



ISSN = 1980-993X – doi:10.4136/1980-993X

www.ambi-agua.net

E-mail: ambi-agua@agro.unitau.br

Tel.: (12) 3625-4212



Aplicação do Método de Soluções de Problemas (PDCA) em um sistema de tratamento de efluentes de indústria frigorífica de aves

<http://dx.doi.org/10.4136/ambi-agua.743>

Andressa Della Justina de Castro¹; Adilson Pinheiro¹; Yovanka Pérez Ginoris²

¹Fundação Universidade Regional de Blumenau (FURB), Blumenau, SC
e-mail: andressadellaju@gmail.com; e-mail: pinheiro@furb.br;

²Universidade de Brasília (UnB), Departamento de Engenharia Civil e Ambiental
e-mail: yovanka.perez@gmail.com

RESUMO

Dentre as tecnologias que têm sido desenvolvidas para o tratamento de águas residuárias industriais, destacam-se os sistemas por lodos ativados. O presente trabalho teve como objetivo aplicar a metodologia de gestão PDCA na identificação de problemas de um sistema de tratamento biológico de efluente em uma indústria frigorífica de aves, assim como avaliar as soluções prioritárias adotadas ou propostas para a resolução desses problemas. Para alcançar esse objetivo, foram realizadas as seguintes etapas: análise dos inputs e outputs do processo de tratamento de efluente, identificação dos problemas operacionais do sistema mediante o uso de indicadores de desempenho e identificação das causas fundamentais para a geração dos problemas. Para atingir os objetivos, foram levadas a efeito as quatro etapas do ciclo PDCA – planejamento, execução, verificação e ação corretiva. Na etapa do planejamento a identificação do problema foi realizada com base na análise histórica do Índice Volumétrico de Lodos (IVL), cujos resultados apresentaram valores na ordem de 500 mL/g no primeiro semestre de 2010. A análise do fenômeno foi realizada pelo monitoramento de parâmetros físicos, químicos e microbiológicos, efetuado de forma a caracterizar o funcionamento do sistema de tratamento de águas residuárias. O levantamento das causas fundamentais foi realizado por meio das ferramentas de brainstorming, diagrama de Ishikawa e priorização. Os resultados sugerem que após implantação parcial do plano de ação proposto, o problema de sedimentabilidade de lodo, representado pelo IVL, foi minimizado, reduzindo os valores na ordem de 500 mL/g para valores na ordem de 250 mL/g no segundo semestre de 2010. Assim, constata-se que a metodologia PDCA é adequada para solucionar problemas em sistemas de tratamento de efluentes.

Palavras-chave: lodos ativados; metodologia PDCA; indústria frigorífica de aves.

Application of the PDCA Problem-Solving Method in treatment of wastewater from poultry processing

ABSTRACT

Amongst the technologies developed for the treatment of industrial waste-water, activated sludge systems deserve special mention. The aim of the present work was to explore the use of PDCA management methods for identifying problems in a system for the biological treatment of effluent from a poultry processing plant and to evaluate the priority solutions adopted or proposed for solving them. To accomplish this objective the following steps are

required: analysis of inputs and outputs of the effluent treatment process; identification of operational problems in the system based on the use of performance measures; and identification of fundamental causes leading to problems. Four steps in the PDCA cycle were followed: planning, execution, verification, and corrective action. At the planning stage, the problem was identified by analysis of the historic Sludge Volume Index (SVI) record, which gave values of about 500 mL/g in the first half of 2010. Analysis of the phenomenon was achieved by monitoring physical, chemical and biological parameters to give a picture of how the system for waste-water treatment actually worked. The survey of fundamental causes used procedures of brainstorming, Ishakawa diagrams, and prioritization. The results suggest that after partial implantation of the proposed action plan, the problem of sludge sedimentation shown by the SVI was much reduced, its value decreased from about 500 mL/g to about 250 mL/g in the second half of 2010. It is therefore concluded that the PDCA methodology is adequate for solving problems in effluent treatment plants.

Keywords: activated sludge; PDCA methodology; industrial poultry plant.

1. INTRODUÇÃO

Os processos biológicos, baseados no uso de micro-organismos, destacam-se dentre as tecnologias que têm sido desenvolvidas para o tratamento de águas residuárias industriais. Tais tecnologias vêm sendo utilizadas com sucesso na remoção de uma série de compostos químicos com elevado potencial poluidor. O sistema de lodo ativado é considerado atualmente a tecnologia de tratamento biológico mais utilizado em nível mundial para o tratamento de águas residuárias domésticas e industriais, uma vez que permitem remover, com elevada eficiência, uma ampla variedade de compostos orgânicos e inorgânicos (Ginoris, 2006).

Em geral, os sistemas de lodos ativados são compostos por duas etapas de processamento do efluente: a conversão das substâncias químicas em um reator biológico e a separação dos sólidos biológicos, formado pelos micro-organismos e material inerte presente na etapa anterior. A segunda etapa, usualmente, ocorre pela ação da gravidade em um decantador (Von Sperling, 2002).

O reator biológico, ou tanque de aeração, promove um ambiente ideal para a degradação de substâncias solúveis e particuladas, por meio de um conjunto variado de micro e macroorganismos (Jenkins et al., 2004). No reator, a biomassa utiliza o substrato do efluente para se desenvolver. No decantador, a biomassa floculada sedimenta. Isso permite a clarificação do efluente final. Parte dos sólidos sedimentados no fundo do decantador podem ser recirculados para o reator, aumentando a concentração de biomassa neste, ou descartados, caso a concentração já esteja elevada (Von Sperling, 2002).

Por se tratar de um processo biológico, a forma com que os sistemas de lodos ativados são operados influencia na qualidade do efluente. Variações no processo podem afetar o desempenho do sistema. A flutuação dos parâmetros operacionais como tempo de residência do lodo, taxa de fornecimento de nutrientes aos micro-organismos, concentração de oxigênio dissolvido no tanque de aeração, entre outros, podem desestabilizar o sistema (Martins et al., 2002). Gerardi (2002) aponta que a sedimentabilidade deficiente pode ser causada pelas condições operacionais do sistema de tratamento. A análise da estrutura da microfauna é um instrumento útil para diagnosticar o funcionamento dos sistemas de lodos ativados. De acordo com Madoni (1994), a presença ou a ausência de determinada espécie de micro-organismo e a composição da microfauna é um excelente indicador da eficiência biológica de depuração desses sistemas.

Outro fator essencial para o tratamento de águas residuárias por lodos ativados é a capacidade dos micro-organismos em formar floco. A formação do floco de lodo ativado é extremamente importante para a obtenção de um bom rendimento no tratamento secundário, isso porque a separação dos micro-organismos do efluente ocorre por decantação (Stypka, 1998).

Os flocos biológicos constituem um microsistema complexo formado por bactérias, fungos, protozoários e micrometazoários. Além dos micro-organismos, os flocos de lodo ativado contêm partículas orgânicas e inorgânicas, fibras do efluente de entrada e polímeros extracelulares que desempenham importante papel na biofloculação. Arregui et al. (2007) afirmam que os polímeros extracelulares produzidos por micro-organismos de lodo ativado, são os principais responsáveis pela formação dos flocos. Esses polímeros são compostos principalmente por proteínas e carboidratos. A base para a formação dos flocos é a capacidade que os micro-organismos têm de ficar agregados uns aos outros e as demais partículas (Jenkins et al., 2004).

Além disso, os organismos filamentosos são componentes importantes dos flocos de lodos ativados, eles funcionam como redes ou “esqueletos” dos flocos. São os organismos filamentosos os responsáveis pela morfologia irregular dos flocos (Jenkins et al., 2004).

Nesse sentido, Amaral e Ferreira (2005) afirmam que, um bom equilíbrio entre as bactérias e protozoários e entre as diferentes espécies de cada grupo é fundamental para garantir a depuração eficaz do efluente, boas propriedades de sedimentabilidade e baixos níveis de sólidos suspensos no efluente tratado. A formação de um floco ideal somente é possível por meio do equilíbrio entre as bactérias floculantes, que promovem a aglomeração do floco a partir dos polímeros extracelulares, e as bactérias filamentosas, que exercem a função de esqueleto no floco.

Von Sperling (2002) aponta que as características de sedimentabilidade do lodo estão intimamente associadas à estrutura do floco. Nesse sentido, o controle operacional dos decantadores secundários deve ser analisado conjuntamente com o reator, pois as duas unidades são partes integrantes e indissociáveis da etapa biológica do tratamento.

Gerardi (2002) aponta que a sedimentabilidade deficiente pode ser causada pelas condições operacionais do sistema de tratamento como, por exemplo, o crescimento indesejado de organismos filamentosos. O balanço entre os organismos filamentosos e floculantes é muito sensível e as condições operacionais da planta são fatores que influenciam consideravelmente nesse balanço (Ginoris, 2006).

O intumescimento filamentoso ocorre como consequência da predominância dos organismos filamentosos nos flocos, afetando a estrutura deste. Nessas condições, os filamentos se projetam para fora do floco, impedindo a aderência de outros flocos e interferindo na compactação e na velocidade de sedimentação do lodo ativado. Jenkins et al. (2004) apontam que este tipo de problema é característico de condições de carência de nutrientes no efluente como nitrogênio e fósforo, presença de substâncias tóxicas e/ou limitação de oxigênio.

Segundo Jenkins et al. (2004), as condições de concentração de oxigênio dissolvido e nutrientes, bem como a relação alimento/micro-organismo (A/M) dentro do tanque de aeração, são os parâmetros de maior importância no controle do intumescimento filamentoso, sendo a relação A/M apontada como a principal causa desse tipo de problema de sedimentação nas plantas de tratamento de esgotos.

Em indústrias, os sistemas de tratamento de águas residuárias são implantados com a finalidade de garantir a qualidade do efluente lançado e, por conseguinte, atender a legislação. Nesse sentido, a aplicação de ferramentas de gestão da qualidade pode ser útil para identificar e resolver problemas relacionados a estações de tratamento de efluentes.

O ciclo PDCA de melhoria, que também é denominado Método de Soluções de Problemas, auxilia de forma sistemática na identificação e resolução de problemas. Conforme Werkema (1995), “o ciclo PDCA de melhoria consiste em uma sequência de procedimentos lógicos, baseada em fatos e dados, que objetiva localizar a causa fundamental de um problema para posteriormente eliminá-la”. A sigla PDCA vem dos termos em inglês *Plan* (Planejar), *Do* (Executar), *Check* (Verificar) e *Action* (Agir corretivamente). Cada um dos termos representa uma etapa a ser cumprida para a identificação e resolução do problema (Campos, 2004).

As causas de problemas em sistemas de lodos ativados podem não ser facilmente identificáveis. Tendo em vista os aspectos apresentados, a aplicação de uma ferramenta de gestão visando identificar as lacunas do sistema, pode ser útil para a busca da melhoria operacional do tratamento de águas residuárias industriais por sistemas de lodos ativados.

A metodologia PDCA vem sendo utilizada para a resolução de problemas em diferentes processos, inclusive processos relacionados ao meio ambiente, como para a reutilização de resíduos (Fornari Jr., 2010), para a redução do consumo de água (Piechnicki et al., 2011) e para tratamento de esgoto sanitário (Sartorato et al., 2001). Nesse sentido, o presente trabalho teve como objetivo aplicar a metodologia de gestão PDCA na identificação de problemas em sistema de tratamento biológico de efluente de uma indústria frigorífica de aves, assim como avaliar as soluções prioritárias adotadas ou propostas para a resolução desses problemas.

2. MATERIAIS E MÉTODO

O trabalho experimental foi desenvolvido na estação de tratamento de águas residuárias de uma indústria frigorífica de aves. A vazão média de efluente tratado na Estação de Tratamento de Efluentes (ETE) é de 250 m³/h. Na Figura 1, é apresentado o esquema da ETE.

A rede de efluente da indústria frigorífica de aves é dividida em três linhas: linha da víscera, linha da pena e linha sanitária. Na linha das vísceras, o efluente é transportado junto com as vísceras das aves. A separação do líquido das partículas sólidas é realizada por duas peneiras do tipo rotativa. Na linha da pena, a separação da fração líquida e das penas é realizada através uma peneira estática. Os efluentes das duas linhas são conduzidos para um tanque de equalização. O efluente sanitário entra no sistema de tratamento somente após a operação da flotação, no tanque de neutralização.

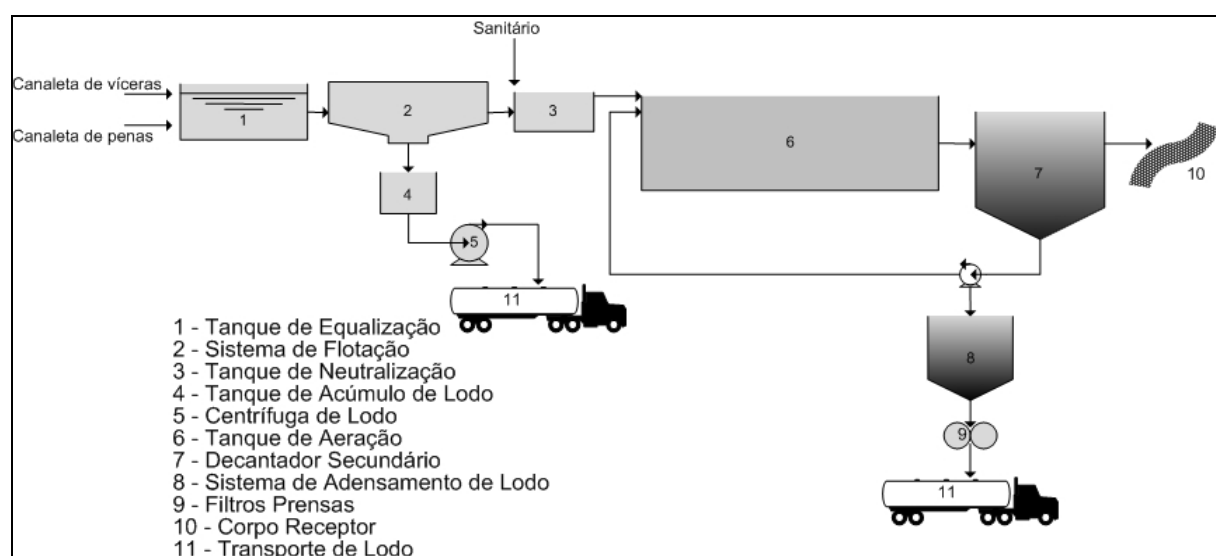


Figura 1. Esquema do sistema de tratamento de efluentes da indústria frigorífica de aves.

O tanque de equalização é construído em concreto, com capacidade útil de 148 m³ e tempo de detenção hidráulica de, aproximadamente, 36 minutos. Nele, o efluente é homogeneizado através de um misturador submersível e transportado por três bombas de recalque para o sistema de flotação.

O sistema de flotação por ar dissolvido remove as partículas em suspensão. O sistema conta com dois flotadores de ar dissolvidos, tipo cilíndrico vertical aberto, com diâmetro de 10,6 m e altura de 3 m, com capacidade de 300 m³/h cada. Para promover a coagulação e a floculação são utilizados os produtos químicos cloreto férrico e polímero aniônico. Ambos os compostos são dosados em um misturador hidráulico com 12 m de comprimento e 250 mm de diâmetro. As microbolhas formadas no tanque de pressão carregam as partículas floculadas para a superfície, onde são removidos por um raspador de material flotado.

Após a flotação, o efluente é direcionado para o tanque de neutralização, onde é misturado ao efluente sanitário, oriundo dos serviços sanitários, lavanderia e refeitório. No tanque de neutralização, adiciona-se soda cáustica, para neutralizar o pH do efluente. A seguir, o efluente é recalado ao tratamento biológico.

O lodo flotado é armazenado temporariamente em um tanque cilíndrico de acúmulo de lodo, com capacidade de 12 m³ e, posteriormente, é bombeado para duas centrífugas do tipo tridecanter, modelo 7000N, da marca FAST. As centrífugas separam o lodo flotado em três fases: sólido (lodo desidratado), água e óleo. A água retorna para o sistema de tratamento, o lodo desidratado é destinado para o processo de compostagem e o óleo utilizado como combustível em caldeira.

Após o processo de tratamento físico-químico, o efluente é submetido a tratamento biológico por lodos ativados. O tanque de aeração apresenta um volume de 16.500 m³, dimensionamento suficiente para garantir a nitrificação e desnitrificação do efluente, com tempo de detenção hidráulica da ordem de 66 horas. O oxigênio é fornecido por sopradores de ar do tipo *roots*, sendo distribuído no tanque por meio de 1000 difusores de membrana tipo *Air Flex Tube*.

O efluente tratado é conduzido para o decantador secundário, construído em concreto estrutural impermeabilizado, com 31 m de diâmetro e 3,5 m de altura, que proporciona a sedimentação dos flocos biológicos, os quais são, posteriormente, recirculados ao tanque de aeração para ativação do processo. O efluente sobrenadante do decantador secundário segue para um tanque de acúmulo, com capacidade de 12 m³ onde é bombeado para o corpo receptor.

O excesso de lodo biológico gerado no sistema é conduzido para o adensador, construído em concreto estrutural impermeabilizado, com 11 m de diâmetro e 3,5 m de altura. A desidratação do lodo é realizada em dois filtros prensas da marca Environquip, modelo ENVI-PRESS-1500. Após desidratação, o lodo é destinado para processo de compostagem.

O desenvolvimento deste trabalho baseou-se na metodologia PDCA para resolução de problemas. Para tanto, foram levadas a efeito as quatro etapas do ciclo PDCA. Na etapa de planejamento (P) a identificação do problema foi realizada por meio da observação e análise de gráficos e fotografias. A estratificação do problema foi realizada por meio de análise de fatos e dados. O levantamento das principais causas foi realizado com o auxílio dos operadores da ETE da indústria frigorífica de aves em questão e a ferramenta utilizada para o levantamento de causas foi o Diagrama de Ishikawa. Após priorização das principais causas, foi elaborado um plano de ação no modelo 5W1H. Na etapa “fazer” (D) do ciclo PDCA foi executado o plano de ação elaborado na etapa anterior. A etapa de verificação (C) do ciclo PDCA foi realizada por meio do monitoramento físico-químico e microbiológico do sistema de tratamento de efluente por lodos ativados.

O monitoramento dos parâmetros físico-químicos foi realizado semanalmente, entre janeiro e julho de 2010, para a execução do diagnóstico e, entre os meses de agosto de 2010 e janeiro de 2011, para a avaliação da execução. Todas as análises foram realizadas conforme metodologias descritas no *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. Os valores de oxigênio dissolvido foram obtidos por meio de medidor de OD modelo 550A da marca ISY. Para medição dos sólidos sedimentáveis após 30 minutos foram coletadas amostras do licor misto, em um cone de Imhoff, deixando-as em repouso por 30 minutos. Após esse tempo, verificava-se o volume da interface líquido/lodo.

O monitoramento microbiológico, realizado pontualmente para avaliar os impactos das interrupções de alimentação no sistema, foi realizado entre os meses de agosto e dezembro de 2010. A realização das análises foi limitada ao calendário de finais de semana e feriados prolongados. Para tais análises foi utilizado um microscópio modelo E 200 da marca Nikon. A metodologia de análise adotada foi a proposta por Madoni (1994) para cálculo do Índice Biótico dos Lodos (IBL). O IBL baseia-se na abundância e na diversidade específica da comunidade e nas diferentes sensibilidades que alguns grupos da microfauna típica dos lodos ativados apresentam nas condições operacionais prevalentes no tanque de aeração.

Na Tabela 1, é mostrado o funcionamento do índice, com duas entradas de informações. A entrada vertical é feita considerando a riqueza específica da amostra e o número de pequenos flagelados. Na coluna da direita estão distribuídos os diversos grupos da microfauna associados a uma decrescente qualidade biológica dos lodos. Na entrada horizontal é levado em consideração o grupo dominante no tanque de aeração e depois a densidade total da microfauna (maior ou menor do que 10^9 indivíduos/m³). No caso em que dois ou mais grupos compartilharam a dominância da amostra, escolhe-se o grupo que ocupa a posição mais baixa na Tabela 1.

Tabela 1. Entradas para cálculo do IBL (S - nº de espécies da microfauna, excluindo pequenos flagelados e F - nº de pequenos flagelados).

Grupo Dominante	Densidade (ind/L)	F = Número total de pequenos flagelados na diagonal da câmara de Fuchs-Rosethal							
		S > 10		8 ≤ S ≤ 10		5 ≤ S ≤ 10		S < 5	
		A	B	A	B	A	B	A	B
Ciliados Móveis de Fundo + Sésseis* e/ou Amibas com	≥ 10 ⁶	10	8	9	7	8	6	7	5
	< 10 ⁶	9	7	8	6	7	5	6	4
Ciliados Sésseis* > 80%	≥ 10 ⁶	9	7	8	6	7	5	6	4
	< 10 ⁶	8	6	7	5	6	4	5	3
Opercularia spp.	≥ 10 ⁶	7	5	6	4	5	3	4	2
	< 10 ⁶	6	4	5	3	4	2	3	1
Vorticella micróstoma	≥ 10 ⁶	6	4	5	3	4	2	3	1
	< 10 ⁶	5	3	4	2	3	1	2	0
Ciliados Nadadores	≥ 10 ⁶	5	3	4	2	3	1	2	0
	< 10 ⁶	4	2	3	1	2	0	1	0
Peq. Flagelados (>100%)	≥ 10 ⁶	4		3		2		1	
	< 10 ⁶	3		2		1		0	

*Opercularia spp. e Vorticella microstoma não dominantes.

Fonte: Madoni (1994).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Identificação do problema

A Indústria Frigorífica de Aves abate aproximadamente 220 mil aves por dia, o equivalente a uma produção diária aproximada de 450 toneladas de carne de frango. Tal produção resulta na geração de, em média, 6.000 m³ de efluente por dia, oriundos de diferentes etapas do processo produtivo.

Todo o efluente gerado na indústria é tratado na ETE. Apesar do sistema de tratamento apresentar bom desempenho aparente na maior parte do ano, percebeu-se que a sedimentabilidade do lodo no decantador secundário apresentava-se bastante deficiente, com frequente flotação de lodo e perda de sólidos junto com o efluente final.

Nos sistemas de tratamento por lodos ativados, os problemas de sedimentabilidade do lodo são usualmente identificados mediante a determinação do Índice Volumétrico de Lodo (IVL) (Von Sperling, 2002). Na Figura 2, é apresentada a evolução semanal do IVL. A avaliação da ocorrência do problema foi realizada durante o período compreendido entre janeiro e julho de 2010.

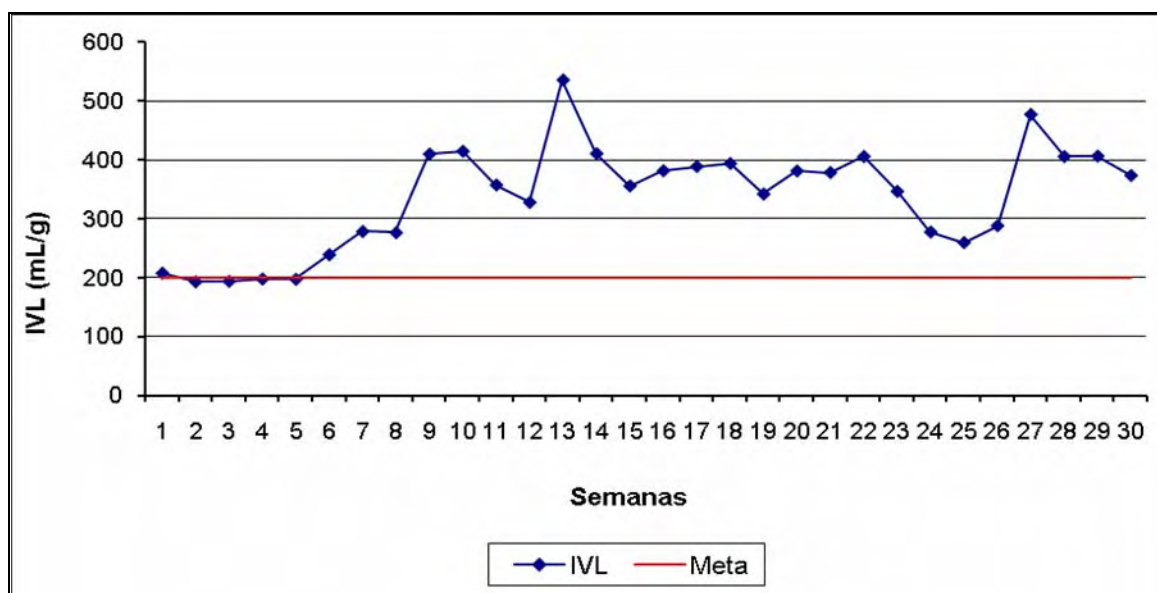


Figura 2. Evolução semanal do IVL no período de janeiro a julho de 2010.

Nesse período, o IVL variou entre 193 mL/g e 536 mL/g, com valor médio de 337 mL/g. De acordo com Von Sperling (2002), em processo de lodo ativado é desejável que o valor do IVL seja inferior 200 mL/g. Nestas condições a sedimentabilidade do lodo pode ser considerada média. Por isso, esse valor do IVL foi considerado como a meta a ser alcançada no processo operacional. Assim, constata-se que no período analisado esse valor de IVL foi obtido apenas até a semana 5 configurando-se o problema de sedimentabilidade do lodo no decantador secundário do sistema de tratamento de efluentes da Indústria Frigorífica de Aves.

A baixa sedimentabilidade de lodo no decantador secundário pode ser resultado de diferentes fatores atuantes nas etapas anteriores do tratamento de efluente, tanto no processo físico-químico, quando no processo biológico. A identificação desses fatores foi realizada pela análise do fenômeno, que compreende uma visão detalhada do problema, com estratificação dos seus elementos.

3.2. Análise do fenômeno

A deficiência na sedimentação está associada às condições operacionais do sistema de tratamentos por lodos ativados (Gerardi, 2002; Jenkins et al., 2004; Ginoris, 2006). Neste sentido, com o objetivo de estratificar o problema identificado, os itens que seguem descrevem as condições operacionais do sistema.

3.2.1. Caracterização do Efluente da Indústria Frigorífica de Aves

A Tabela 2 apresenta as características qualitativas do efluente gerado na indústria frigorífica de aves, determinadas para o período de janeiro a julho de 2010, da composição da parte líquida do resíduo de incubação e do sangue de aves.

A indústria realiza o processamento de aves de segunda a sexta-feira. Os sábados e os domingos, dependendo da necessidade, são reservados para manutenção de equipamentos. A indústria também não tem produção durante os feriados. Assim, nesses dias, praticamente não há alimentação de efluente ao sistema de tratamento. Durante as atividades de manutenção são gerados esgotos sanitários que são encaminhados ao sistema de tratamento. Nos domingos a noite é realizada a higienização pré-operacional, onde são gerados efluentes similares àqueles do terceiro turno.

Tabela 2. Concentrações do efluente gerado na indústria frigorífica, do incubatório e do sangue de aves.

Parâmetro	Efluente*	Incubatório	Sangue
pH	6,1 ± 0,3	6,2	6,4
DBO _{5,20°C} (mg/L)	974 ± 394	65.000	25.000
DQO (mg/L)	1830 ± 686	147.875	45.045
Óleos e graxas (mg/L)	471 ± 250	408	267
Sólidos Suspensos Totais (SST) (mg/L)	1091 ± 535	8.278	5.980
Fósforo Total (mg/L)	15,9 ± 10,7	109,6	53,5
Nitrogênio Total (mg/L)	63,6 ± 35,6	173,2	115,4
Amônia (mg/L)	36 ± 34	130	90,2

* Total de 30 amostras.

Além do efluente gerado pelo processo produtivo, higienização da fábrica e áreas de apoio, a ETE recebe cerca de 10 m³ por dia da porção líquida do resíduo oriundo do incubatório de aves. Trata-se de um resíduo gerado no processo de incubação de ovos e nascimento de pintinhos, composto basicamente por ovos descartados e pintinhos triturados. Nota-se que a concentração de matéria orgânica desse efluente, representada pelo parâmetro DBO_{5,20°C}, é cerca de 65 vezes superior àquele gerado pelo processamento das aves.

Apesar do resíduo líquido de incubação apresentar baixo volume quando comparado ao total gerado pela indústria, sua carga orgânica representa cerca de 11% da carga orgânica total do efluente tratado na estação.

A instabilidade da carga orgânica do efluente é resultado ainda da entrada de outras substâncias no sistema de tratamento, como o sangue das aves abatidas. No fluxo padrão, o sangue é bombeado para centrifugação e, posteriormente, inserido junto com a pena, ambos são insumos para a fabricação de farinha de pena. Contudo, quando há falhas mecânicas ou operacionais no processo, o sangue segue para a ETE.

3.2.2. Caracterização do Efluente após tratamento físico-químico

Após passar pelo processo de tratamento físico-químico, há uma redução considerável da concentração de matéria orgânica. Conforme Tabela 3, após a flotação a DBO média é

reduzida de 974 mg/L para 232,6 mg/L. Da mesma forma, há redução na concentração dos demais parâmetros de interesse, como óleos e graxas bem como sólidos suspensos totais.

3.2.3. Caracterização do Efluente Tratado

O sistema de tratamento de efluentes da indústria frigorífica de aves, em condições normais de operação, apresenta eficiência aproximada de 97% para remoção de matéria orgânica. De forma geral, o efluente lançado no corpo receptor apresenta boa qualidade, a Tabela 4 mostra a composição do efluente tratado. Os valores apresentados compreendem as médias obtidas de janeiro a julho de 2010.

Tabela 3. Composição típica do efluente após passar pelo processo de flotação.

Parâmetro	Concentração*
pH	6,6 ± 0,8
DBO _{5,20°C} (mg/L)	232,6 ± 121,8
DQO (mg/L)	414,1 ± 178,8
Óleos e graxas (mg/L)	117,7 ± 109,7
Sólidos Suspensos Totais (SST) (mg/L)	240,7 ± 125,9
Fósforo Total (mg/L)	6,6 ± 1,8
Nitrogênio Total (mg/L)	58,9 ± 20,3

* Total de 30 amostras.

Tabela 4. Composição média do efluente tratado entre janeiro a julho de 2010.

Parâmetro	Concentração*
pH	6,8 ± 0,4
DBO _{5,20°C} (mg/L)	19,8 ± 9,8
DQO (mg/L)	40,0 ± 18,5
Óleos e graxas (mg/L)	12,6 ± 3,1
Sólidos Suspensos Totais (SST) (mg/L)	14,7 ± 5,1
Fósforo Total (mg/L)	3,9 ± 1,6
Nitrogênio Total (mg/L)	15,3 ± 3,9

* Total de 30 amostras.

3.2.4. Característica Biológica do Sistema de Lodos Ativados

A microbiota do sistema de lodos ativados da indústria frigorífica se apresentou bastante deficiente. A Figura 3 representa a situação do licor misto do tanque de aeração no início do trabalho. Nesse período, os flocos de lodo ativado apresentavam uma estrutura bastante porosa e morfologia irregular. Além disso, é possível observar grande quantidade de bactérias filamentosas, indicando a existência de desbalanço entre organismos floculantes e filamentosos. Os flocos de lodo ativado com essas características estão relacionados à capacidade de depuração reduzida, baixa sedimentabilidade de lodo e elevados níveis de sólidos suspensos no efluente final devido ao arraste de lodo no decantador (Jenkins et al., 2004; Gerardi, 2002; Mesquita et al., 2009).

As análises posteriores tiveram como objetivo investigar o impacto das interrupções de alimentação do sistema sobre a microfauna, como uma das possíveis causas do problema de sedimentabilidade de lodo.

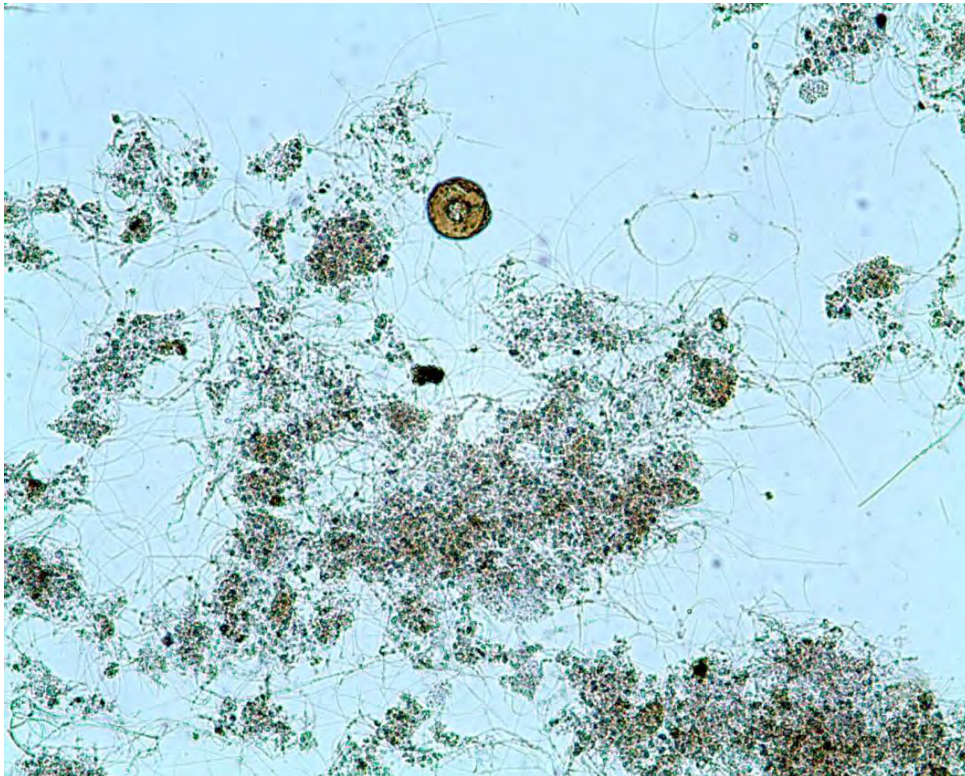


Figura 3. Análise microscópica do sistema de lodos ativados em 2 julho de 2010 (100X).

Durante todo o período referente a este estudo, a concentração de sólidos suspensos voláteis no tanque de aeração foi mantida na ordem de 3.000 mg/L, conforme determinações de projeto.

Para analisar o impacto causado na microfauna do lodo ativado durante os feriados e finais de semana, nos quais a indústria não processa aves, foram realizadas análises pontuais antes e após os eventos de feriados prolongados e eventos de finais de semana. O objetivo foi obter resultados que permitissem avaliar o impacto da interrupção de alimentação do sistema.

Após os eventos analisados, foi possível observar redução do número de espécies encontradas no sistema anteriormente à interrupção. Em interrupções causadas em decorrência de feriado prolongado (mais de três dias de interrupção) houve redução significativa de ciliados móveis de fundo, como *Aspidisca* sp. Em finais de semana, interrupções de dois dias, foi possível observar o aumento de ciliados sésseis como a *Vorticella convallaria* após a retomada da alimentação. A presença de ciliados sésseis (*Vorticella convallaria*) indica baixa eficiência no tratamento e período transitório do sistema (Martins et al., 2002), além de serem organismos indicadores de carga orgânica elevada (Canler et al., 1999; Ginoris, 2006).

Nas análises foi possível observar redução das espécies de protozoários mais sensíveis encontrados no sistema, assim como a redução da concentração total de indivíduos na microbiota, após dois dias de alimentação interrompida. A concentração de micro-organismos apresentou indícios de recuperação da concentração de micro-organismos somente no segundo dia de retoma da alimentação do sistema.

Em todas as análises realizadas houve a predominância das amebas com teca, principalmente *Arcella* sp. e *Euglypha* sp. Conforme Madoni (1994), as amebas com teca são indicadoras de boas condições de nitrificação e estão presentes em lodos ativados com pouca matéria orgânica, com elevada concentração de oxigênio no tanque de aeração e em sistemas

com grande tempo de retenção. Entretanto, segundo Canler et al. (1999), a presença de *Arcellas* sp. é comum em sistema de efluente de indústrias agro-alimentares.

As amebas com teca como *Arcella* sp. e *Euglypha* sp. são indicadores de sistemas com baixa carga orgânica, boas condições de nitrificação e boa oxigenação (Madoni, 1994, Nicolau et al., 1996; Martins et al., 2002; Canler et al., 1999). A DBO_{5,20} média de alimentação no tanque de aeração foi de 232,6 mg/L, bastante baixa, considerando que a relação entre alimento e micro-organismos (A/M) fica na ordem de 0,03 kgDBO₅/kgSSV.d. Segundo Von Sperling (2002), uma relação A/M ideal para um sistema de aeração prolongada varia entre 0,08 a 0,15 kgDBO₅/kgSSV.d.

Após as interrupções de alimentação foi possível observar grande quantidade de rotíferos mortos. De acordo com Canler et al. (1999) e Ginoris (2006), os rotíferos (Figura 4) são indicadores de sistemas com baixas cargas orgânicas, idade do lodo alta, boas condições de nitrificação, boa qualidade do efluente e estabilidade no sistema. A redução destes organismos indica que o sistema foi submetido a um forte stress.

Outra característica importante observada durante as análises foi a alteração na morfologia dos flocos de lodo durante os eventos de interrupção de alimentação. Segundo estudo desenvolvido por Sezgin apud Mesquita et al. (2009), o índice de volume de lodo (IVL) é fortemente influenciado pelo tamanho dos flocos e conteúdo bactérias filamentosas.

Na Figura 5 é apresentada a morfologia dos flocos biológicos antes (a) e após (b) uma interrupção de quatro dias de alimentação. Antes da interrupção da alimentação, o sistema apresentou flocos grandes, com estrutura irregular e porosa. Flocos de maior tamanho tendem a ser mais irregulares e porosos (Ginoris, 2006).

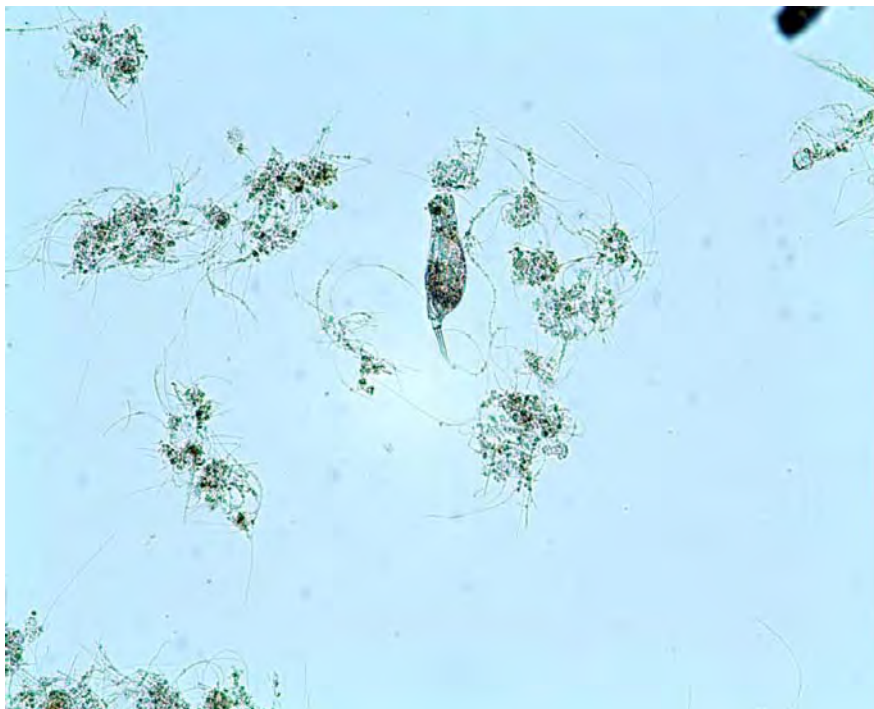


Figura 4. Presença de Rotíferos (100x).

Igualmente, após a retomada da alimentação, as amostras de lodo apresentam flocos biológicos irregulares, porém em tamanhos menores, fato que indica a ocorrência de desfloculação ocasionada pela interrupção da alimentação. Pipes e Wilén, apud Ginoris (2006) afirmam que a desfloculação pode ocorrer em consequência de mudanças bruscas no sistema como, por exemplo, redução da temperatura, alteração do pH, condições anaeróbias, choque de carga, entre outros.

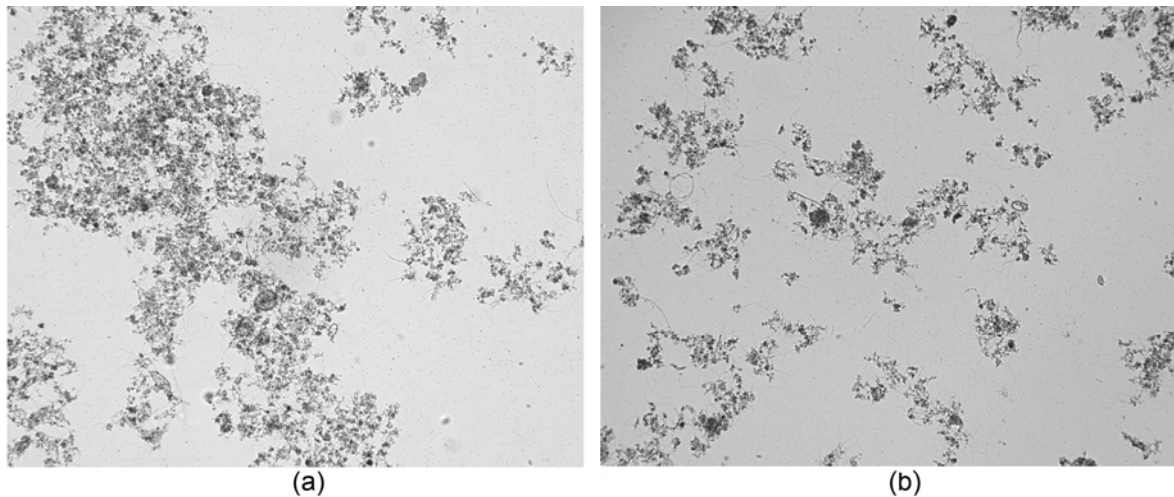


Figura 5. Imagens dos flocos de lodo ativado antes (a) e após (b) o evento de interrupção da alimentação ao sistema.

3.3. Análise do processo

Essa etapa do planejamento visou viabilizar a identificação das principais causas do problema caracterizado nas etapas anterior. Nesse sentido, para auxiliar na identificação das principais causas, foram usadas três ferramentas de gestão: Brainstorming (chuva de ideias), Diagrama de Ishikawa (espinha de peixe) e Priorização.

As ferramentas brainstorming e Diagrama de Ishikawa foram utilizados conjuntamente. O brainstorming foi realizado com a participação da equipe de operação da ETE, com o objetivo de levantar o conjunto de causas possíveis relacionadas à baixa sedimentabilidade do lodo no decantador secundário. As possíveis causas levantadas no brainstorming foram representadas no Diagrama de Ishikawa para possibilitar a análise do processo e identificar as causas vinculadas ao efeito. Nesse sentido, o Diagrama de Ishikawa (Figura 6) apresenta a relação existente entre o resultado de um processo (efeito) e os fatores (causas) do processo, que podem alterar a sedimentabilidade do lodo no decantador secundário.

Conforme Diagrama de Ishikawa, após analisar o processo em diferentes pontos de vista, a equipe de operação da ETE levantou as seguintes possíveis causas para o problema de sedimentabilidade no decantador secundário:

- I - Insumo: choque de carga no tanque de aeração; ausência de carga no sistema de tratamento; variação de carga no sistema; efeito tóxico de desinfetantes; efeito secundário de produtos químicos.
- II – Método: falta de padrão operacional; falha de gestão no descarte de lodo; falta de monitoramento; falha na determinação da vazão de recirculação.
- III – Equipamento: indisponibilidade da bomba de sangue; falha de manutenção dos sopradores; falha em equipamento de remoção de lodo; indisponibilidade da centrífuga de sangue.
- IV - Mão de Obra: ausência de treinamento; falha no cumprimento de padrões; falta de entendimento entre a equipe.
- V - Meio Ambiente: pH do tanque de aeração; alteração da temperatura; baixa concentração de Oxigênio Dissolvido.
- VI – Medida: erro de medição de equipamentos.



Figura 6. Diagrama de Ishikawa elaborado com a participação da equipe operacional da ETE da indústria frigorífica de aves e engenheiro responsável pela operação.

Na sequência, foi realizada a priorização para identificar as causas mais relevantes e prováveis (Tabela 5). Esta priorização foi efetuada com a participação de 4 avaliadores (P1, P2, P3 e P4), que atribuíram notas 1, 3 e 5, considerando o nível de influência fraco, moderado e forte, respectivamente.

Conforme resultado da priorização, as causas mais prováveis que contribuem para a baixa sedimentabilidade do lodo no decantador secundário foram: choques de carga, resultantes principalmente da entrada de sangue e de resíduo líquido de incubação na ETE; indisponibilidade da bomba de sangue e indisponibilidade da centrífuga de sangue, que ocasiona a entrada de sangue na ETE; ausência de carga, resultantes das interrupções de finais de semana e feriados; falta de monitoramento microbiológico; ausência de treinamento operacional e; baixas concentrações de OD.

3.4. Plano de ação

O plano de ação para eliminar as causas fundamentais da baixa sedimentabilidade de lodo no decantador secundário foi elaborado com base no modelo 5W1H (What, When, Who, Where, Why, How). A Tabela 6 apresenta as atividades executadas, com definição de fatores vinculados a cada uma delas.

3.5. Execução

Esta é a etapa do PDCA onde as ações planejadas para bloquear as causas fundamentais do problema são executadas (Campos, 2004; Quinquiol, 2002; Werkema, 1995). As ações previstas no plano de ação proposto no item anterior podem ser divididas em dois tipos: as executáveis em curto prazo e as executáveis em longo prazo. A execução das ações de longo prazo está limitada principalmente a aspectos financeiros, como solicitação de investimento para construção de um tanque de equalização com maior capacidade e aquisição de equipamentos para laboratório. Dessa forma, até a conclusão deste trabalho experimental foi possível executar somente as ações previstas em curto prazo.

3.6. Verificação Parcial

Dando continuidade ao ciclo PDCA, a etapa da verificação deve ser realizada após execução de todas as ações levantadas no planejamento. Contudo, as informações apresentadas nesta seção correspondem à verificação parcial, após implantação de parte das ações propostas.

A evolução do problema de baixa sedimentabilidade do lodo é representada mediante a determinação do Índice Volumétrico de Lodo (IVL). A Figura 7 apresenta a evolução semanal do IVL. A verificação foi realizada entre agosto de 2010 a janeiro de 2011.

Nesse período o IVL variou entre 182 mL/g e 508 mL/g, com valor médio de 317 mL/g. Entretanto, a execução das ações planejadas teve início em setembro de 2010, dessa forma, para a avaliação da efetividade ou não das ações propostas, o ideal é analisar os dados de IVL a partir da semana 10, outubro de 2011.

Tabela 5. Análise das causas mais prováveis.

	Causas Influentes	P1	P2	P3	P4	Total
1	Choque de Carga	5	5	5	5	20
2	Indisponibilidade da bomba de sangue	5	5	5	5	20
3	Ausência de carga	5	3	5	3	16
4	Falha na gestão de descarte de lodo	1	5	3	5	14
5	Indisponibilidade da centrífuga de sangue	3	5	3	3	14
6	Baixa concentração de OD	3	3	3	5	14
7	Variação na carga de entrada	3	1	5	3	12
8	Falta de monitoramento	5	1	3	3	12
9	Ausência de treinamento operacional	3	3	1	3	10
10	Efeito tóxico de desinfetantes	1	3	3	1	8
11	Falta de Padrões Operacionais	3	1	1	3	8
12	Erro de medição de equipamentos	3	1	1	1	6
13	Falhas no cumprimento dos padrões	1	3	1	1	6
14	Falha na determinação da vazão de recirculação	1	3	1	1	6
15	Falha em equipamentos de remoção de lodo	1	1	3	1	6
16	Falha de manutenção de sopradores	1	1	1	1	4
17	Alteração no pH do tanque de aeração	1	1	1	1	4
18	Efeito secundário de produtos químicos	1	1	1	1	4
19	Falta de entendimento entre a equipe	1	1	1	1	4
20	Alteração da temperature	1	1	1	1	4
TOTAL		48	48	48	48	192

Tabela 6. Plano de Ação para eliminar causas fundamentais do problema.

PROBLEMA		O QUE	POR QUE	COMO	ONDE	QUEM	QUANDO
Choque de carga no tanque de aeração devido a entrada de sangue na ETE	1. Indisponibilidade da bomba de sangue.	Adquirir bomba de sangue reserva.	A indisponibilidade da bomba de sangue causa transbordamento no tanque de sangue e conseqüente entrada de sangue na rede de efluente.	Solicitar compra com urgência.	Sangria	Supervisor de manutenção	06/09/10
	2. Indisponibilidade da centrífuga de sangue.	Adquirir kit reserva para manutenção da centrífuga de sangue.	A indisponibilidade da centrífuga de sangue exige excelência no cozimento do sangue, isto nem sempre funciona, causando entrada de sangue no tanque de neutralização.	Solicitar compra planejada.	Subproduto	Supervisor de utilidades	30/01/11
Choque de carga no tanque de aeração devido a entrada de resíduo líquido de incubação na ETE		Construir tanque pulmão com capacidade de 10 m ³ para armazenar o resíduo de incubação e dosar resíduo ao longo do dia na ETE.	Adicionar o resíduo de incubação de uma única vez no sistema de tratamento reduz a eficiência do sistema de flotação.	Contratar empresa de construção civil para executar a obra.	ETE	Supervisor de utilidades	01/09/10
Falha na gestão de descarte de lodo		Definir vazão excedente de lodo através do controle de Sólidos Suspensos Voláteis (SSV) no tanque de aeração (Von Sperling, 2002).	Para garantir que não seja descartado lodo com vazão inferior ou superior da necessária	Elaborar padrão e treinar operadores.	ETE	Coordenador de Meio Ambiente	01/09/10
Baixas concentrações de OD		Criar padrão para controle de OD com medições por turno. Operar com concentração de OD entre 1.5 e 2.0 mg/L.	Porque baixas concentrações de OD podem gerar impactos indesejados na microfauna do lodo.	Por meio do cumprimento do padrão	ETE	Coordenador de Meio Ambiente	01/09/10
Variação na carga de entrada do sistema		Construir tanque de equalização com capacidade maior.	Para aumentar o tempo de detenção hidráulica do tanque de equalização e melhorar eficiência da equalização do efluente.	Solicitar investimento para projeto de adequação	ETE	Supervisor de utilidades	31/12/11
Falta de monitoramento	1. Ausência de monitoramento microbiológico.	Solicitar compra de microscópio óptico; Adotar metodologia de IBL para monitoramento contínuo.	Análises microbiológicas do lodo proporcionam uma resposta rápida do estado do sistema e possibilitam agilidade e confiabilidade para as tomadas de decisões	Solicitar orçamento e realizar compra via suprimentos local.	ETE	Coordenador de Meio Ambiente	30/12/10
	2. Frequência de análises físico-químicas insuficiente para tomada de decisões operacionais.	Adquirir equipamentos para realizar análises de SST, SSV e DQO em laboratório próprio.	A impossibilidade de realizar essas análises com maior frequência pode resultar em tomadas de decisões equivocadas.	Solicitar investimento para projeto de adequação do laboratório	ETE	Coordenador de Meio Ambiente	30/06/11
Ausência de treinamento operacional		Treinar 100% dos operadores nos Padrões Operacionais	A falta de treinamento pode resultar em inúmeros erros operacionais.	Convidar instrutor para realizar treinamento com operadores	Auditório	Coordenador de Meio Ambiente	01/09/10

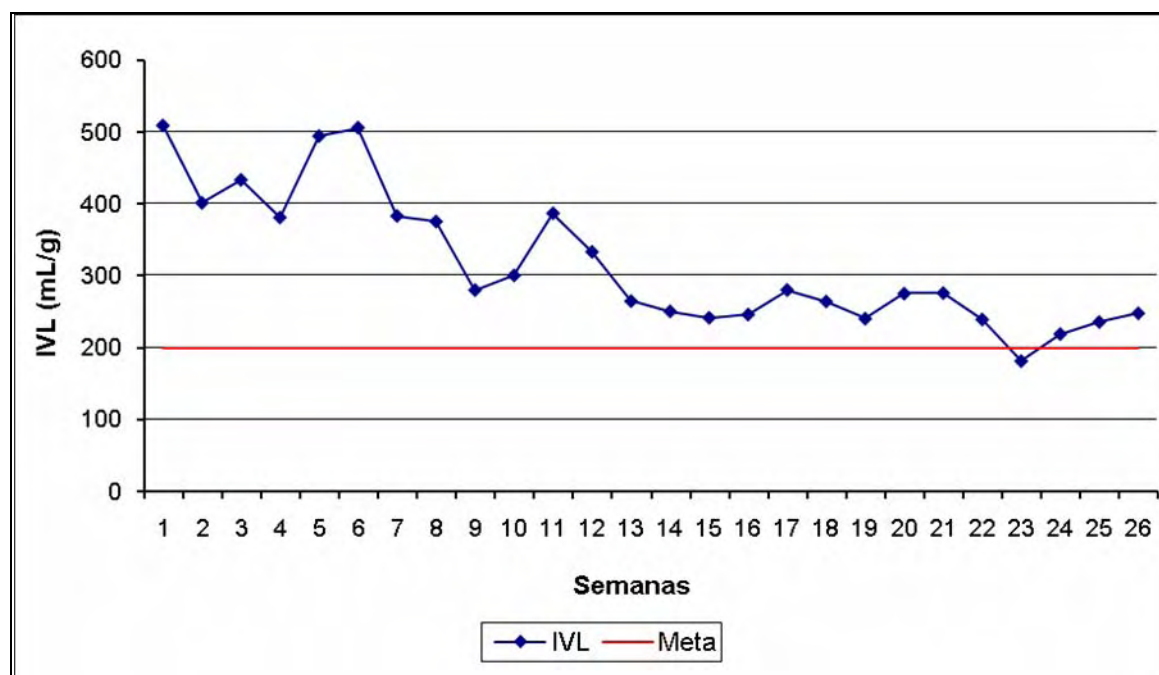


Figura 7. Evolução semanal do IVL no período de julho de 2010 a janeiro de 2011.

Apesar da meta proposta de 200 mL/g ter sido atingida uma única vez, é possível observar decaimento na evolução temporal do IVL após a execução das ações propostas. Essa evolução do indicador sugere que é possível atingir a meta após a execução completa do plano de ação proposto.

Entretanto, mesmo com o plano de ação proposto ainda em fase de execução e o sistema ainda estar sendo submetido a frequentes interrupções de alimentação, a melhora dos indicadores IVL sugere que a operação do sistema de tratamento de efluentes está mais estável e que as ações executadas até o momento foram efetivas.

4. CONCLUSÃO

Por meio deste experimento foi possível constatar que a aplicação da metodologia PDCA contribuiu para a identificação das causas fundamentais do problema de sedimentabilidade de lodo da estação de tratamento de efluentes da indústria frigorífica de aves, assim como identificar as possíveis soluções para o problema. Por meio da aplicação das ferramentas de gestão ficou evidenciado que as causas fundamentais do problema de sedimentabilidade da ETE da indústria frigorífica eram de origem operacional, como choques de carga devido à instabilidade da flotação, entrada de sangue e entrada de resíduo de incubação no sistema, ausência de alimentação do sistema, baixa concentração de OD no tanque de aeração, entre outros.

A aplicação do indicador de desempenho do processo de tratamento de águas residuárias, IVL, foi fundamental para a identificação do problema e para viabilizar a verificação da efetividade das ações propostas. Analisando o processo a partir de uma perspectiva biológica, o sistema de lodos ativados da Indústria Frigorífica de Aves analisada apresentou flocos porosos e morfologia irregular. Apesar de uma redução visível ao longo do período analisado, a presença de bactérias filamentosas é considerável, e isso causa problemas de intumescimento filamentoso e, por consequência, perda de lodo no decantador secundário.

Os sistemas de tratamento de efluentes por lodos ativados, por se tratar de um tratamento biológico, é um sistema muito sensível às alterações do meio, como carga orgânica, pH e temperatura. Geralmente, as indústrias frigoríficas não operam nos finais de semana, esses dias são reservados para realização de manutenção e higienização da fábrica. Por essa razão, o uso de sistemas de tratamento por lodos ativados está limitado às interrupções de alimentação e às variações constantes de carga.

5. AGRADECIMENTOS

Agradecemos à CAPES pela concessão da bolsa de mestrado ao primeiro autor.

6. REFERÊNCIAS

- AMARAL, A. L.; FERREIRA, E. C. Activated sludge monitoring of a wastewater treatment plant using image analysis and partial least squares regression. **Analytica Chimica Acta**, Amsterdam, v. 544, p. 246 – 253, 2005.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.aca.2004.12.061>
- ARREGUI, L.; SERRANO, S.; LINARES, M.; PÉREZ-UZ, B.; GUINEA, A. Ciliate contributions to bioaggregation: laboratory assays with axenic cultures of *Tetrahymena thermophila*. **International Microbiology**, Barcelona, v. 10, p. 91 – 96, 2007.
- CANLER, J. P.; PERRET, J. M.; DUCHÊNE, P.; COTTEUX, É. **Aide au diagnostic des stations d'èpuration par l'observation microscopique des boues actives**. Lyon: Cemagref Editions, 1999. 155 p.
- CAMPOS, V. F. **Gerenciamento da rotina do trabalho do dia-a-dia**. Nova Lima: INDG Tecnologia e Serviços Ltda, 2004. 266 p.
- FORNARI JR., C. C. M. Aplicação da ferramenta da qualidade (diagrama de Ishikawa) e do PDCA no desenvolvimento de pesquisa para a reutilização dos resíduos sólidos de coco verde. **Revista INGEPRO**, v. 02, n. 09, p. 104-112, 2010.
- GERARDI, M. H. **Settleability problems and loss of solids in the activated sludge process**. Hoboken: Wiley Interscience, 2002. 179 p. <http://dx.doi.org/10.1002/047147164X>
- GINORIS, Y. P. **Aplicação de técnica de análise de imagens no monitoramento de sistemas de lodos ativados**. 2006. 194f. Tese (Pós-Graduação em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.
- JENKINS, D.; RICHARD, M. G.; DAIGGER, G. T. **Manual on the causes and control of activate sludge bulking, foaming, and others solids separation problems**. 3. ed. Boca Raton: CRC Press LLC, 2004. 190 p.
- MADONI, P. A Sludge Biotic Index (SBI) for the evaluation of the biological performance of activated sludge plants based on the microfauna analysis. **Water Research**, Amsterdam, v. 28, n. 1, p. 67-75, 1994.

CASTRO, A. D. J.; PINHEIRO, A.; GINORIS, Y. P. Aplicação do Método de Soluções de Problemas (PDCA) em um sistema de tratamento de efluentes de indústria frigorífica de aves. **Ambi-Agua**, Taubaté, v. 6, n. 3, p. 221-238, 2011. (<http://dx.doi.org/10.4136/ambi-agua.743>)

MARTINS, M. J.; NICOLAU, A.; MOTA, M.; LIMA, N. A importância da microfauna como ferramenta de trabalho em estações de tratamento de águas residuais. In: ENCONTRO NACIONAL DE SANEAMENTO BÁSICO; SIMPÓSIO LUSO-BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 10., 2002, Braga. **Proceedings...** Braga: Universidade do Minho, 2002. Disponível em: <<http://repositorium.sdum.uminho.pt/handle/1822/3688>>. Acesso em: 23 de out. de 2010.

MESQUITA, D. P.; DIAS, O.; DIAS, A. M.; AMARAL, A. L.; FERREIRA, E. C. Correlation between sludge settling ability and image analysis information using partial least squares. **Analytica Chimica Acta**, Bethesda, v. 642. p. 94 - 101, 2009. <http://dx.doi.org/10.1016/j.aca.2009.03.023>

NICOLAU, A.; LIMA, N.; MOTA, M.; MADONI, P. Os protozoários como indicadores da qualidade biológica das lamas activadas. **Boletim de Biotecnologia**, Lisboa, v. 56, p. 14-19, 1996.

PIECHNICKI, A. S.; KOVALESKI, J. L.; SOUZA, M. V. de; PIECHNICKI, F.; BARAN, L. B. Utilização da metodologia de análise e solução de problemas na redução das perdas de água: um estudo de caso Sanepar. **Revista de Engenharia e Tecnologia**, v. 3, n. 2, p. 90-99, 2011.

QUINQUIOLO, J. M. **Avaliação da eficácia de um sistema de gerenciamento para melhorias implantado na área de carroceria de uma linha de produção automotiva**. 2002. 107f. Dissertação (Mestrado em Gestão e Desenvolvimento Regional) - Departamento de Economia, Contabilidade, Administração e Secretariado, Universidade de Taubaté, 2002.

SARTORATO, J.; AZEVEDO, A. R. C. de; CECHETTO, J. C.; CUNHA, R. G.; PEREIRA, A. P. de S. Implantação e avaliação do modelo de gerenciamento da rotina de trabalho do dia-a-dia nos sistemas de esgoto sanitário da grande Florianópolis-Santa Catarina. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 21., 16-21 set. 2001, João Pessoa. **Anais...** João Pessoa, 2001.

STYPKA, A. **Factors influencing sludge settling parameters and solids flux in the activated sludge process: A literature review**. Stockholm: Division of Water Resources Engineering Department, Department of Civil & Environmental Engineering, Royal Institute of Technology, 1998, 115 p.

VON SPERLING, M. **Lodos Ativados**. 2. ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – UFMG, 2002. 428 p.

WERKEMA, M. C. C. **Ferramentas estatísticas básicas para o gerenciamento de processos**. Belo Horizonte: Fundação Christiano Ottoni, Escola de Engenharia da UFMG, 1995. 404 p.