinada entre 4 a 6 renovações por hora para ambientes não visitáveis, e 10 renovações por hora àqueles com acesso de operadores. A pressão interna nos compartimentos confinados deve ser inferior à atmosférica, com pressão diferencial mínima de 2,5 mm.c.a., implicando velocidades mínimas de 6,4 m/s de entrada de ar pelas frestas, garantindo a não liberação de emissões fugitivas. Entre outros aspectos, ressalta-se que as estruturas de confinamento devem prever pontos de inspeção e acesso para limpeza e manutenção, além de serem resistentes à corrosão (BRANDT *et al.*, 2018). Tubulações e dispositivos de captação e condução dos gases devem ser preferencialmente de PVC, polímeros reforçados com fibra de vidro e polietileno de alta densidade (METCALF e EDDY, 2016).

3.3. Principais problemas operacionais

Diversos problemas operacionais têm sido reportados em ETEs com reatores UASB, devido à não observação de recomendações técnicas, durante as fases de elaboração e execução dos projetos, levando a concepções inadequadas. Adicionalmente, vem sendo reportado a dificuldade de se colocar em prática detalhes dos dispositivos específicos de reatores UASB previstos em projeto. Consequentemente, o bom funcionamento das estações (operação e manutenção) pode ficar comprometido.

Nas Tabelas 8, 9, 10, 11, 12 e 13 são sumarizados os principais problemas operacionais associados ao não atendimento das recomendações, conforme reportado pela literatura técnica consultada, para cada dispositivo estrutural componente dos reatores. Nas Figuras 5, 6, 7 e 8 são demonstrados alguns problemas reportados pela literatura em ETEs.

Tabela 8. Problemas operacionais associados ao não atendimento de recomendações referentes a **dispositivos de entrada de afluente** em reatores UASB.

Recomendações	Principais problemas associados ao não atendimento das recomendações	Referência
Caixas de distribuição de afluente com fundo inclinado	Deposição de areia e detritos e entupimento dos tubos de alimentação	Ribeiro <i>et al.</i> (2018)
Dimensionamento dos vertedores de distribuição considerando as lâminas de água para vazão máxima	Distribuição irregular de vazão e afogamento de vertedores	Ribeiro <i>et al.</i> (2018)
<ul style="list-style-type: none"> • Devem permitir a distribuição homogênea do esgoto no fundo do reator • Pontos de descarga de esgoto no reator com área máxima de 3 m² 	Formação de curtos-circuitos e zonas mortas, acumulação de material inerte e desequilíbrio do fluxo hidráulico do sistema	Chernicharo (2007); ABNT (2011)
<ul style="list-style-type: none"> • Evitar sistemas de distribuição com ramificações, quedas, pontos de turbulência e tubulações horizontais • Diâmetro interno mínimo de 75 mm dos tubos de distribuição • Entrada de esgoto entre 0,10 e 0,20 m do fundo do reator 	Acúmulo de areia e detritos nas tubulações, entupimento frequente das tubulações, distribuição não homogênea do esgoto no reator e maior trabalho do operador para desobstrução das tubulações	Vieira, Garcia Jr. (1992) <i>apud</i> Miki (2010); Chernicharo (2007); ABNT (2011)
Sistema de distribuição com caixas superiores e tubulação vertical até o fundo	Distribuição não homogênea do esgoto no reator; dificuldade na visualização de pontos de entupimento	Jordão e Pessoa (2017); Chernicharo (2007)
Garantia de fixação dos tubos de distribuição às estruturas	Desconexão dos tubos e entrada do afluente no compartimento de decantação, comprometendo a distribuição homogênea pelo fundo	Ribeiro <i>et al.</i> (2018)
Deve permitir identificação de pontos de entupimento	Maior trabalho do operador na desobstrução das tubulações, implicando maiores custos operacionais	ABNT (2011); Chernicharo (2007)
Deve impedir o arraste de ar para dentro do reator	Inibição do metabolismo dos organismos anaeróbios, prejudicando o tratamento; possibilidade de geração de gases com potencial explosivo devido à mistura com o biogás acumulado no separador trifásico	Chernicharo (2007)
Velocidade descendente inferior a 0,2 m/s no interior dos tubos	Arraste de bolhas de ar	ABNT (2011); Chernicharo (2007)
Redução do diâmetro do tubo junto ao fundo (entre 40 mm e 50 mm e velocidade de saída superior a 0,40 m/s)	Deposição de sólidos inertes junto ao ponto de descarga	Chernicharo (2007)
Tubulações resistentes à corrosão	Corrosão e deterioração das tubulações	Chernicharo (2007)

Tabela 9. Problemas operacionais associados ao não atendimento das recomendações relativas a **dispositivos do compartimento de decantação e de coleta do efluente tratado** em reatores UASB.

Recomendações	Principais problemas associados ao não atendimento das recomendações	Referência
<ul style="list-style-type: none"> • Inclinação mínima de 50° das paredes do decantador • Distância mínima de 0,10 m para o trespasse dos defletores de gases, em relação a abertura de passagem para o decantador • Largura da abertura dupla de passagem para o decantador igual ao dobro da abertura de passagem simples para o decantador • Altura mínima de 0,30 m da parede vertical do compartimento de decantação 	<ul style="list-style-type: none"> • Saída de sólidos com o efluente final e deterioração de sua qualidade • Ineficiência na captação de biogás pela coifa e saída excessiva de gases para o compartimento de decantação 	<ul style="list-style-type: none"> • ABNT (2011); Jordão e Pessoa (2017); Chernicharo (2007)
<ul style="list-style-type: none"> • Nivelamento dos dispositivos de coleta do efluente tratado 	<ul style="list-style-type: none"> • Variação significativa de vazão em determinados pontos, criação de zonas estagnadas de fluxo hidráulico, acumulação de espuma, variação no tempo de detenção hidráulica e prejuízo ao tratamento 	<ul style="list-style-type: none"> • Almeida <i>et al.</i> (2018)
<ul style="list-style-type: none"> • Dispositivos de coleta devem evitar pontos de turbulência 	<ul style="list-style-type: none"> • Desprendimento de gases, geração de maus odores 	<ul style="list-style-type: none"> • ABNT (2011)
<ul style="list-style-type: none"> • Inclinação mínima de 1% no caso de vertedores afogados 	<ul style="list-style-type: none"> • Acúmulo de sólidos internamente às tubulações 	<ul style="list-style-type: none"> • Chernicharo (2007)



Figura 5. Problemas associados a entrada do esgoto e saída do efluente tratado em reatores UASB.

Tabela 10. Problemas operacionais associados ao não atendimento das recomendações relativas a **dispositivos de gerenciamento de espuma** em reatores UASB.

Recomendações	Principais problemas associados ao não atendimento das recomendações	Referência
<ul style="list-style-type: none"> • Instalação de pontos de inspeção para espuma acumulada nos separadores trifásicos, com dimensão mínima de 0,80 m • Dispositivos para remoção de espuma não fluida • Instalação de calhas coletoras internas ao separador trifásico para remoção de espuma fluida pelo controle da pressão interna do biogás 	Acúmulo e endurecimento da espuma no interior dos separadores trifásicos, aprisionamento de gases, aumento da pressão abaixo da camada de espuma e danificação das campânulas	ABNT (2011); Almeida <i>et al.</i> (2018); Lobato <i>et al.</i> (2018); Chernicharo (2007)

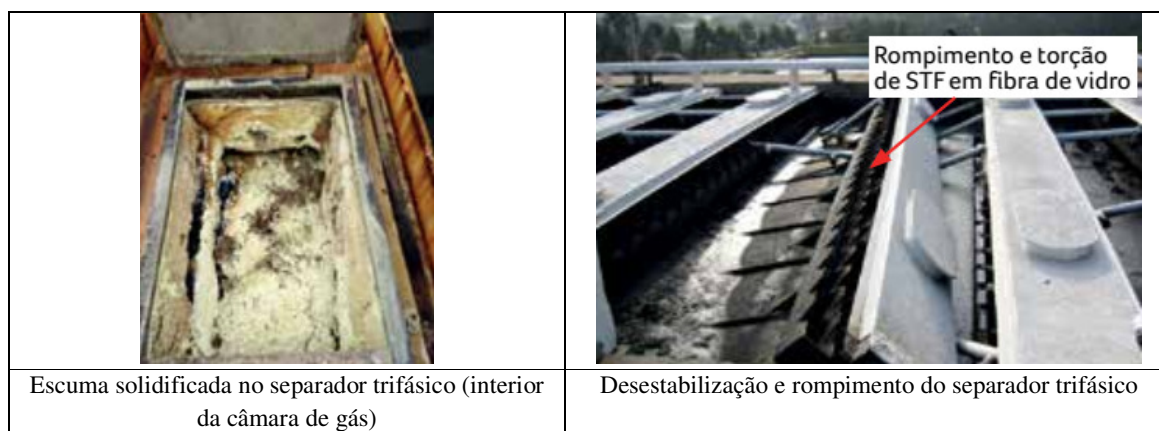


Figura 6. Problemas associados ao acúmulo de espuma em reatores UASB.

Fonte: Lobato *et al.* (2018).

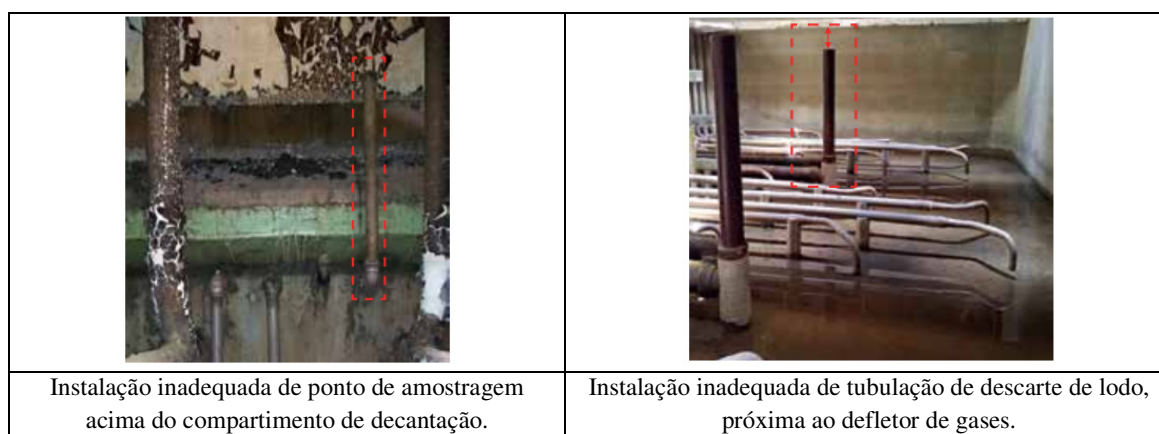


Figura 7. Problemas em dispositivos de amostragem e descarte de lodo em reatores UASB.

Fonte: Lobato *et al.* (2018).

Tabela 11. Problemas operacionais associados ao não atendimento das recomendações relativas a dispositivos de **amostragem e descarte de lodo** em reatores UASB.

Recomendações	Principais problemas associados ao não atendimento das recomendações	Referência
Dispositivos de amostragem de lodo		
<ul style="list-style-type: none"> Sistemas de amostragem em diferentes alturas, a cada 0,50 m, desde o fundo até o nível de transição para decantação 	<ul style="list-style-type: none"> Impossibilidade de monitoramento da biomassa no reator, prejudicando o controle operacional do sistema, principalmente com relação à quantidade e frequência de descarte do lodo, além da determinação dos pontos ideais de descarte do lodo 	<ul style="list-style-type: none"> Chernicharo (2007), Lobato <i>et al.</i> (2018)
<ul style="list-style-type: none"> Registros do sistema de amostragem, com no mínimo 50 mm de diâmetro 	<ul style="list-style-type: none"> Entupimento dos registros 	<ul style="list-style-type: none"> Chernicharo (2007); Jordão e Pessoa (2017)
<ul style="list-style-type: none"> Registros do sistema de amostragem tipo esfera 	<ul style="list-style-type: none"> Deterioração dos registros 	<ul style="list-style-type: none"> Chernicharo (2007); Jordão e Pessoa (2017)
<ul style="list-style-type: none"> Registros do sistema de amostragem em PVC 	<ul style="list-style-type: none"> Corrosão e deterioração dos registros 	<ul style="list-style-type: none"> Chernicharo (2007); Jordão e Pessoa (2017)
Dispositivos de descarte de lodo		
<ul style="list-style-type: none"> Pontos de descarga junto ao fundo 	<ul style="list-style-type: none"> Acumulação de material inerte no fundo do reator, dificuldade de esgotamento total do reator 	<ul style="list-style-type: none"> ABNT (2011); Chernicharo (2007)
<ul style="list-style-type: none"> Um ponto de descarga a cada 100 m² de área do reator 	<ul style="list-style-type: none"> Remoção não homogênea do lodo, podendo acarretar carregamento de sólidos com o efluente e sobrecarregar a unidade posterior de tratamento, diminuindo a eficiência do mesmo 	<ul style="list-style-type: none"> ABNT (2011)
<ul style="list-style-type: none"> Pontos de descarga com carga hidráulica mínima de 1,5 mca 	<ul style="list-style-type: none"> Obstrução das tubulações de descarte 	<ul style="list-style-type: none"> ABNT (2011)
<ul style="list-style-type: none"> Pontos de descarga a meia altura de 0,8 a 1,3 m do fundo, com diâmetro mínimo de 100 mm (ABNT, 2011) Pontos de descarga a meia altura de 1,0 a 1,5 m do fundo com diâmetro mínimo de 150 mm (CHERNICHARO, 2007) 	<ul style="list-style-type: none"> Impossibilidade de remoção do lodo menos concentrado, prejudicando o controle operacional do sistema; Entupimento da tubulação de descarte 	<ul style="list-style-type: none"> ABNT (2011); Chernicharo (2007)
<ul style="list-style-type: none"> Declividade mínima de 3% para linhas de transporte com escoamento livre 	<ul style="list-style-type: none"> Acumulação de lodo nas linhas de transporte 	<ul style="list-style-type: none"> ABNT
<ul style="list-style-type: none"> Válvula de acionamento individualizado para tubulações inferiores 	<ul style="list-style-type: none"> Não garantia da efetiva remoção de sólidos de um determinado ponto do reator 	<ul style="list-style-type: none"> Chernicharo (2007)
<ul style="list-style-type: none"> Estabelecimento de protocolo sistematizado de descarte de lodo 	<ul style="list-style-type: none"> Reatores operando com excesso de lodo Deterioração da qualidade do efluente devido a maior concentração de sólidos que saem do sistema 	<ul style="list-style-type: none"> Almeida <i>et al.</i> (2018)

Tabela 12. Problemas operacionais associados ao não atendimento das recomendações relativas a **dispositivos de gerenciamento de biogás** em reatores UASB (continua).

Recomendações	Principais problemas associados ao não atendimento das recomendações	Referência
<ul style="list-style-type: none"> • Tratamento e purificação do biogás, com remoção de umidade, gás carbônico, sulfeto de hidrogênio entre outros gases indesejáveis 	<ul style="list-style-type: none"> • Ineficiência do reaproveitamento energético, além de prejuízos a instalações por corrosão, ou depósitos de sílica 	<ul style="list-style-type: none"> • Miki (2010)
<ul style="list-style-type: none"> • Instalação de dispositivos para desprendimento e coleta de gases • Instalação de tubulação de coleta de gás 	<ul style="list-style-type: none"> • Ineficiência da captação de biogás, geração de maus odores, liberação de gases 	<ul style="list-style-type: none"> • ABNT (2011)
<ul style="list-style-type: none"> • Câmaras internas protegidas contra corrosão e impermeáveis ao gás • Tubulação de transporte de biogás resistente à corrosão • Materiais recomendados para tubulações: PRFV e polietileno de alta densidade (PEAD) 	<ul style="list-style-type: none"> • Corrosão e deterioração das estruturas 	<ul style="list-style-type: none"> • ABNT (2011); Chernicharo (2007); Metcalf e Eddy (2016)
<ul style="list-style-type: none"> • Instalação de compartimento hermético com selo hídrico e purga de biogás 	<ul style="list-style-type: none"> • Liberação de biogás e geração de maus odores 	<ul style="list-style-type: none"> • Chernicharo (2007)
<ul style="list-style-type: none"> • Tanque pulmão ou válvula corta-chama e queimador de gases • Válvula corta-chama, manômetro, válvula de alívio de pressão e vácuo, tanque de pressurização e sedimentação, medidor de vazão e queimador de gases • Instalação de pelo menos um queimador de segurança (dois no caso de estação com capacidade acima de 250 L/s) • Queimadores com protetor de chama e ignição automática • Instalação de painel de controle automático e sensor de chama para estações com capacidade acima de 250 L/s 	<ul style="list-style-type: none"> • Liberação de gases explosivos e de efeito estufa • Riscos de acidentes • Liberação de gases odorantes e corrosivos 	<ul style="list-style-type: none"> • Chernicharo (2007); ABNT (2011)
Registros de purga de umidade para pontos abaixo da linha de biogás	Perda da eficiência do aproveitamento do biogás	Chernicharo (2007)
Velocidade interna máxima de 4 a 5 m/s	Geração de ruídos, elevada perda de carga e maior gasto energético	Chernicharo (2007); ABNT (2011)
Pressão mínima de 0,15 mca na câmara de gás	Dificuldade para condução, aproveitamento e tratamento dos gases	ABNT (2011), Chernicharo (2007)
Utilização de selo hídrico ou válvula reguladora de pressão	Liberação de gases explosivos e riscos de acidentes	ABNT (2011)
Tubulação de biogás aérea e linear	Dificuldade de realização de manutenções Elevada perda de carga	ABNT (2011)

Tabela 12. Problemas operacionais associados ao não atendimento das recomendações relativas a dispositivos de gerenciamento de biogás em reatores UASB (continuação).

Diâmetro mínimo de 50 mm da tubulação de biogás	Garantir a adequada perda de carga e velocidade do biogás internamente aos tubos	ABNT (2011)
Instalação de by pass	Menor flexibilidade operacional Riscos de acidentes	ABNT (2011)
Taxa de liberação de biogás: entre 1,0 m ³ gás/m ² .h e 5,0 m ³ gás/m ² .h	Arraste de sólidos para a saída do sistema junto ao efluente final Formação de camada espessa de espuma no interior do separador trifásico	Souza (1986) <i>apud</i> Chernicharo (2007)

Tabela 13. Problemas operacionais associados ao não atendimento das recomendações relativas a dispositivos de gerenciamento de emissões fugitivas em reatores UASB.

Recomendações	Principais problemas associados ao não atendimento das recomendações	Referência
<ul style="list-style-type: none"> Cobrimento de canais/compartimentos do tratamento preliminar, unidades de distribuição, decantação e coleta Instalação de exaustores 	<ul style="list-style-type: none"> Emissão de gases odorantes e corrosivos Corrosão de estruturas 	<ul style="list-style-type: none"> Brandt <i>et al.</i> (2018)
Coberturas protegidas contra corrosão	Corrosão e deterioração de estruturas	ABNT (2011)
<ul style="list-style-type: none"> Instalação de cortinas de PVC 	<ul style="list-style-type: none"> Maior área livre na seção do canal, implicando em maiores vazões de exaustão Perda da eficiência na exaustão dos gases 	<ul style="list-style-type: none"> Brandt <i>et al.</i> (2018)
<ul style="list-style-type: none"> Taxa de renovação entre 4 e 6 renovações/h para ambientes não visitáveis e 10 renovações/h para ambientes visitáveis 	<ul style="list-style-type: none"> Não garantia ao bem estar dos operadores Ineficiência da exaustão de gases Menor vida útil das estruturas de confinamento devido à corrosão e deterioração das estruturas de confinamento, implicando maiores gastos com a sua substituição 	<ul style="list-style-type: none"> Brandt <i>et al.</i> (2018)
Pressão interna nos compartimentos confinados inferior à atmosférica e com pressão diferencial mínima de 2,5 mm c.a.	Não garantia de confinamento dos gases, resultando liberação de gases odorantes e corrosivos	Brandt <i>et al.</i> (2018)
Velocidade mínima de 6,4 m/s do ar pelas frestas das coberturas	Liberação de gases odorantes e corrosivos	Brandt <i>et al.</i> (2018)
Tubulações, dispositivos de captação e condução de gases resistentes à corrosão, preferencialmente em PRFV, PEAD e PP	Corrosão e deterioração das tubulações e dispositivos	Metcalf e Eddy (2016)



Figura 8. Corrosão de estruturas em ETE.

Fonte: Brandt *et al.* (2018).

3.4. Análise crítica sobre problemas em órgãos constitutivos de reatores UASB

O projeto de reatores UASB em geral não incorpora o uso de tecnologias sofisticadas para o atendimento de requisitos necessários ao processo de digestão anaeróbia e tratamento do esgoto. No entanto, diante do conteúdo apresentado na revisão de literatura, uma demanda pela sistematização de métodos para a concepção desses sistemas é claramente observada. A elaboração de especificações técnicas visando a padronização de órgãos constitutivos poderão sanar futuras dificuldades no gerenciamento do sistema, minimizando intervenções em etapas de pré-operação e ao longo do período operacional de ETEs.

Dentre os aspectos descritos neste documento a distribuição do esgoto nos reatores UASB possui ampla variação em termos de concepção, considerando unidades de tratamento já em operação no Brasil. Em numeráveis casos, problemas operacionais são observados, os quais poderiam ser evitados com a padronização de concepção e projeto de órgãos constitutivos.

Sendo assim, o presente estudo visa propor um sistema simplificado de distribuição de esgoto em reatores UASB, considerando ainda contextualização de um estudo de caso realizado em uma ETE de escala plena em Minas Gerais. Duas etapas compõem o estudo de caso: (i) Avaliação do sistema de distribuição já implantado, e (ii) a proposição *preliminar* de um sistema de distribuição do esgoto visando a sua padronização.

4. MATERIAL E MÉTODOS

Para realização deste estudo, foram estabelecidas duas etapas. A primeira etapa consistiu na revisão da literatura, com análise das normas técnicas e literatura especializada, referentes a implantação de dispositivos auxiliares de reatores UASB, no que tange aos critérios e recomendações de projeto, construção e operação. As referências consultadas foram: ABNT (2011), Almeida *et al.* (2018), Brandt *et al.* (2018), Chernicharo (2007), Chernicharo *et al.* (2018), Jordão e Pessoa (2017), Lettinga e Hulshoff Pol (1995), Lobato *et al.* (2018), Metcalf e Eddy (2016), Miki (2010), Ribeiro *et al.* (2018), Souza (1986) e Vieira (1992).

A partir de problemas associados a reatores UASB, com base na revisão da literatura, um destes aspectos foi considerado para estudo de caso em um sistema de escala plena. Assim, o sistema de distribuição de afluente em uma ETE localizada em Minas Gerais foi discutido em maiores detalhes. Projetos básicos foram analisados, considerando ainda a realização de visitas técnicas à ETE. Com base nas informações levantadas foram desenvolvidos projetos para adequação do sistema de distribuição dos reatores UASB, de forma que a solução pudesse ser adotada como uma proposta de padronização, em compatibilidade com recomendações observadas na literatura especializada, incluindo normatizações técnicas.

4.1. Estudo de caso

O estudo de caso foi baseado em uma ETE localizada no estado de Minas Gerais, ainda em fase de implantação, com sistema de tratamento de esgoto composto por tratamento preliminar (gradeamento, peneiramento e desarenador aerado) e reatores UASB. A etapa de pós-tratamento será futuramente avaliada para melhoria da qualidade do efluente final.

Atualmente, os reatores UASB estão em fase final de implantação. A ETE conta com duas linhas de reatores UASB, com quatro reatores em cada linha, totalizando oito reatores UASB na ETE. Uma das linhas já se encontra com sistemas de distribuição de afluente, coleta de efluente tratado, gerenciamento de gases, espuma e lodo já instalados. A outra linha de quatro reatores apresenta-se com os volumes reacionais (tanques) já implantados, sem a instalação de órgãos constitutivos do sistema. A Figura 9 demonstra a atual configuração da ETE.

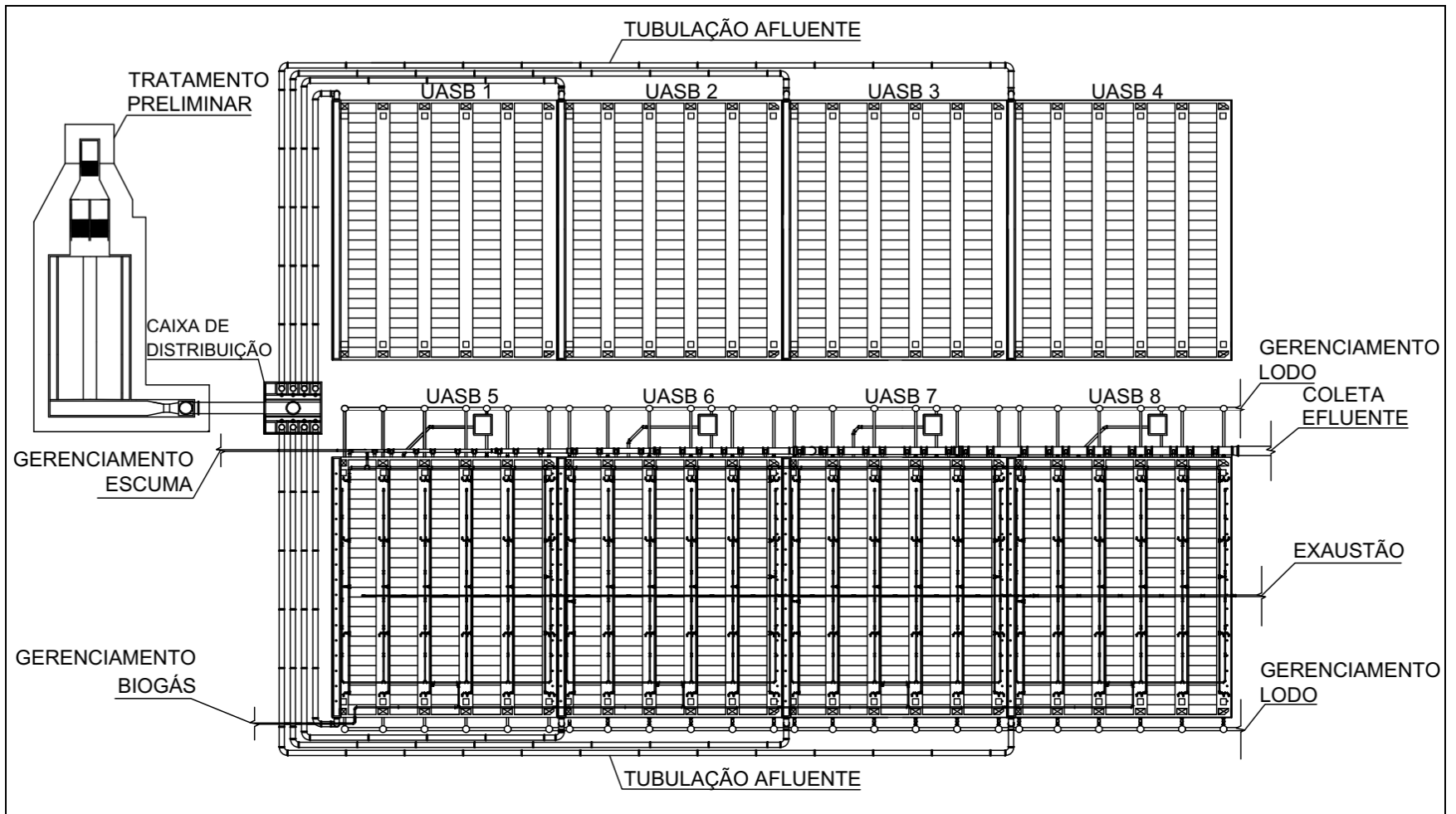


Figura 9. Esquema da configuração atual da ETE: acima (reatores UASB 1 a 4) a linha de reatores sem órgãos constitutivos instalados; abaixo (reatores UASB 5 a 8) a linha de reatores com instalação plena.

A capacidade total da estação é de 856 L/s, atendendo a uma população estimada de 430 mil habitantes. A Tabela 14 contém as vazões de projeto da ETE, enquanto a Tabela 15 apresenta as dimensões úteis de cada reator UASB.

Tabela 14. Vazões de projeto da ETE

Vazões de projeto	Valores
Vazão de início de plano (L/s)*	50,5
Vazão média de fim de plano (L/s)**	856
Vazão máxima de fim de plano (L/s)**	1244

(*) com apenas um reator em operação

(**) com os oito reatores em operação

Tabela 15. Dimensões úteis de cada reator UASB

Dimensões úteis	Valores
Comprimento (m)	22,4
Largura (m)	26,0
Profundidade (m)	6,1
Área superficial (m ²)	582,4

Com base nas informações apresentadas, procedeu-se com a avaliação do sistema de distribuição já implantado na linha de quatro reatores UASB com a posterior proposição dos projetos para adequação às recomendações técnicas, conforme a literatura revisada (item 4 do presente trabalho). Intentando-se a adoção de soluções econômica e tecnicamente viáveis, optou-se pela adaptação do sistema de distribuição já implantado e proposição de um novo sistema na linha de quatro reatores que ainda não receberam os dispositivos (UASB 1 a 4), atentando-se para o melhor aproveitamento das estruturas já consolidadas na estação. Portanto, a padronização do sistema de distribuição proposto nesse trabalho deriva-se de uma solução preliminarmente proposta no projeto da ETE.

5. ESTUDO DE CASO

Conforme apresentado na metodologia este estudo de caso avalia o sistema de distribuição do esgoto em reatores UASB considerando dispositivos já implantados. Em seguida, para as unidades nas quais ainda o sistema ainda não foi instalado, uma proposição preliminar é apresentada, visando uma perspectiva *preliminar* para a concepção do sistema de distribuição do esgoto e dispositivos constituintes.

5.1. Caracterização e avaliação do sistema de distribuição de afluente já implantados

Atualmente, para o direcionamento do esgoto aos reatores UASB, existe na saída do tratamento preliminar da ETE, uma caixa de distribuição, com oito compartimentos precedidos de vertedores retangulares com comportas manuais, que têm a função de distribuir a vazão total recebida, de forma equitativa entre os oito reatores. Na saída de cada um dos oito compartimentos, há uma tubulação confeccionada em plástico reforçado em fibra de vidro (PRFV) de 500 mm de diâmetro para direcionar o afluente a cada um dos oito reatores. A caixa de distribuição é demonstrada na Figura 10.

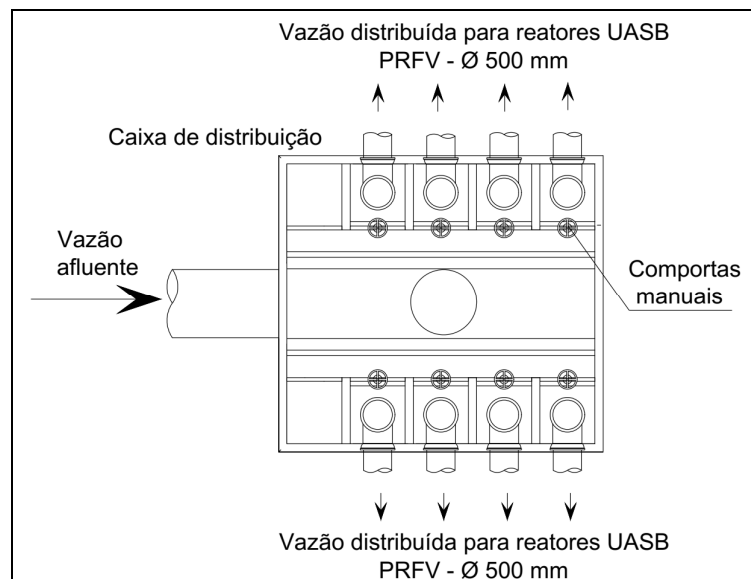


Figura 10. Esquema da caixa de distribuição de vazão existente na ETE.

Ao chegar nos reatores, o afluente é inserido em um canal de distribuição localizado na parte superior. Na linha destes reatores UASB com o sistema de distribuição do esgoto já implantado, os canais já contam, além da tubulação de 500 mm na entrada, com tubos de alimentação para direcionar o esgoto para dentro dos reatores. A Figura 11 exibe a tubulação de adução de esgoto ao canal em um reator e o canal de distribuição.



Figura 11. Adução de esgoto e canal de distribuição da fase líquida para o interior de reatores UASB.

5.1.1. Sistema de distribuição de afluente no topo dos reatores UASB

Conforme previsto em projeto, os reatores UASB contam com 16 tubos de distribuição dispostos em U. Os tubos têm 150 mm de diâmetro e, em cada tubo de distribuição, uma extremidade é completamente vedada, enquanto a outra, localizada na canaleta de distribuição no topo dos reatores UASB, existem dois vertedores triangulares com 100 mm de altura, 70 mm de largura e ângulo de aproximadamente $38,6^\circ$. Os tubos verticais tem aproximadamente 6,8 m de altura cada, enquanto os tubos horizontais, no fundo do reator, aproximadamente 22,4 m de comprimento (Figura 12). O sistema de distribuição de afluente deve permitir a identificação de pontos de entupimento (ABNT, 2011). Logo, os vertedores devem operar não afogados, o que dificultaria a observação de obstruções.



Figura 12. Tubos para distribuição do afluente nos reatores UASB. A esquerda, vista interna do reator; à direita, tubos e vertedores triangulares no canal de distribuição de esgoto bruto.

Considerando as dimensões dos vertedores, a vazão máxima suportada em cada um pode ser determinada pela equação de vazão para vertedores triangulares (adaptado de AZEVEDO NETTO, 2015) representada pela Eq. 8.

$$Q_i = 320 * \sqrt{2 * g} * H^{\frac{5}{2}} * \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) \quad \text{Eq. 8}$$

Onde:

Q_i = vazão máxima em cada vertedor (L/s)

g = aceleração da gravidade (m/s²);

H = altura do vertedor (m); θ = ângulo do vertedor (°).

Logo a vazão máxima suportada em cada tubo é obtida multiplicando a vazão de cada vertedor pelo número de vertedores em cada tubo. Sendo assim, a vazão máxima permitida em cada tubo é de 3,14 L/s.

Conforme consta no projeto da ETE, as vazões de projeto são:

- Vazão de início de plano (um reator UASB em operação): 50,5 L/s;
- Vazão média de fim de plano (oito reatores UASB em operação): 856 L/s;
- Vazão máxima de fim de plano (oito reatores UASB em operação): 1244 L/s;

Para determinação das vazões que cada tubo receberia, dividiu-se as vazões de projeto para cada reator e, posteriormente para cada tubo de distribuição. Portanto, cada tubo receberia 3,16 L/s em início de plano, valor ligeiramente acima do máximo aceitável (3,14 L/s) e sem margem para incrementos de vazão. Para a vazão média de fim de projeto da ETE, com 8 (oito) reatores (856 L/s; 107 L/s.reator), a vazão limite em cada tubo de distribuição seria ultrapassada (6,69 L/s por tubo de distribuição) e, em condições de vazões máximas afluentes (1244 L/s; 155,5 L/s.reator), a vazão em cada tubo de distribuição seria de 9,72 L/s (aproximadamente três vezes superior à capacidade de cada tubo).

5.1.2. Distribuição do esgoto no fundo dos reatores UASB 5 a 8

Foi verificado a situação do sistema de distribuição em relação às áreas de influência de cada tubo de alimentação, que não deve ultrapassar 3 m² (ABNT, 2011). Além disso, verificou-se também, as velocidades descendentes e nas saídas dos bocais, que devem ser, respectivamente, inferiores a 0,2 m/s e superiores a 0,4 m/s (CHERNICHARO, 2007).

Para determinação das velocidades do fluxo dentro dos tubos, dividiu-se a vazão correspondente pela área de seção circular dos tubos. A tubulação do sistema de distribuição da estação é constituída por tubos de 150 mm de diâmetro. Considerando a vazão de início de plano da ETE (50,5 L/s.reator), cada tubo receberia 3,16 L/s. Deste modo, a velocidade descendente na parte vertical dos tubos de alimentação corresponde a 0,18 m/s, um valor admissível em relação ao que recomenda Chernicharo (2007) (< 0,2 m/s). Já em relação a vazão média de fim de plano (856 L/s; 107 L/s.reator e 6,69 L/s.tubo) a velocidade descendente na parte vertical dos tubos de distribuição é igual a 0,38 m/s, quase o dobro do valor recomendado na literatura. Tal velocidade pode induzir a entrada de bolhas de ar no reator, prejudicando o processo de digestão anaeróbia.

A parte horizontal de cada tubo de distribuição, localizada rente ao fundo do reator, apresenta 23 bocais com 30 mm de diâmetro e 50 mm de comprimento. Os mesmos são localizados na lateral dos tubos horizontais de forma alternada, com espaçamento entre si de 0,95 m. Ressalta-se que a instalação de bocais junto a orifícios de distribuição do esgoto parece ser uma solução pouco efetiva, potencializando ainda mais a ocorrência de entupimentos.

Cada reator apresenta uma área superficial útil de 582,4 m². Com relação a área de influência de cada orifício, determinada pela Eq. 6, foi verificado que cada orifício está sujeito a uma

área de influência de 1,58 m², o que é adequado em relação à recomendação da ABNT NBR 12.209/2011, que estabelece área máxima de 3 m² (ABNT, 2011).

Apesar da boa distribuição do afluente no fundo do reator UASB em termos de área de influência, os orifícios apresentam diâmetros menores do que o recomendado (recomendação 40-50 mm; CHERNICHARO, 2007), o que pode favorecer obstruções. Além disso, foi verificado que, devido ao elevado número de orifícios, a velocidade de saída de esgoto em cada orifício é menor do que a recomendada (recomendação: > 0,40 m/s; CHERNICHARO, 2007) para a vazão de início de plano. A Figura 13 mostra a disposição dos tubos de distribuição no fundo do reator UASB, bem como a disposição dos referidos bocais.



Figura 13. Tubos de distribuição do afluente no fundo e bocais nos reatores UASB.

5.1.3. Comentário sobre inconformidades do sistema de distribuição implantado

Conforme já discutido no presente estudo, é recomendado que o sistema de distribuição seja composto por tubulações individuais, em posição vertical para a distribuição do esgoto em diferentes pontos no fundo do reator UASB. Portanto, o sistema de distribuição já implantado não atende às recomendações da literatura.

Os cálculos hidráulicos efetuados indicam que os vertedores do sistema de distribuição do esgoto no topo dos reatores UASB tenderão a trabalhar de forma afogada, o que pode dificultar a percepção dos operadores a respeito de entupimentos nos tubos de distribuição, resultando em um sobrecarga operacional para a manutenção do sistema.

A distribuição não homogênea do esgoto nos reatores UASB podem resultar em problemas operacionais como: dificuldade na observação de obstruções, havendo a necessidade de

verificação sistemática de todos os 16 tubos de distribuição, acarretando sobrecarga operacional; acúmulo de material inerte na soleira dos distribuidores e no fundo do reator; aparecimento de zonas de estagnação e acúmulo de espuma nos clarificadores; e consequente perda de desempenho.

5.2. Propostas de adequação do sistema de distribuição de esgoto

5.2.1. Vertedores dos canais de distribuição

Devido à necessidade de visualização de obstruções no sistema de vertedores implantado, recomenda-se a sua modificação para recebimento da vazão adequada. A primeira alternativa recomendada seria a realização de mais uma abertura nos tubos vertedores, de modo que os tubos contenham três vertedores triangulares. Cada vertedor apresentaria 130 mm de altura, 100 mm de largura e ângulo aproximado de $42,1^\circ$, conforme demonstrado na Figura 14. De acordo com a Eq. 8, a vazão máxima suportada em cada vertedor nesse caso seria de 3,32 L/s, totalizando 9,96 L/s em cada tubo de distribuição. Como as vazões de projeto remetem à 3,16 L/s, 6,69 L/s e 9,72 L/s, para as vazões de início de plano, média e máxima de fim de plano, respectivamente, os vertedores operariam em condições satisfatórias.

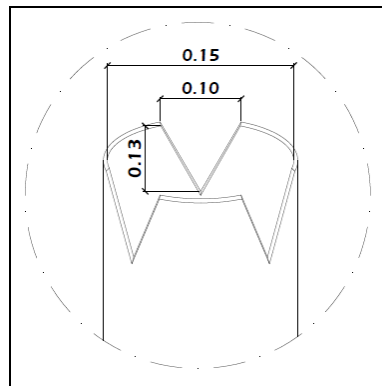


Figura 14. Tubos de distribuição com 3 (três) vertedores triangulares.

5.2.2. Parte vertical dos tubos de distribuição

A velocidade descendente calculada para a parte vertical dos tubos de distribuição foi de 0,38 m/s para a vazão média de fim de plano. É recomendado que a velocidade seja inferior a 0,2 m/s (ABNT, 2011). No entanto, para que isso ocorra seria necessário a troca de toda

tubulação para outra de diâmetro superior. Considerando as vazões de projeto, em cada tubo e dividindo-as pelo diâmetro comercial imediatamente superior, o de 200 mm atenderia à recomendação. No entanto, como a troca de toda tubulação é, a princípio, impraticável para ETE sugere-se a observação constante desse sistema durante fase de operação, de modo a verificar possíveis problemas operacionais.

5.2.3. Parte horizontal dos tubos de distribuição

Conforme verificado para as vazões de projeto, as velocidades calculadas nas saídas dos bocais se encontraram inferiores a 0,4 m/s, valor recomendado por Chernicharo (2007).

Visando a melhoria desse sistema foi proposto a remoção de todos os bocais, deixando apenas os orifícios nos tubos. Diferenças significativas de vazão por perda de carga nos orifícios podem ser desprezadas, uma vez que, apesar de os dutos horizontais serem longos (comprimento maior do que o triplo do diâmetro), as velocidades internas nos tubos são relativamente baixas (Di BERNARDO, 2017).

Além disso, sugeriu-se a manutenção de 12 dos 23 orifícios, em um dos lados dos tubos, com o tamponamento dos 11 orifícios restantes do lado oposto, bem como o aumento dos diâmetros dos orifícios, atualmente de 30 mm, para 40 mm. Esta recomendação permite que cada ponto de descarga de esgoto no reator esteja restrito a uma área de influência máxima de 3 m², conforme determinado pela Eq. 6. Em seguida, foram verificadas as velocidades em cada orifício, considerando as vazões de projeto, obtendo-se os seguintes resultados:

- Considerando a vazão média de início de plano da ETE (50,5 L/s): a velocidade de saída em cada orifício ($V = 0,21$ m/s) estaria abaixo do recomendado ($V > 0,40$ m/s);
- Considerando a vazão média de fim de plano da ETE (856 L/s): a velocidade de saída em cada orifício ($V = 0,44$ m/s) estaria de acordo do recomendado ($V > 0,40$ m/s);
- Considerando a vazão máxima de fim de plano da ETE (1244 L/s): a velocidade de saída em cada orifício ($V = 0,65$ m/s) estaria de acordo do recomendado ($V > 0,40$ m/s).

A Figura 16 demonstra os tubos de distribuição do afluente no fundo dos reatores UASB com a representação de sua área de influência. Tal a adequação resulta na distribuição uniforme do esgoto no fundo dos reatores. Já a Tabela 16 sintetiza as medidas, vazões e velocidades de escoamento em diferentes partes do sistema de distribuição considerando-se as alterações

propostas.

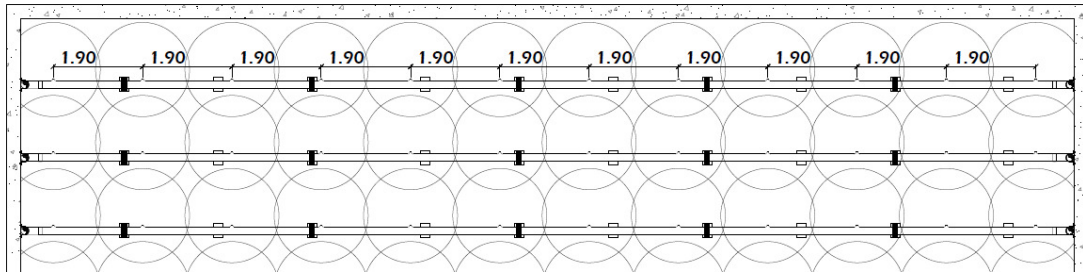


Figura 15. Áreas de influência dos tubos de distribuição do afluente no fundo dos reatores UASB conforme proposta de adequação.

Tabela 16. Síntese dos parâmetros do sistema de distribuição do afluente nos reatores UASB 5 a 8 considerando propostas de adequação.

Parâmetro	Cenário atual	Alteração
Nº vertedores em cada tubo de distribuição	2	3
Vazão máxima em cada vertedor triangular (L/s)	1,57	3,32
Nº tubos de distribuição (D = 150 mm) em cada reator	16	16
Vazão suportada em cada tubo de distribuição	3,14	9,96
Nº orifícios em cada tubo de distribuição	23 ($\Phi = 30$ mm)	12 ($\Phi = 40$ mm)
Vazão em cada orifício (L/s)	0,29	0,56
Velocidade de saída em cada orifício (m/s)	0,41	0,44

5.3. Proposição preliminar para sistema de distribuição de reatores UASB

Para o dimensionamento do sistema de distribuição proposto neste trabalho foram considerados os parâmetros de projeto já determinados para a ETE, a estrutura dos reatores UASB já construída, bem como o atendimento a normas e recomendações técnicas revisadas no presente trabalho.

Inicialmente, determinou-se o número de tubos distribuidores a partir da Eq. 6. Como a área da seção, em cada reator, corresponde à 582,40 m², e adotando área de influência máxima de 3 m², conforme recomendação da NBR 12.209/2011 (ABNT, 2011), obteve-se 195 distribuidores para cada reator. Por simplicidade construtiva e operacional, considerando a estrutura já existente dos reatores, adotou-se 200 distribuidores por reator, de modo que os mesmos pudessem ser dispostos acima das placas pré-moldadas de concreto, localizadas acima dos decantadores, conforme indicado na Figura 16.



Figura 16. Placas pré-moldadas de concreto acima dos compartimentos de decantação dos reatores UASB.

Como cada reator possui cinco decantadores, adotou-se cinco novos canais longitudinais de distribuição, por reator, cada uma responsável pela alimentação de 40 tubos de distribuição. Recalculando a área de influência para cada um, obteve-se 2,9 m², o que atende às recomendações técnicas. A disposição dos pontos de distribuição é esquematizada na Figura 17. Na Figura 18 é exibida, de forma esquemática, a localização das placas pré-moldadas em concreto, acima dos compartimentos de decantação, onde sugere-se a implantação dos novos canais de distribuição.

Ainda, adotando-se o diâmetro mínimo para os tubos de distribuição recomendados pela norma da ABNT, ou seja, 75 mm de diâmetro, calculou-se a velocidade descendente do esgoto por cada tubo, a partir das vazões média e máxima de fim de plano da estação, para cada reator (respectivamente 107 L/s e 155,5 L/s), conforme a Eq. 9. As velocidades obtidas foram de 0,12 m/s para a vazão média e 0,18 m/s para a vazão máxima, estando, em ambos os casos, em conformidade com a recomendação da ABNT NBR 12.209/2011 (velocidade descendente inferior a 0,2 m/s) (ABNT, 2011).

$$v = \frac{Q}{Nd \cdot a}$$

Eq. 9

Onde:

v = velocidade descendente em cada tubo de alimentação (m/s)

Q = vazão em cada reator (m³/s)

Nd = n° de tubos de distribuição

a = área de seção do tubo (m²).

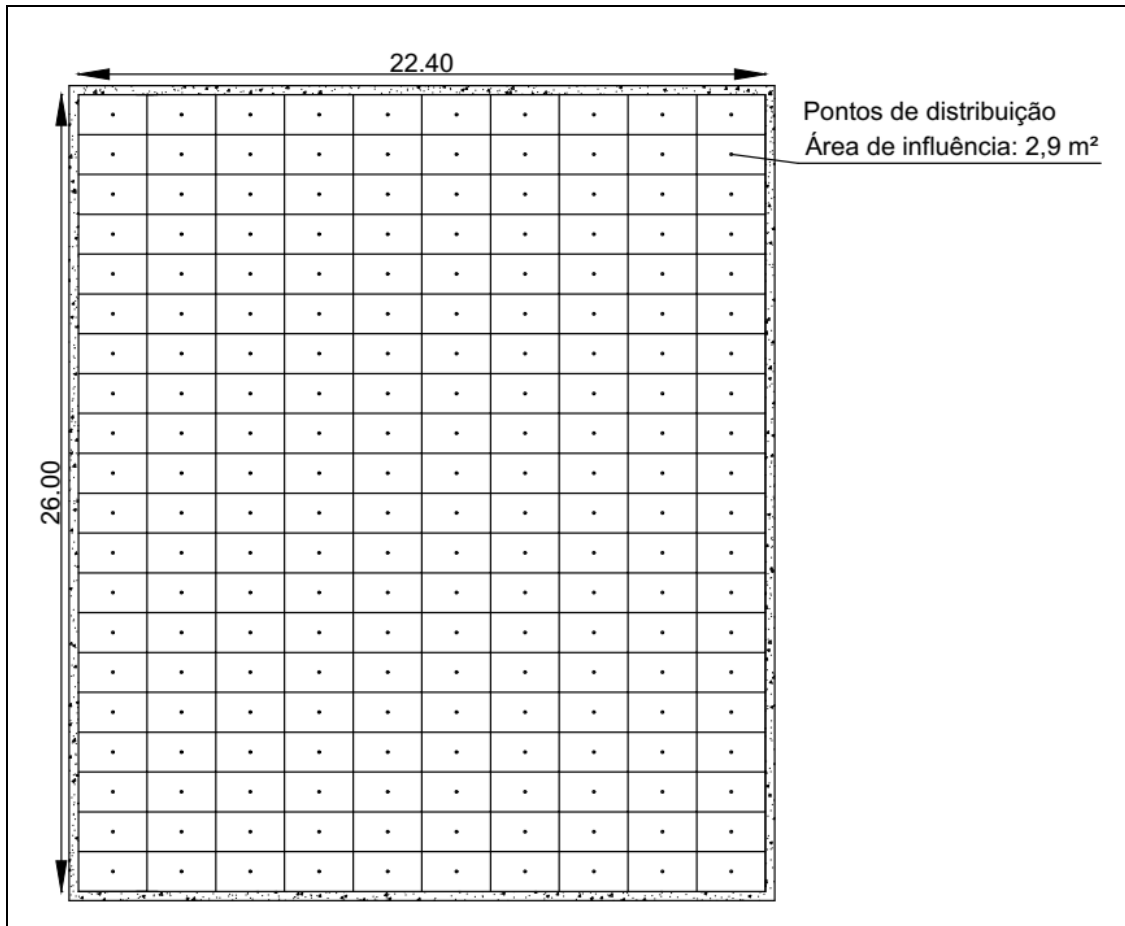


Figura 17. Áreas de influência dos tubos de distribuição do afluente no fundo dos reatores UASB.

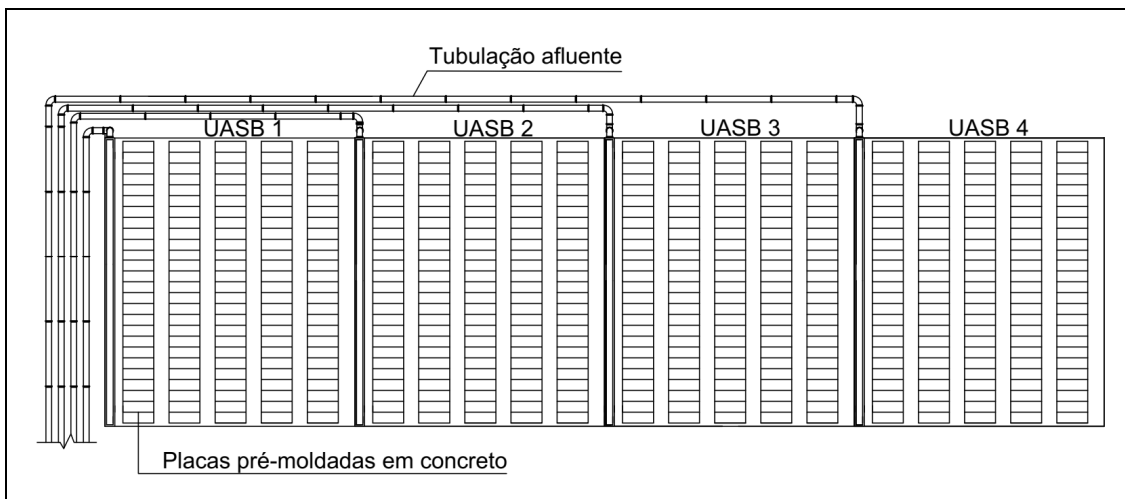


Figura 18. Representação da localização das placas pré-moldadas em concreto, acima dos compartimentos de decantação dos reatores UASB.

Chernicharo (2007) recomenda, também, a redução do diâmetro na saída das tubulações, entre 40 mm e 50 mm, de modo a garantir velocidades de saída superiores, usualmente maiores do que 0,40 m/s. Adotou-se o diâmetro de saída de 40 mm, calculando as velocidades conforme a Eq. 9, obtendo-se velocidades de saída de 0,43 m/s e 0,62 m/s para as vazões média e máxima, respectivamente.

Conforme já discutido no item 5.1, para distribuição do esgoto, a ETE conta com uma caixa de distribuição na saída do tratamento preliminar, que receberá a vazão total de projeto, correspondente a 856 L/s (vazão média) e 1244 L/s (vazão máxima). Essa caixa direciona equitativamente, as vazões entre os oito reatores, de modo que cada um receba 107 L/s em termos de vazão média e 155,5 L/s em termos de vazão máxima. Cada reator conta com um canal de distribuição superior que recebe tal vazão através de tubulações de 500 mm conectadas à caixa de distribuição. Visando aproveitar as tubulações de chegada, bem como parte da estrutura dos canais foi proposto a construção de uma nova caixa de distribuição para cada reator UASB, de modo que a mesma alimente cada um dos cinco novos canais que serão alocados acima das placas pré-moldadas.

Cada nova caixa de distribuição receberá, portanto, 107 L/s e 155,5 L/s em termos de vazões média e máxima, respectivamente. Tais vazões serão distribuídas para cinco canais, cada qual responsável pela alimentação de 40 tubos de distribuição, conforme ilustrado na Figura 19.

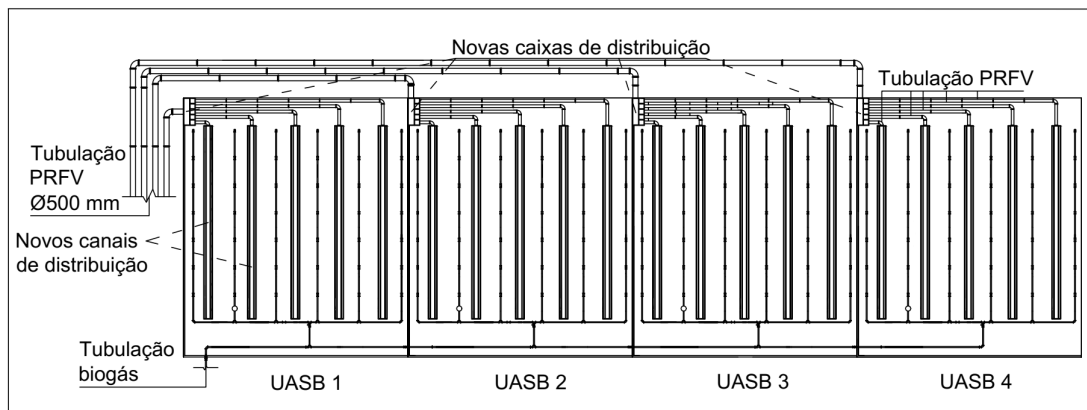


Figura 19. Esquema da configuração proposta para alocação dos novos compartimentos de distribuição (caixas e canais).

A Figura 20 representa esquematicamente as cotas propostas para alocação dos compartimentos de distribuição, de modo que o sistema proposto seja implantado contemplando o escoamento natural do esgoto sem a necessidade de bombeamento. Além disso, previu-se a instalação do sistema de tubulações para coleta de biogás de modo que não haja conflitos durante a execução dos dois sistemas.

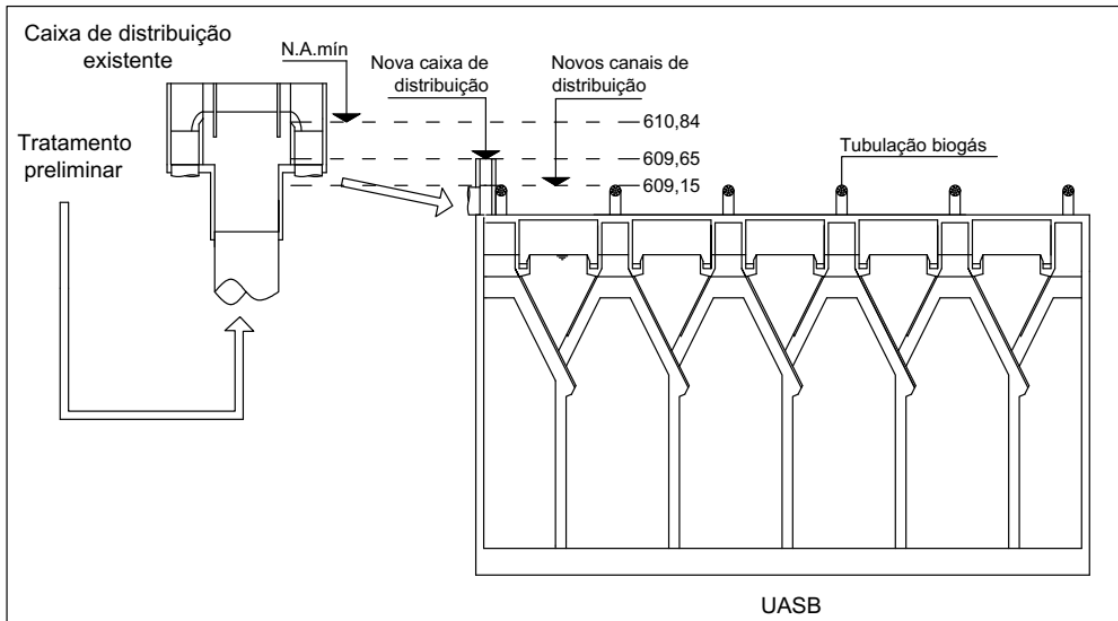


Figura 20. Representação das cotas de projeto para alocação dos novos compartimentos de distribuição propostos para os reatores UASB.

A Figura 21 representa, esquematicamente, a concepção proposta para a nova caixa de distribuição, acima de cada um dos reatores UASB 1 a 4, que terá a função de distribuir a vazão recebida da caixa de distribuição já existente entre os cinco novos canais de distribuição, para cada reator. Propõe-se a instalação de vertedores retangulares de altura ajustável visando a flexibilidade operacional e a confecção em material PRFV, conforme as recomendações de proteção contra corrosão. Ademais, sugere-se a adoção de fundo inclinado, conforme as recomendações revisadas.

A Figura 22 representa, esquematicamente a concepção sugerida para os novos canais de distribuição do esgoto. Visando a flexibilidade executiva e operacional, sugere-se a adoção de sistema pré-fabricado em PRFV, de modo que atenda às recomendações de resistência à corrosão e garanta o adequado nivelamento do sistema. A Figura 23 esquematiza a configuração proposta para um módulo de reator UASB, considerando a instalação da nova

caixa de distribuição, de tubulações em PRFV para direcionamento das vazões para os novos canais de distribuição, a ser também implantados, bem como a previsão dos dutos de coleta de biogás a ser implantados posteriormente, objetivando harmonia executiva na implantação dos dois sistemas.

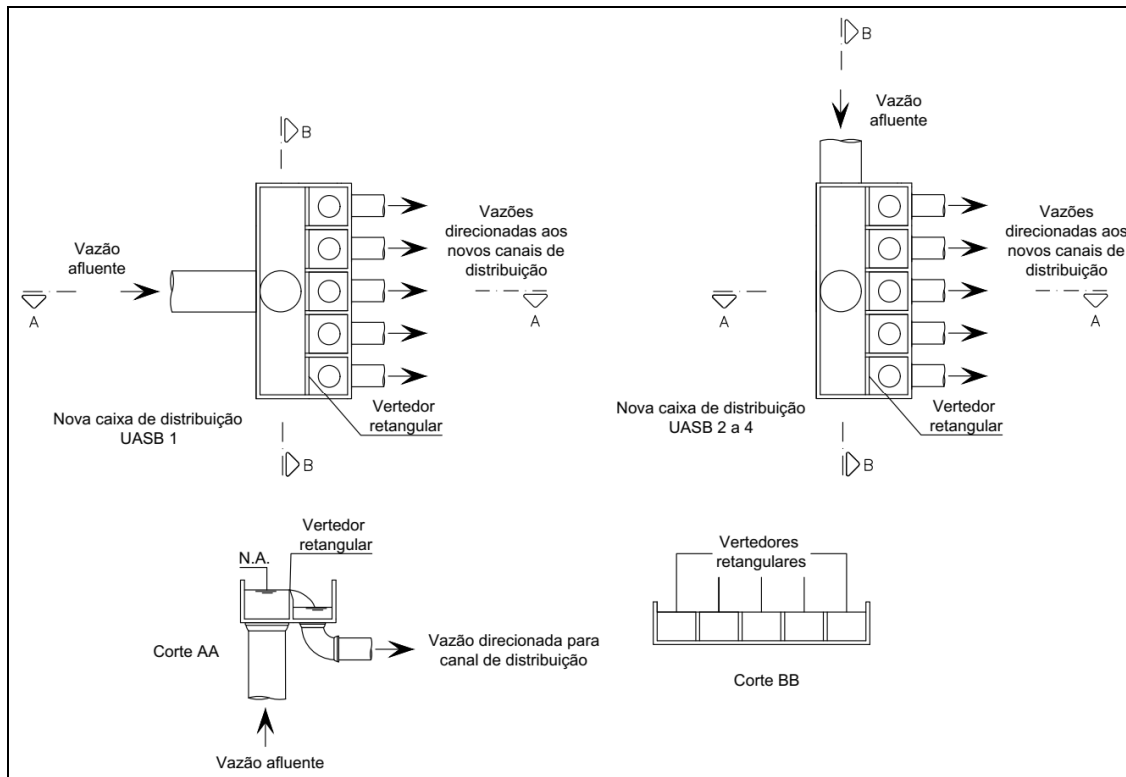


Figura 21. Caixa de distribuição do esgoto proposta para os reatores UASB.

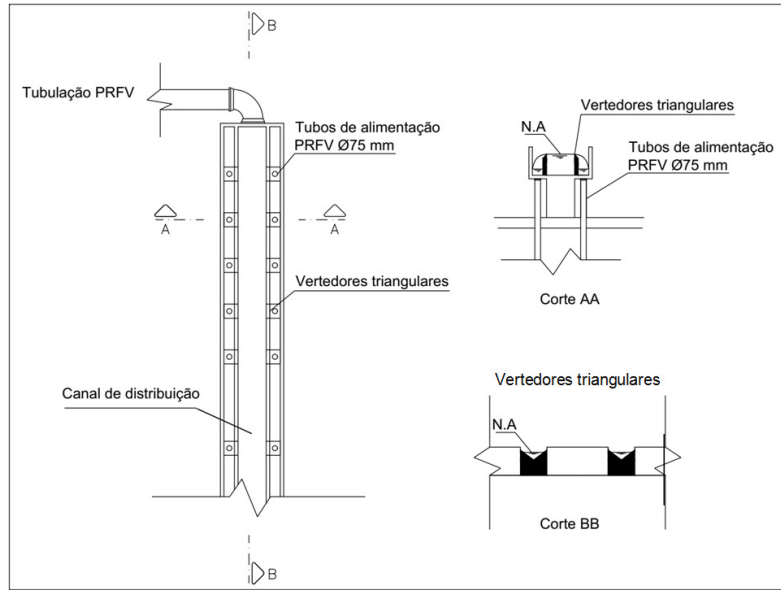


Figura 22. Esquema do canal de distribuição proposto para os reatores UASB.

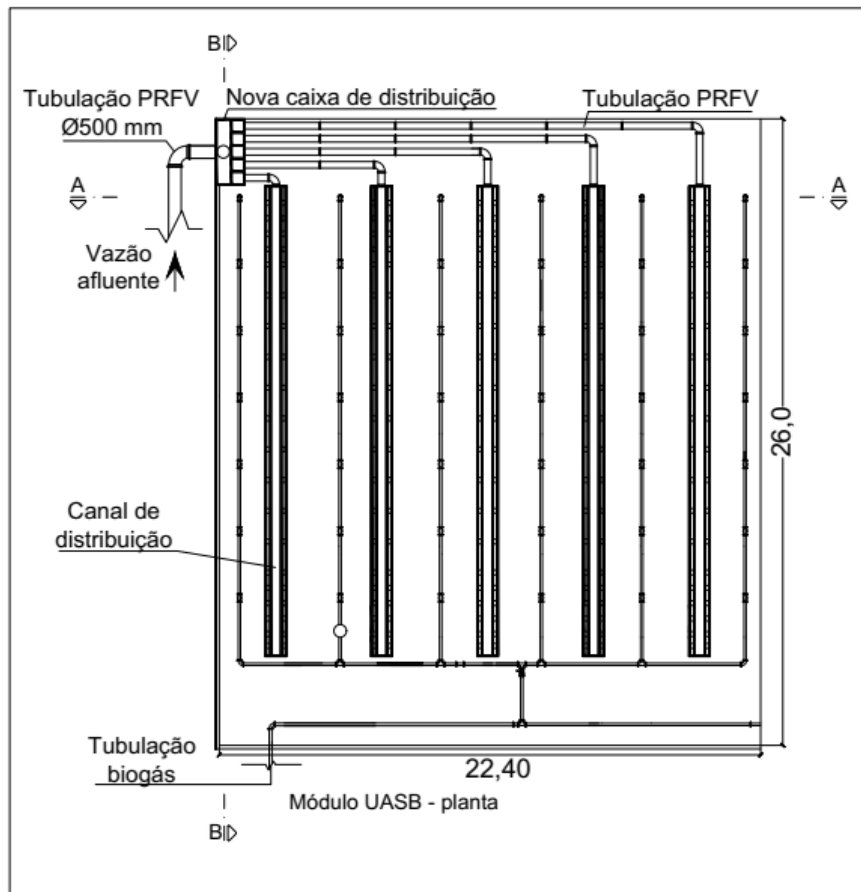


Figura 23. Configuração proposta para um módulo de reator UASB.

A Figura 24 e a Figura 25 representam o corte transversal e o corte longitudinal de um módulo de UASB considerando as propostas de adequação do sistema de distribuição de afluentes nos reatores UASB, respectivamente. O sistema de distribuição proposto é composto por tubulações verticais individuais e sem ramificações, com diâmetro de 75 mm, de modo a evitar obstruções. Cada tubo apresenta área de influência de 2,9 m² em seus pontos de descarga, permitindo a distribuição homogênea no fundo dos reatores. Além disso, prevê diâmetro de 40 mm no bocal de saída dos tubos a uma distância de 0,20 m do fundo do reator, com a finalidade de evitar acumulação de material inerte e obstruções dos bocais. O sistema é composto por compartimentos de distribuição superiores, visando facilitar a observação de pontos de obstruções.

As velocidades descendentes foram verificadas, sendo inferior a 0,2 m/s na descida dos tubos e superior a 0,4 m/s na saída dos bocais, de modo que evite a entrada de bolhas de ar e favoreça a não acumulação de material inerte no fundo. Além disso recomendou-se a utilização de PRFV, material resistente à corrosão para tubulações e compartimentos de distribuição.

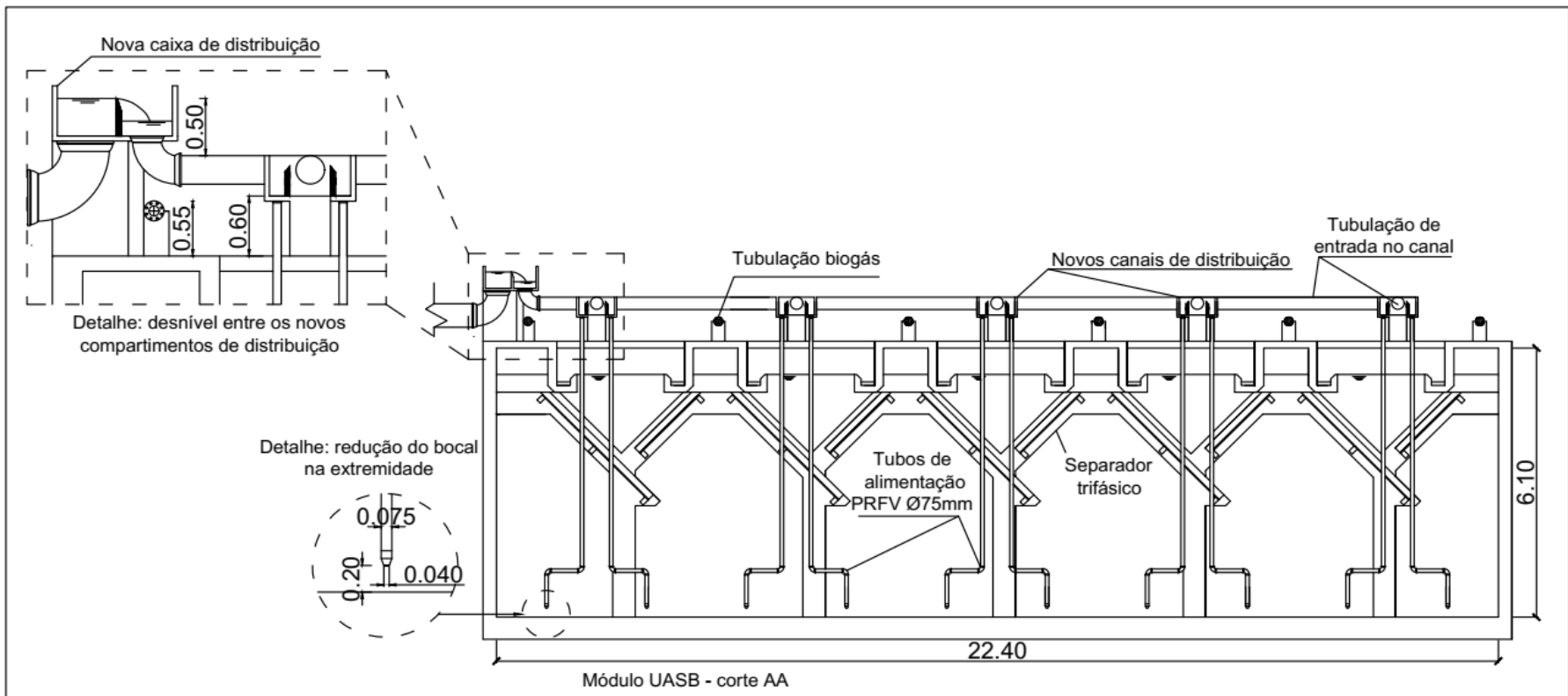


Figura 24. Esquema em corte transversal da configuração proposta para um módulo de reator UASB.

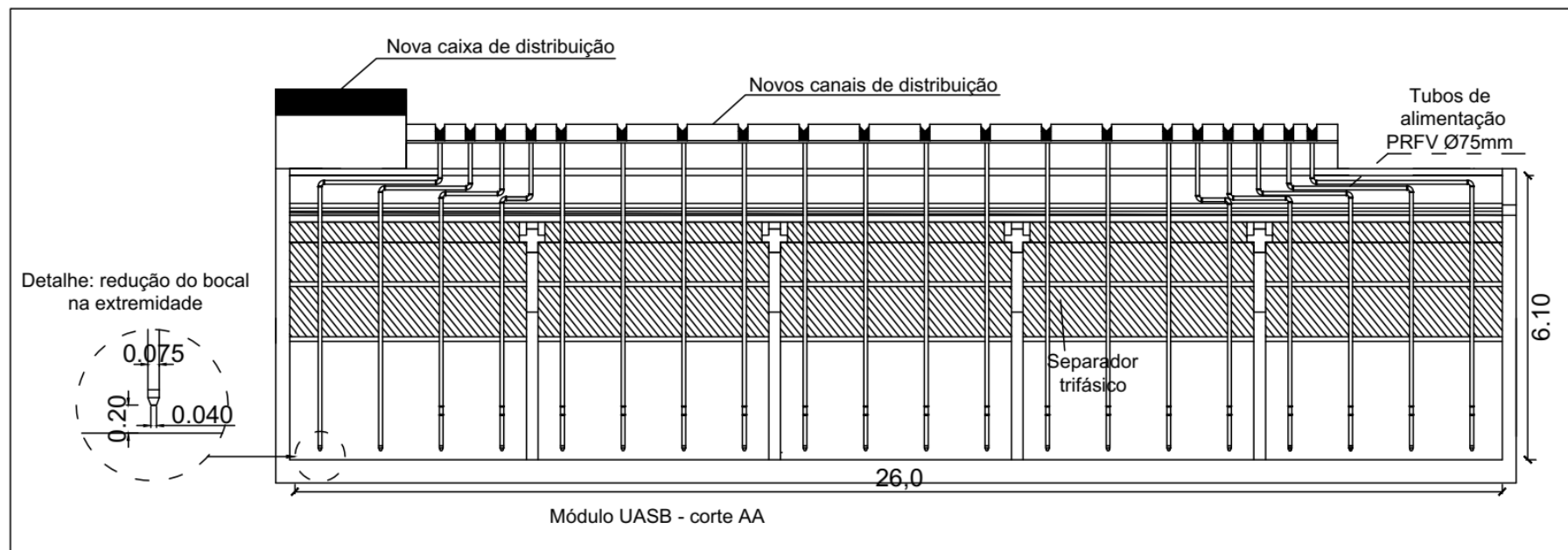


Figura 25. Esquema em corte longitudinal da configuração proposta para um módulo de reator UASB.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo realizado teve como finalidade promover uma discussão crítica a respeito das principais dificuldades encontradas em estações de tratamento de esgoto, na implantação de órgãos auxiliares constituintes de reatores UASB e possibilitar, com base nos principais problemas reportados pela literatura e em sua aplicação na prática, a busca por soluções viáveis técnica e economicamente à realidade das ETEs.

A reunião de diversas recomendações de autores especializados em cada um dos dispositivos auxiliares abordados teve como propósito favorecer a sistematização de métodos para o projeto de tais dispositivos, uma vez que diversas recomendações técnicas não são consideradas normas, enquanto outras são abordadas de forma ampla, de modo que o projeto desses sistemas esteja associado a uma visão subjetiva de engenheiros e projetistas, levando à concepções de projeto inadequadas.

Com relação ao estudo de caso, as propostas de adequação dos reatores UASB com dispositivos auxiliares já implementados tiveram o objetivo de possibilitar adequações econômica e tecnicamente viáveis à estação, bem como favorecer o melhor desempenho dos reatores e prever possíveis problemas operacionais futuros, adequando alguns aspectos de projeto em relação às recomendações técnicas. No entanto, ressalta-se que as soluções propostas ainda não tornam todo o sistema adequado, considerando o que preconizam as normas técnicas e a literatura especializada.

No caso dos vertedores que, ao que tudo indicaram os cálculos, operariam afogados, com a proposta de adequação espera-se que os mesmos operem adequadamente e possibilitem a verificação de obstruções de forma individual. No que tange à entrada de efluente no fundo do reator, a proposta de adequação referentes aos orifícios visa reduzir riscos de obstruções e acúmulo de material inerte nas tubulações, que poderia comprometer a distribuição homogênea de efluente.

Quanto ao sistema de distribuição preliminarmente proposto objetivou-se o início de uma concepção de projeto a ser desenvolvida e aperfeiçoada, tendo como base as diretrizes estabelecidas pelas normas e literatura técnica revisada, visando o atendimento às recomendações propostas e, conseqüentemente a garantia de eficiência dos reatores UASB no tratamento de esgotos.

7. REFERÊNCIAS

- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 12209: **Elaboração de projetos hidráulico-sanitários de estações de tratamento de esgotos sanitários**. 2ª ed. Rio de Janeiro, 2011. 57 p
- ALMEIDA, P. G. S., BRESSANI RIBEIRO, T., SILVA, B. S., AZEVEDO, L. S., CHERNICHARO, C. A. L. Contribuição para o aprimoramento de projeto, construção e operação de reatores UASB aplicados ao tratamento de esgoto sanitário – Parte 6: Qualidade do Efluente. **Revista DAE** – edição especial, v. 66, n. 214, p. 90-108, 2018.
- AZEVEDO NETTO, J. M., FERNÁNDEZ, M. F. **Manual de Hidráulica**. 9 ed. São Paulo. Blucher, 2015. 632p.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (BRASIL). **Atlas esgotos: despolição de bacias hidrográficas** / Agência Nacional de Águas, Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. Brasília: ANA, 2017. 88 p.
- BRANDT, E. M. F., SANTOS, J. M. B., SOUZA, C. L., POSSETTI, G. R. C., BRESSANI-RIBEIRO, T. B., CARVALHO-JÚNIOR, A. N., CHERNICHARO, C. A. Contribuição para o aprimoramento de projeto, construção e operação de reatores UASB aplicados ao tratamento de esgoto sanitário – Parte 4: Controle de corrosão e emissões gasosas. **Revista DAE** – edição especial, v. 66, n. 214, p. 56-72, 2018.
- BRESSANI-RIBEIRO, T., LOBATO, L.C.S., MELO, V.R., PEGORINI, E., NONATO, S., CHERNICHARO, C.A.L. Contribuição para o aprimoramento de projeto, construção e operação de reatores UASB aplicados ao tratamento de esgoto sanitário – Parte 2: Tratamento preliminar. **Revista DAE** – edição especial, v. 66, n. 214, p. 17-29, 2018.
- CHERNICHARO, C. A. L., BRESSANI-RIBEIRO, T., PEGORINI, E., POSSETTI, G. R. C., MIKI, M. K., NONATO, S. Contribuição para o aprimoramento de projeto, construção e operação de reatores UASB aplicados ao tratamento de esgoto sanitário – Parte 1: Tópicos de Interesse. **Revista DAE** – edição especial, v. 66, n. 214, p. 5-16, 2018.
- CHERNICHARO, C. A. L. **Reatores anaeróbios**. 2ª ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental. Universidade Federal de Minas Gerais, 2007. 380 p. (Princípios do tratamento biológico de águas residuárias, v.5).
- Di BERNARDO, L., Di BERNARDO, A. D., VOLTAN, P. E. N. **Métodos e Técnicas de Tratamento de Água**. 3ª ed. São Carlos. LDiBe Editora, 2017. 1246p.
- JORDÃO, E. P., PESSOA, C., A. **Tratamento de Esgotos Domésticos**. 8ª ed. Rio de Janeiro. ABES – Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2017. 916p.
- LOBATO, L. C. S., BRESSANI-RIBEIRO, T., SILVA, B. S., FLÓREZ, C. A. D., NEVES, P. N. P., CHERNICHARO, C. A. L. Contribuição para o aprimoramento de projeto, construção e operação de reatores UASB aplicados ao tratamento de esgoto sanitário – Parte 3: gerenciamento de lodo e espuma. **Revista DAE** – edição especial, v.66, n. 214, p. 30-55, 2018
- METCALF, L., EDDY, H. P. **Tratamento de Efluentes e Recuperação de Recursos**. Tradução: Ivanildo Hespanhol, José Carlos Mierzwa. 5ª ed. Porto Alegre: AMGH, 2016. 1984p.
- MIKI, M.K. Dilemas do UASB. **Revista DAE**, v.183, n.1504, p.25-37, 2010.
- SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO. **Diagnóstico dos serviços de água e esgotos - 2017** / Ministério do Desenvolvimento Regional, Secretaria Nacional de Saneamento. Brasília: SNS/MDR, 2019. 226 p.