

CAPÍTULO 7

Processos compactos de tratamento (Sistrates®)

Daniela Cândido, Marcelo Bortoli e Airton Kunz

Introdução

Atualmente, existem tecnologias eficientes para o tratamento dos resíduos da suinocultura. No entanto, a cadeia brasileira de produção de suínos tem dificuldades de externalizar os custos ambientais e, conseqüentemente, incorporar esses custos na produção. Esse fato gerou uma defasagem tecnológica na suinocultura, quando se fala em tratamento dos dejetos.

Os principais fatores que dificultam o tratamento dos dejetos são a percepção dos produtores sobre os sistemas de tratamento (que eles julgam ser de alta complexidade), falta de fiscalização por parte dos órgãos ambientais e custos elevados de implementação. A fim de buscar alternativas para estas questões, o Sistrates® (Sistema de Tratamento de Efluente da Suinocultura) foi desenvolvido pela Embrapa Suínos e Aves em parceria com a Universidade Federal de Santa Catarina.

O Sistrates® conta com a remoção conjunta de carbono, nitrogênio e fósforo. Este projeto foi concebido pelos pesquisadores Airton Kunz, Hugo Moreira Soares, Marcelo Bortoli, Marcelo Miele e Ricardo Luis Radis Steinmetz e teve seu pedido de patente concedido sob Patente de Invenção N° PI 1100464-9, em fevereiro de 2021. A fim de apre-

sentar uma solução tecnológica aplicável/viável a produtores suínos, este capítulo exemplificará como este sistema funciona e como pode ser implementado.

Conceito do Sistrates®

O Sistrates® é um sistema de tratamento de efluentes que visa reduzir o impacto ambiental dos resíduos provenientes da suinocultura a partir da remoção conjunta de carbono, nitrogênio e fósforo (Kunz; Fongaro, 2019). Sua configuração é composta por três módulos, sendo o primeiro o Módulo Bio, o segundo o Módulo N e o terceiro o Módulo P (Figura 1). O sistema foi concebido para ser aplicado de forma modular e adicional, de acordo com as necessidades de tratamento.

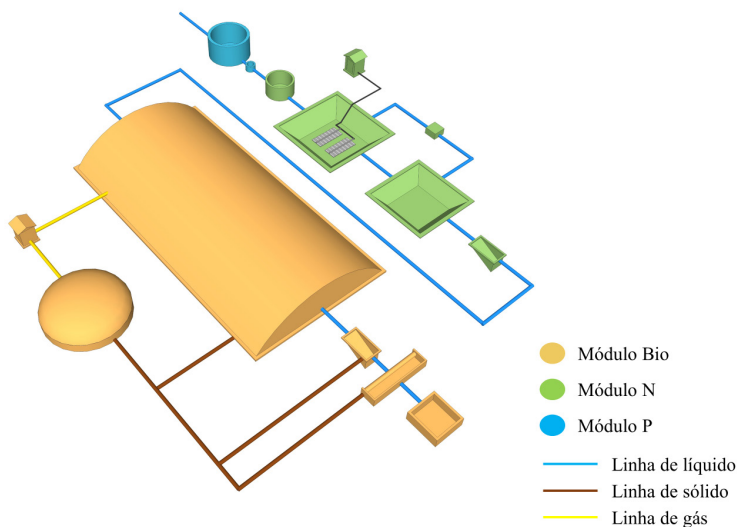


Figura 1. Ilustração do Sistrates®, apresentando os principais processos envolvidos para o tratamento de efluente da suinocultura.

Fonte: Cândido (2021).

O Módulo Bio tem como principal função a remoção de sólidos e carbono orgânico, separando em duas rotas distintas, uma para o líquido e outra para os sólidos. Consiste primeiramente na separação da fração sólida e líquida, para posteriormente tanto o sólido como o líquido

serem direcionados para a biodigestão anaeróbia. Neste módulo, há a geração do biogás, um subproduto com alto valor agregado, o qual pode ser utilizado para a geração de energia térmica e/ou elétrica (Kunz *et al.*, 2011; Miele *et al.*, 2015).

O líquido é encaminhado para os biodigestores do tipo Biodigestores de Lagoa Coberta (BLC). Já a fração sólida é direcionada a um reator CSTR (do inglês *Continuous Stirred-Tank Reactor*) (Kunz; Fongaro, 2019). O efluente do BLC é encaminhado para o módulo N.

O Módulo N atua na remoção biológica de nitrogênio através da nitrificação/desnitrificação. Este processo ocorre em dois reatores em série, contínuos e de mistura completa, sendo o primeiro um reator anóxico (desnitrificante) seguido de um reator aeróbio (nitrificante). Com o objetivo de preservar os reatores desnitrificante e nitrificante, a primeira etapa do módulo N é um decantador, a fim de controlar o teor de sólidos na entrada do sistema. Além disso, o módulo possui ainda um decantador final, com o objetivo de evitar a perda em excesso de biomassa, e ser possível recircular a biomassa no reator nitrificante (Bortoli, 2010).

O último módulo do Sistrates®, o Módulo P, consiste na remoção de fósforo do efluente final a partir da precipitação química, utilizando uma suspensão de cal hidratada (Ca(OH)_2). Nesta etapa do processo ocorre a formação de um subproduto de alto valor agregado, o fosfato de cálcio, que pode ser utilizado como fertilizante ou ainda como insumo para nutrição animal (Tavernari *et al.*, 2016; Kunz; Fongaro, 2019).

Além dos subprodutos que se obtém com este sistema, algumas outras vantagens devem ser abordadas, como:

- O controle da poluição do ar, solo e água;
- O reúso da água na granja para limpeza das instalações.
- Possibilidade de lançamento do efluente final em corpo receptor, atingindo padrões de lançamento conforme resolução Conama 430/2011 e IN 11 – IMA/SC.
- Redução da área necessária, possibilitando a expansão dos sistemas produtivos.

O Sistrates® tem como principais beneficiárias granjas suinícolas com restrição de área ou em expansão, cooperativas, agroindústrias, empreendimentos do setor de gás e energia a partir de biomassa, projetos de Mecanismos de Desenvolvimento Limpo (MDL), além de poder ser aplicado a efluentes da indústria alimentícia (Kunz *et al.*, 2011).

Noções básicas de dimensionamento e operacionalização

O dimensionamento de um sistema de tratamento é uma etapa primordial para a obtenção de resultados satisfatórios de eficiência de tratamento. Nesta etapa, deve-se ter atenção e confiabilidade nos dados a serem utilizados. Aqui será abordada cada etapa do processo separadamente, oferecendo informações técnicas de dimensionamento do Sistrates®.

Separação sólido-líquido

O processo de separação sólido-líquido visa segregar as frações sólida e líquida, para que ambas possam ser destinadas adequadamente durante as demais etapas do processo. Além disso, esse processo pode potencializar a produção de biogás de cada fração (Amaral *et al.*, 2016).

Nesta etapa, recomenda-se primeiramente que o dejetos suíno fresco passe por um sistema de grades para a retenção de sólidos grosseiros que possam interferir no funcionamento dos demais equipamentos do sistema, como as bombas e tubulações de transporte do dejetos. Posteriormente, o dejetos deve ser encaminhado para um sistema onde haja a separação de sólidos de até 2 mm. Para dejetos de suínos, recomenda-se o uso de peneiras com escovas rotativas.

A utilização de um decantador antecedendo os BLCs é recomendada em função dos sólidos fixos que não são retidos pela peneira, os quais, caso entrem em grande quantidade dentro deste modelo de biodigestor, causarão o assoreamento do mesmo. Este decantador deve ser dimensionado em função da vazão de alimentação e TRH (que deve ser

de ao menos 3,5 horas), com uma inclinação horizontal de 60° e razão comprimento largura mínima de 2, ou seja, comprimento sendo igual a 2 vezes a largura (Cândido, 2021). Deve-se adicionar a este decantador uma bomba para a retirada do lodo. A Equação 1 traz o cálculo para obtenção do volume útil deste decantador, sendo:

$$V_{\text{útil}} = Q * TRH \quad \text{Equação 1}$$

Onde:

Q = Vazão de dejetos suíno (m³.h⁻¹)

TRH = Tempo de retenção hidráulica (h)

Para saber a vazão horária de dejetos suíno basta dividir a vazão diária pelas horas de funcionamento deste sistema. Para a realização do descarte de lodo, um balanço de massa deve ser realizado, em função da carga de sólidos fixos que entram e saem deste decantador, conforme Equação 2, que resultará em uma carga de sólidos fixos acumulada diariamente no decantador.

$$C_{SF \text{ acumulado}} = (c_{SF \text{ entrada}} - c_{SF \text{ saída}}) \cdot Q_{\text{entrada}} \quad \text{Equação 2}$$

Onde:

C_{SF acumulado} = Carga de sólido fixo acumulada no decantador diariamente (kg d⁻¹)

C_{SF entrada} = Concentração de sólido fixo da entrada (kg_{SF}.m⁻³)

C_{SF saída} = Concentração de sólido fixo da saída (kg_{SF}.m⁻³)

C_{entrada} = Vazão diária de dejetos na alimentação do decantador (kg_{SF}.m⁻³)

Através da C_{SF acumulado} e após análise da concentração de sólidos fixos no lodo, é possível determinar a vazão de descarte de lodo pela Equação 3.

$$Q_{\text{descarte}} = \frac{C_{SF \text{ acumulado}}}{c_{SF \text{ lodo}}} \quad \text{Equação 3}$$

Onde:

Q_{entrada} = Vazão diária de dejetos na alimentação do decantador ($\text{kg}_{\text{SF}} \cdot \text{d}^{-1}$)

$C_{\text{SF acumulado}}$ = Carga de sólido fixo acumulada no decantador diariamente ($\text{kg} \cdot \text{d}^{-1}$)

$C_{\text{SF lodo}}$ = Concentração de sólido fixo no lodo ($\text{kg}_{\text{SF}} \cdot \text{m}^{-3}$)

Observação: Com o valor da vazão diária a ser descartada do decantador (Q_{descarte}) obtido, recomenda-se que seja descartado ao longo do dia, conforme o tempo de alimentação. Por exemplo, se o decantador receber alimentação durante 10 horas, o volume de lodo a ser descartado deve ser dividido durante este período. Recomenda-se que haja um descarte a cada 30 minutos.

Digestão anaeróbia

O processo de digestão anaeróbia tem por finalidade remover carbono orgânico do dejetos, transformando em biogás. Para definição do modelo ideal de biodigestor a ser utilizado, alguns parâmetros devem ser levados em consideração, como:

- Tipo de substrato.
- Condições ambientais.
- Nível de investimento que se pretende fazer.

O Sistrates® utiliza em seu sistema dois modelos de reator, BLC e CSTR, os quais realizam a biodigestão do dejetos suíno das frações líquida e sólida, respectivamente. O biodigestor BLC é o modelo mais utilizado no Brasil em função de seu baixo custo de implementação e baixa complexidade de operação. Recomenda-se implementar uma rotina de manejo de lodo dentro deste biodigestor, a fim de prolongar sua vida útil, evitando o assoreamento.

Para o dimensionamento deste reator, o primeiro passo é estabelecer a vazão diária de alimentação ($Q_{\text{alimentação}}$). O TRH deste modelo de reator, quando antecedendo o módulo N, deve variar entre 20 a 30 dias e a carga orgânica volumétrica (COV) deve estar entre 0,3 a 0,5 $\text{kg}_{\text{SV}} \cdot \text{m}_{\text{reator}}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$.

A partir disto, e da concentração de sólidos voláteis (SV) do dejetos suíno que entra no reator, é possível verificar o volume necessário para o BLC através da Equação 4.

$$COV = \frac{Q_{entrada} \cdot C_{SV\ entrada}}{V_{útil}} \quad \text{Equação 4}$$

Onde:

COV = Carga orgânica volumétrica ($\text{kg}_{\text{SV}} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$)

Q_{entrada} = Vazão diária de dejetos na alimentação do decantador ($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)

C_{SV entrada} = Concentração de sólido volátil na entrada ($\text{kg}_{\text{SV}} \cdot \text{m}^{-3}$)

V_{útil} = Volume útil (m^3)

Em seguida, a fim de verificar o TRH necessário em função dos parâmetros acima citados, a Equação 1 deve ser aplicada. Para manejo de lodo deste biodigestor, deve-se utilizar a mesma metodologia abordada para o decantador da etapa de separação sólido-líquido.

O reator CSTR é caracterizado por seus artifícios de agitação e temperatura controlada da biomassa. Logo, este modelo de reator suporta concentrações de sólidos maiores quando comparado ao modelo BLC. Recomenda-se que este modelo seja utilizado para a fração sólida do dejetos suíno, uma vez que esta é a fração de mais difícil biodegradabilidade. Para o dimensionamento, alguns parâmetros devem ser respeitados, como COV e TRH. Já a concentração de SV não deve ultrapassar $10\% \text{ m} \cdot \text{v}^{-1}$, ou seja, $100 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$. Reactores CSTR devem ser operados com COV entre 1 a $4 \text{ kg}_{\text{SV}} \cdot \text{m}_{\text{reator}}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$ e TRH acima de 20 dias. Para estabelecimento do volume deste reator, a Equação 2 pode ser aplicada.

A temperatura da biomassa deve ser mantida, preferencialmente, em $37 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$, e o sistema de agitação pode ocorrer de forma intermitente, 15 minutos ligada a cada 45 minutos. Além disso, sempre que houver entrada de alimentação, o sistema de agitação deve ser acionado.

Quanto à partida dos reatores anaeróbios, tanto o BLC como o CSTR podem ser iniciados somente com seu preenchimento total com dejetos suíno fresco. Posteriormente, iniciar a alimentação de projeto. Caso haja a possibilidade da adição de biomassa aclimatada, sugere-se a adição na proporção de 30% de biomassa aclimatada e 70% de dejetos suíno fresco. Idealmente, não se deve dar partida nesse tipo de processo nos meses mais frios do ano, pois a temperatura, principalmente no BLC, impacta muito a eficiência do processo.

Remoção de nitrogênio

O digestato resultante do reator BLC pode ter um incremento na concentração de nitrogênio amoniacal devido à degradação de nitrogênio orgânico presente nos dejetos suínos. Com isso, o tratamento dessa fração para a remoção deste contaminante é fundamental para a segurança ambiental da atividade suinícola. O Módulo N é o responsável pela remoção do nitrogênio presente no digestato dos reatores BLCs, sendo realizado por meio da nitrificação e desnitrificação, baseada no processo de MLE modificado, conforme estudado por Bortoli *et al.* (2019).

Este módulo é composto por dois reatores e dois decantadores. As unidades reacionais são um reator desnitrificante anóxico (sem presença de oxigênio) e outro nitrificante (com a presença de oxigênio). Ambos são em série e o primeiro reator, o reator desnitrificante, é alimentado com a saída do BLC. O segundo reator, o reator nitrificante, é alimentado com a saída do desnitrificante. O decantador que antecede o primeiro reator tem por objetivo reduzir o teor de sólidos e carbono orgânico que possa sair do BLC, evitando sobrecarga ao reator desnitrificante. Porém, o mesmo deve ser acionado somente quando necessário, normalmente em meses com temperaturas ambiente mais baixas. Deve ser posto em operação quando uma análise de sólidos sedimentáveis indicar que a saída do BLC apresenta teores acima de 200 mL/L. O dimensionamento deste decantador segue o dimensionamento do decantador que antecede o BLC.

Ambos os reatores podem ser construídos em diferentes materiais, como aço, concreto, polipropileno, fibra de vidro, entre outros, ou simplesmente escavados no solo e impermeabilizados com geomembrana. O formato pode ser circular ou retangular. Quando escavados no solo, a depender da estrutura do solo em questão, devem ter inclinação das paredes variando entre 45° e 60°.

O reator nitrificante é a etapa mais importante do processo de remoção de nitrogênio, pois é nele que ocorrerá a transformação do nitrogênio amoniacal em nitrito e nitrato. Para que o nitrogênio na forma de nitrito e nitrato seja efetivamente removido na forma de nitrogênio gasoso, o meio do reator nitrificante é recirculado para o reator desnitrificante a uma razão de 4,5 vezes a vazão de alimentação. Assim, se a vazão de entrada do módulo N é 100 m³.d⁻¹, a vazão de recirculação deve ser de 450 m³.d⁻¹.

Além disso, para se evitar a perda de biomassa do módulo N, o decantador após o reator nitrificante concentra a biomassa, que também é recirculada para o reator desnitrificante, a uma vazão de uma vez a vazão de entrada do módulo N. Assim, após passar pelo decantador, o sobrenadante sai do módulo N e é direcionado ao módulo subsequente.

Para que a reação de oxidação do nitrogênio na amoniacal total (NAT) ocorra é necessário que haja injeção de oxigênio dentro do reator nitrificante. A quantidade necessária de oxigênio irá variar de acordo com a caracterização do dejetos suíno de cada granja. Para o processo de injeção de oxigênio recomenda-se o uso de sopradores de oxigênio acoplados a um sistema de aeração removível do tipo *air grid*, com difusores de membrana tubular.

Para determinar o volume dos reatores, deve-se calcular inicialmente o volume do reator nitrificante. O volume do reator desnitrificante deverá ser de 80% do volume do reator nitrificante. Ao se calcular o volume do reator nitrificante, precisam ser observados alguns critérios básicos, como: carga de nitrogênio amoniacal na entrada do sistema, alcalinidade presente e carbono orgânico necessário, uma vez que o processo desnitrificante é heterotrófico, ou seja, necessita de fonte de carbono orgânico.

O primeiro passo, portanto, é calcular a carga de nitrogênio na entrada do reator nitrificante. A carga de nitrogênio amoniacal pode ser calculada utilizando a Equação 5.

$$C_N = [NAT] \cdot Q \quad \text{Equação 5}$$

Onde:

C_N = Carga de nitrogênio (kg.d⁻¹)

[NAT] = Concentração de nitrogênio amoniacal (kg.m⁻³)

Q_{entrada} = Vazão diária de dejetos na alimentação do decantador (m³.d⁻¹)

Ao se dividir a Equação 5 pelo volume do reator (V), podemos obter a Carga volumétrica de nitrogênio, como é apresentado na Equação 6.

$$CV_N = \frac{[NAT] \cdot Q}{V} \quad \text{Equação 6}$$

Rearranjando a Equação 6 de forma a se obter o volume como objetivo do cálculo, tem-se a Equação 7, e com esta equação pode se calcular o volume do reator nitrificante.

$$V = \frac{[NAT] \cdot Q}{CV_N} \quad \text{Equação 7}$$

Para reatores nitrificantes, sendo alimentados com digestatos de BLC, em granjas de suínos, esses sistemas não devem ser alimentados com CVN maior que 0,35 kg.m⁻³ d⁻¹. Esses valores são importantes para que o reator nitrificante tenha eficiência e não sofra sobrecarga, o que pode causar uma situação de inibição irreversível, e conseqüentemente, a perda da biomassa.

Na estimativa da necessidade de oxigênio, deve se levar em consideração que para cada unidade de nitrogênio amoniacal são necessárias 4,25 unidades de oxigênio, ou seja, se o digestato possui carga de 1.000 kg.d⁻¹ de nitrogênio amoniacal, serão necessários 4.250 kg de O₂ por dia. Portanto, o sistema de aeração deve fornecer essa quantidade mínima de oxigênio para que o processo de nitrificação ocorra. É impor-

tante também considerar a necessidade de oxigênio relativa ao carbono orgânico que sai do reator desnitrificante. Os sistemas de aeração são dimensionados pelos fornecedores dos equipamentos, mas o acompanhamento desse dimensionamento é importante para que não ocorram surpresas na operação do sistema.

Outro ponto importante a ser considerado é a necessidade de alcalinidade no processo de nitrificação. A nitrificação, quando executada isoladamente, possui demanda de 7,14 kg de CaCO_3 por kg de nitrogênio amoniacal. A grande vantagem do processo MLE modificado é que a desnitrificação supre metade da necessidade de alcalinidade. Portanto, no Sistrates® a necessidade de alcalinidade é de 3,57 kg de CaCO_3 por kg de nitrogênio amoniacal.

Com relação à construção dos reatores, como foi mencionado anteriormente, deve-se escolher o material conforme a capacidade de investimento do projeto, bem como possibilidades de aplicação de cada material. Em casos em que o solo propicia boa estabilidade, os reatores escavados e impermeabilizados são boa alternativa.

Por fim, no dimensionamento do reator nitrificante, que seja respeitada a profundidade mínima necessária, principalmente se o sistema de aeração escolhido for o do tipo *air grid*, com difusores de membranas, pois esses sistemas têm especificações de cada fabricante. Essa profundidade em geral tem valores que variam entre 3,5 m e 5 m.

Como dar partida nestes reatores?

A inicialização deste módulo deve ocorrer preferencialmente em meses com temperaturas mais altas. Isso porque o reator BLC estará em pleno funcionamento. Ambos os reatores devem ter seus volumes completados com água e ao reator nitrificante deve ser adicionado lodo nitrificante aclimatado. O volume deste lodo pode variar de acordo com a viabilidade do transporte e atividade biológica, sendo que a proporção ideal é de 2% do volume do reator. Para a aclimatação de lodo nitrificante sugere-se seguir os preceitos estabelecidos por Antes *et al.* (2020). Caso não haja a possibilidade de adição de lodo nitrificante, deve haver ciência de que o tempo de estabilização do processo será maior.

A quantidade de inóculo adicionado influenciará diretamente no tempo de estabilização do processo de nitrificação/desnitrificação. As razões das vazões devem seguir o que foi estabelecido por Bortoli (2010), como apresentado na Figura 2.

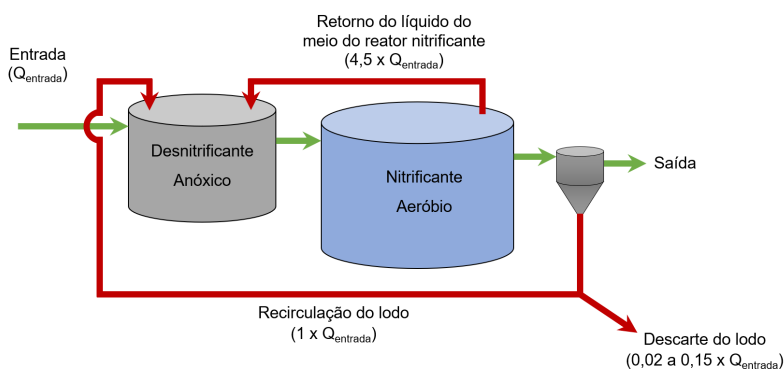


Figura 2. Razões de vazões estabelecidas para o Módulo N do Sistrates®.

O decantador que é instalado ao final deste módulo deve, preferencialmente, ter formato cônico, a fim de concentrar a biomassa nitrificante de forma mais eficaz ao fundo do reator. Além da recirculação de lodo que já foi indicada acima, deve haver também o descarte de lodo nitrificante, sendo que este deve ser otimizado ao máximo. A recomendação é de que para este descarte o trabalho seja visual, ao ponto que, enquanto não houver perda de sólidos deste decantador, o descarte de lodo não deve ser praticado.

A partir do momento em que houver perda de biomassa, o descarte de lodo deve ser acionado e aumentado ou diminuído em função deste critério. Vale ressaltar que as maiores vazões de descarte de lodo ocorrerão nos meses de temperaturas mais baixas. Na Figura 3 é possível perceber a diferença visual entre períodos onde o decantador entrava-se em bom e mau estado de funcionamento.



Autor: Daniela Cândido

Figura 3. Diferentes condições do Decantador 3, em bom (A) e mau (B) estado de funcionamento, em função de manejo de lodo adequado ou a falta de manejo de lodo.

A importância do manejo correto de lodo neste decantador é em função de que o arraste de sólidos pode prejudicar a eficiência do módulo subsequente. O arraste de matéria orgânica causará um aumento no consumo de suspensão de reagentes, e isso impactará no custo global do processo. Além disso, o lodo gerado no módulo P terá pureza inferior ao esperado, “empobrecendo” o material final.

Remoção de fósforo

O processo de remoção e recuperação de fósforo é a última etapa do Sistrates®. Apesar de ser o principal nutriente responsável pela eutrofização de ambientes aquáticos, é também um elemento essencial, não renovável, utilizado para a nutrição de plantas e formulação de rações para animais. Essa importância torna o processo de recuperação deste nutriente cada vez mais necessário.

Este módulo baseia-se na precipitação química de fósforo com o uso de uma suspensão de hidróxido de cálcio, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ e pH 9,0. O processo pode alcançar eficiência de remoção de fósforo total (PT) superior a 96%. O precipitado em seguida é separado da corrente líquida por um processo de decantação, onde os flocos de lodo gerados sedimentam.

Este módulo é composto de uma unidade reacional de mistura rápida (UMR) a qual sugere-se um TRH de 2 minutos. Nesta unidade, a agitação deve ser contínua e vigorosa. Além disso, deve possuir um controlador de pH, que fará a injeção da suspensão de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ a fim de manter o pH no valor ótimo de 9,0. O efluente oriundo do módulo N entra na UMR e têm seu pH elevado até 9,0 com a injeção da suspensão de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 10% m.v⁻¹.

Após passar pela UMR, o efluente segue para um decantador, com o objetivo de separar as frações sólida e líquida. Recomenda-se que este decantador tenha um TRH de 12 horas, tempo necessário para a separação completa das fases. A fração líquida é o efluente final deste sistema de tratamento. Já a fração sólida, deve ser direcionada a um sistema de deságue e/ou secagem de lodo, a fim de reduzir o percentual final de umidade desse material.

A inativação de patógenos é um ponto favorável desta tecnologia de tratamento. Estudos realizados por Viancelli *et al.* (2015) comprovaram que há reduções significativas de patógenos tanto na fração líquida quanto na fração sólida resultante desse processo. Houve inativação completa de *E. coli*, *Salmonella* e *P. circovirus*, tornando este material biologicamente seguro, podendo ser utilizado para reúso nas instalações, como limpeza dos galpões. Ainda é possível a utilização do lodo de fósforo gerado como fertilizante ou produto de segunda geração.

É importante que este processo esteja associado a tratamentos preliminares para remoção de nitrogênio amoniacal total (NAT), carbono orgânico total (COT) e alcalinidade, pois estes fatores influenciam negativamente na eficiência, velocidade de reação e teor de pureza de fósforo no lodo.

Ao final do módulo P teremos o efluente do Sistrates® que estará pronto para reúso nas instalações, para limpeza de baias, passível de utilização na piscicultura ou ainda com potencial para lançamento em corpo hídrico, conforme Resolução Conama nº 430/2011. Dentre as recomendações citadas, o reúso de água é a opção recomendada em prol da sustentabilidade. Por fim, a configuração deste sistema é apresentada na Figura 4.

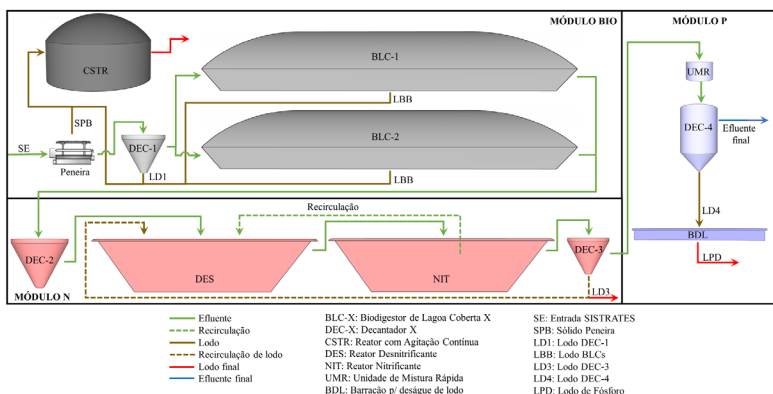


Figura 4. Fluxograma do sistema de tratamento de efluentes da suinocultura (Sistrates®) composto pelo módulo de digestão anaeróbia (módulo Bio), módulo de remoção de nitrogênio (módulo N) e módulo de remoção e recuperação de fósforo (módulo P).

Fonte: Cândido (2021).

Monitoramento do Sistrates®

O monitoramento deste processo é de extrema importância para a percepção rápida de possíveis desequilíbrios que possam ocorrer. A Tabela 1 apresenta sugestões de análises de monitoramento diárias em cada etapa deste processo.

Para o controle de todos os processos de forma eficaz, um sistema supervisório deve ser implementado. O mesmo possibilitará a operação remota de todo o sistema, como o acionamento de bombas, alteração de vazões, visualização de medidores, como, por exemplo, de oxigênio dissolvido no reator nitrificante, além da visualização e identificação de possíveis problemas que possam ocorrer com algum equipamento. Esse sistema supervisório possibilitará ações internas ou externas, via celular, o que permite a tomada rápida de decisão. A Tabela 2 faz um compilado de tudo o que foi dito para uso no dimensionamento deste sistema de tratamento.

Todos os balanços de massa e energia do processo estão disponíveis em Cândido *et al.* (2022) e Cândido (2021), baseados em 2 anos de monitoramento contínuo da Unidade de Referência Tecnológica (URT) do Sistrates®, localizada no município de Videira, no estado de Santa Catarina.

Tabela 1. Análises de monitoramento diário para cada etapa do sistema de tratamento Sistrates®.

Módulo	Etapa	Vazão (m³)	pH	Temperatura (°C)	ORP (mV)	OD (mg.L ⁻¹)	Sólidos sedimentáveis (mL.L ⁻¹)
Bio	Peneira	X					
	Decantador	X					X
	BLC	X	X	X	X		X
	CSTR	X	X	X	X		X
N	Desnitrificante	X	X	X	X		X
	Nitrificante	X	X	X	X	X	X
	Decantador	X					X
P	UMR	X	X				X
	Decantador						X

Tabela 2. Principais funções e especificidades de equipamentos utilizados no Sistrates®.

Equipamento	Funcionalidade	Recomendações
Peneira	Retenção de sólidos maiores que 2 mm	Escovas rotativas Crivos de 2 mm
Decantador	Retenção de sólidos fixos	TRH: 3,5 horas Inclinação horizontal de 60° Bomba para manejo de lodo
Biodigestor de Lagoa Coberta (BLC)	Digestão anaeróbia da fração líquida	COV: $0,3 - 0,5 \text{ kg}_{\text{SV}} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$ SV: até $6 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ TRH: 35 – 40 dias Bomba para manejo de lodo
Reator de Agitação Contínua (CSTR)	Digestão anaeróbia da fração sólida	COV: $1 - 4 \text{ kg}_{\text{SV}} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$ TRH: acima de 20 dias Aquecimento da biomassa a 37 °C Agitador para biomassa Formato levemente cônico na base para descarte de lodo
Reator Desnitrificante	Etapa para a remoção de nitrogênio	Sistema de agitação leve Reator anóxico (sem oxigênio)
Reator Nitrificante	Etapa para a remoção de nitrogênio	Sistema de aeração
Decantador para recirculação de biomassa	Recirculação de biomassa e descarte de lodo	Formato cônico Bomba para manejo de lodo

Continua...

Tabela 2. Continuação...

Equipamento	Funcionalidade	Recomendações
Unidade de mistura rápida	Precipitação química para remoção de fósforo	Sistema de agitação TRH: 2 min Elevação de pH até 9,0 Suspensão de Ca(OH) ₂ 10% m.v ⁻¹
Unidade de mistura lenta (decatador)	Separação física das fases sólida e líquida	TRH: 12 horas Sistema de manejo de lodo
Sistema supervisório	Automação e supervisão de todo o processo, como acionamento de bombas, regulação de vazões, observação de equipamentos de medições, assim como operação remota via celular	Integração de todos os equipamentos envolvidos no sistema

Considerações finais

O tratamento de dejetos de suínos não é mais uma alternativa no Brasil e sim uma necessidade. Com isso, a opção por processos compactos de tratamento tende a ser mais atrativa, uma vez avaliados os pontos positivos e negativos.

O Sistrates® apresenta-se como uma alternativa eficiente e economicamente favorável para os produtores de suínos. O sistema promove a remoção de poluentes como matéria orgânica, nitrogênio e fósforo, além de ter como resultado subprodutos como a energia elétrica e lodo rico em fósforo. Ainda diminui o requisito de área para destinação de resíduos, o que possibilita maior concentração da produção e/ou expansão de unidades suinícolas já instaladas.

Referências

AMARAL, A. C. *et al.* Influence of solid-liquid separation strategy on biogas yield a stratified swine production system. **Journal of Environmental Management**, v. 168, p. 229-235, 2016.

ANTES, F. G. *et al.* Aclimação e enriquecimento de biomassa nitrificante usando águas residuárias da suinocultura para partida de reator em grande escala. **Comunicado Técnico**, Concórdia, v. 576, 2020.

BORTOLI, M. **Partida, operação e otimização de um sistema de nitrificação/desnitrificação visando a remoção de nitrogênio de efluente da suinocultura pelo processo de Ludzack-Ettinger modificado**. 2010. 155 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Centro Tecnológico Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis. 2010.

BORTOLI, M. *et al.* Simultaneous removal of nitrogen and organic carbon from swine wastewater using pre-denitrification/nitrification process. **Revista Ambiente & Água**, v. 14, n. 2, p. 1-10, 2019.

CÂNDIDO, D. *et al.* Integration of swine manure anaerobic digestion and digestate nutrients removal/recovery under a circular economy concept. **Journal of Environmental Management**, v. 301, 2022.

CÂNDIDO, D. **Partida e operação de um sistema de tratamento de efluentes da suinocultura em escala plena**. 2021. 156 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia Ambiental) - Universidade Federal da Fronteira Sul, Erechim, 2021.

KUNZ, A.; FONGARO, G. Tecnologias para tratamento de efluente da produção animal visando o reúso de água. *In*: PALHARES, J. **Produção animal e recursos hídricos**: tecnologias para manejo de resíduos e uso eficiente dos insumos. Brasília: Embrapa, 2019. p. 147-163.

KUNZ, A.; STEINMETZ, R. L. R.; AMARAL, A. C. (Org.) **Fundamentos da digestão anaeróbio, purificação do biogás, uso e tratamento do digestato**. Concórdia, Sbera: Embrapa Suínos e Aves, 2022. 209p.

KUNZ, A. *et al.* **Sistrates**: suinocultura com sustentabilidade ambiental e geração de renda. Concórdia: Embrapa Suínos e Aves, 2011.

MIELE, M. *et al.* Tratamento dos efluente de usinas de biogás. **Revista de Política Agrícola**, Brasília, ano 24, n. 1, p. 35-45, 2015.

TAVERNARI, F. C. *et al.* Fósforo disponível de fosfato extraído de efluentes da suinocultura. **Comunicado Técnico**, Concórdia, v. 535, out. 2016.

VIANCELLI, A. *et al.* Pathogen inactivation and the chemical removal of phosphorus from swine wastewater. **Water, Air & Soil Pollution**, v. 226, p. 263-271, 2015.