Encontro Técnico AESABESP
35º Congresso Nacional de Saneamento e Meio Ambiente

ESTRATÉGIAS DE *START-UP* EM ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE EFLUENTES COM LODO GRANULAR AERÓBIO - CASOS REAIS EM OPERAÇÃO NO BRASIL

Joana Raquel Claudino Doutor[(1)]
Mestrado Integrado em Engenharia do Ambiente, perfil Engenharia Sanitária, na Universidade Nova de Lisboa, Portugal. Possui 18 anos de experiência profissional em projetos internacionais nas áreas de Engenharia de Processo, S*tart-ups* e Suporte Operacional em instalações de tratamento de água e efluentes. Atualmente é Coordenadora Técnica Global da *Performance* de Plantas Nereda®, no Departamento de Tecnologia e Produtos de Água, da Royal HaskoningDHV, Holanda.
Rita Alexandra Rebelo Ramos de Almeida[(2)]
Mestrado Integrado em Engenharia do Ambiente, perfil Engenharia Sanitária, na Universidade Nova de Lisboa, Portugal. Pós-graduação em economia e gestão pela Católica Lisbon School of Business and Economics. Programa doutoral em sistemas energéticos sustentáveis pelo Instituto Superior Técnico. Atua há 24 anos na operação e manutenção de sistemas de saneamento. Atualmente é Gerente do Serviço de Suporte Operacional do Departamento de Tecnologia e Produtos de Água, da Royal HaskoningDHV, Holanda.
Sérgio Roberto Rodrigues Ribeiro[(3)]
Formado em Engenharia Química pela Universidade Estadual de Campinas. Possui MBA pela Fundação Dom Cabral e atua há mais de 30 anos no Mercado de Membranas Poliméricas e tratamento biológico avançado, onde foi responsável pela comercialização dos dois projetos de membranas mais significativos do Brasil, AQUAPOLO e ABV. Atualmente trabalha para a Royal HaskoningDHV como Diretor Comercial no Brasil das Tecnologias Nereda® e Ephyra®.
Rafael Belisário da Silva[(4)]
Formado em Engenharia Ambiental pela Escola de Engenharia de São Carlos (USP). Possui MBA em Gerenciamento de Projetos pela Fundação Getúlio Vargas e atua há mais de 13 anos no mercado de Saneamento Básico. Foi responsável pelo gerenciamento de estudos, projetos e obras de redes, elevatórias e estações de tratamento de água e esgoto para diversas cidades brasileiras. Atualmente trabalha para a Royal HaskoningDHV como Gerente de Projetos no Brasil das Tecnologias Nereda® e Ephyra®.
Henrique Gozzo Zoadelli[(5)]
Formado em Engenharia Civil pelo Instituto Mauá de Tecnologia. Possui MBA pela Fundação Getúlio Vargas e atua há 8 anos no Mercado de Saneamento Básico, com experiência no gerenciamento de Estudos de Concepção, Plano Diretor e Projetos Básico e Executivo de Engenharia. Atualmente trabalha para a BRK Ambiental como Coordenador de Novas Tecnologias, sendo responsável pela prospecção, desenvolvimento e aplicação de soluções inovadoras na companhia.

Endereço[(1)]**:** Laan 1914, No. 35 – Amersfoort – 3818 EX – Holanda – Tel.: +31(0)883482000 – e-mail: joana.doutor@rhdhv.com.

RESUMO

A tecnologia de lodo granular aeróbio (LGA) é uma solução pioneira para o tratamento de efluentes. A remoção de carbono, nitrogênio e fósforo através de LGA é um processo em bateladas sequenciais, com seleção de microrganismos que favorece o crescimento de grânulos aeróbios. Existem várias estratégias utilizadas para o crescimento de LGA na fase de *start-up* de reatores Nereda®, tendo como base diferentes metodologias de inoculação, preferencialmente lodo ativado convencional ou LGA. Quanto menor for o período disponível para *start-up*, mais se justifica a opção por LGA como inóculo. A aplicação de LGA em reatores Nereda® acelera a fase de *start-up*, que pode ser tanto mais rápida quanto maior for a concentração inicial de lodo. A fase de *start-up* deve ser operada em condições controladas, preferencialmente com aumento gradual da vazão afluente e controle da carga mássica nos reatores biológicos. A duração típica da fase de *start-up* para atender aos requisitos de qualidade do efluente tratado pode variar entre 30 e 120 dias.

PALAVRAS-CHAVE: Inóculo, Lodo granular aeróbio, *Start-up*

INTRODUÇÃO

A tecnologia de lodo granular aeróbio (LGA) é considerada uma solução pioneira para o tratamento de esgoto doméstico e industrial. A remoção combinada de carbono, nitrogênio e fósforo na tecnologia LGA baseia-se num processo de bateladas sequenciais e depende de um mecanismo de seleção de microrganismos que favorece o crescimento de grânulos aeróbios em vez de lodo floculento. Como resultado da elevada concentração e velocidade de sedimentação dos LGA todo o processo biológico e separação sólido-líquido ocorre num só reator não sendo necessário tanques de sedimentação separados. Assim é possível uma redução significativa da área de implantação para a Estação de Tratamento de Efluentes (ETE) (de Bruin et al., 2004).

A tecnologia de LGA considerada inicialmente como uma solução promissora, foi desenvolvida durante a década de 90 em escala laboratorial (Morgenroth et al., 1997; Beun et al., 1999; Tay et al., 2002) e em escala piloto (Morales et al., 2013; Liu et al., 2010; Isanta et al., 2012; Wei et al., 2012, Pronk et al, 2015). O desenvolvimento desta tecnologia foi realizado na Holanda por um consórcio público-privado formado pela *Delft University of Technology*, diversas entidades do setor da água e a empresa de consultoria *Royal HaskoningDHV*, com o apoio de programas de inovação nacionais e internacionais. Esta nova tecnologia foi registrada como marca comercial sob o nome Nereda® pela *Royal HaskoningDHV*. A tecnologia LGA começou a ser aplicada para tratamento de águas residuais industriais em 2005 e a primeira Planta de demonstração para águas residuais municipais foi projetada e construída em Gansbaai, África do Sul, entre 2006 e 2008. Em 2010, o primeiro reator de LGA em grande escala implementado comercialmente para tratamento doméstico (65%) e águas residuais industriais (35%) (matadouro) foi construído em Epe, na Holanda (Giesen et al., 2013). Atualmente existem 115 ETEs projetadas com tecnologia Nereda® em todo o mundo, 15 das quais no Brasil. Os resultados operacionais das 72 ETEs em funcionamento revelam que a tecnologia de LGA apresenta inúmeras vantagens quando comparada com sistemas de lodos ativados convencionais , nomeadamente: i) redução de cerca de 75% da área de implantação como resultado da elevada concentração de biomassa nos reatores; ii) redução de 20-50% de consumo de energia, devido à redução do número de equipamentos e ao controle rigoroso do processo de aeração; iii) resiliência do processo de tratamento devido à estabilidade do LGA e à automação do controle operacional e iv) economia dos custos de investimento e operacionais. Juntamente com a extensiva remoção biológica de nutrientes, as vantagens descritas traduzem-se num elevado desempenho operacional (Almemark, 2007). Além disso, a menor necessidade de energia promove a transição para a neutralidade energética, enquanto a remoção biológica de nutrientes facilita recuperação de fosfatos.

A formação de LGA é um processo que envolve diversas interações celulares, as quais incluem fenômenos biológicos, físicos e químicos (LIU et al, 2004). Este processo inicia-se com a formação de agregados densos a partir do lodo utilizado como inóculo, aderindo à forma de lodo granular e, finalmente, de grânulos maduros e compactos. A formação de grânulos inicia-se juntamente com a partida da operação da ETE (*start-up*) dependendo de vários fatores, nomeadamente do tipo de inóculo. Este artigo descreve diferentes estratégias de *start-up* aplicadas em quatro ETEs com tecnologia Nereda® no Brasil e apresenta uma análise comparativa dos resultados obtidos.

OBJETIVO

O *start-up* define-se como o período durante o qual a ETE inicia a operação contínua, ou seja, a partir do momento em que há afluência de vazão à Planta, e são realizados os ajustes operacionais necessários para alcançar uma condição operacional estável. Tipicamente as autoridades ambientais no Brasil permitem um período de 180 dias (6 meses) para atividades de *start-up* e para que as instalações cumpram as outorgas de descarga de efluente tratado.

A estratégia e a abordagem para o *start-up* de uma instalação Nereda® é ajustada às condições locais e depende de vários fatores sendo os mais relevantes os seguintes:i) as obrigações regulamentares; ii) cargas e a evolução da vazão afluentes entre o início e o final da fase de start-up; iii) os parâmetros de qualidade do efluente a serem satisfeitos; iv) número de reatores biológicos disponíveis, v) disponibilidade da linha de tratamento de lodos e de outras equipamentos relavantes ao controle do processo; v) a origem, qualidade e quantidade de lodo (inóculo) utilizado para inocular os reatores Nereda®, entre outros.

A metodologia aplicada na inoculação é um dos fatores que mais influencia a duração do *start-up* e pode condicionar o cumprimento dos requisitos exigidos pela entidade gestora tanto a nível operacional (recursos operacionias disponíveis) como legal (cumprimento da legislação).

Este artigo aborda diferentes estratégias utilizadas para o crescimento do LGA, tendo como base quatro metodologias de inoculação: i) lodo ativado convencional, ii) esgoto bruto, iii) lodo granular aeróbio e iv) lodo proveniente de sistemas UASB (*Anaerobic Sludge Blanket Reactor*) e Biofilme. O estudo pretende avaliar o resultado das diferentes opções de inoculação, no que diz respeito à:

1) condição operacional em *start-up*;
2) desenvolvimento do LGA;
3) qualidade do efluente tratado;
4) duração do *start-up*.

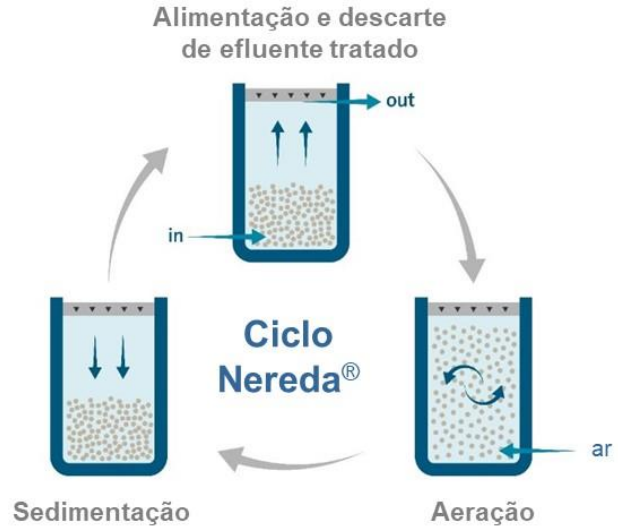
Esta questão tem-se revelado crítica para as entidades gestoras tendo em conta as restrições de tempo e exigências legais existentes. Embora sejam conhecidos os impactos das diferentes opções de *start-up* nem sempre é possível quantificar o resultado de cada opção, tornando mais difícil a tomada de decisão por parte das entidades gestoras. Este artigo pretende servir de apoio à tomada de decisão na definição da estratégia de *start-up* em instalações de LGA.

METODOLOGIA

Princípios da tecnologia Nereda®

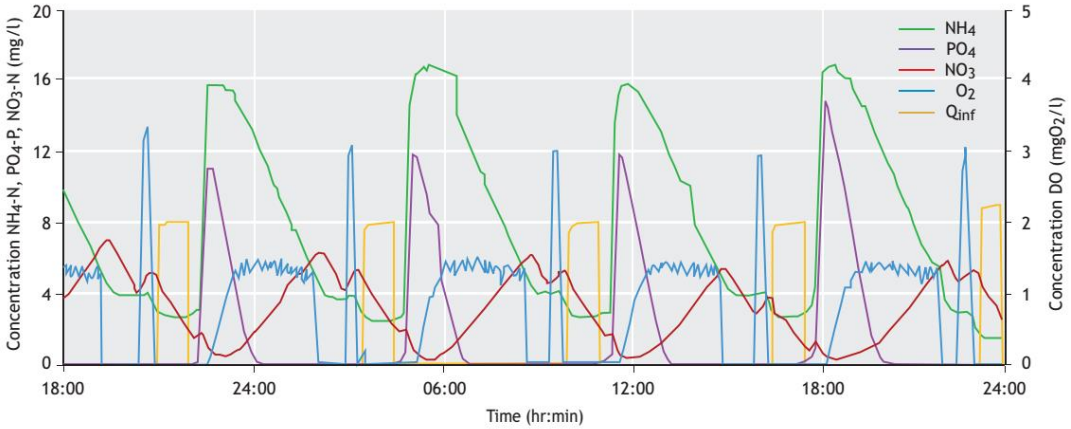
O processo de LGA é um processo de bateladas sequenciais. Um reator biológico passa por diferentes etapas para tratar o efluente bruto. Estas etapas consecutivas (alimentação de efluente bruto e descarte simultâneo de efluente tratado, aeração e sedimentação) são designadas como ciclos Nereda® (Figura 1) (Chen et al, 2023). As etapas ou fases de um ciclo Nereda® não são fixas. A duração das fases pode ser adaptada em função das circunstâncias do processo. Por outro lado, o tempo total do ciclo é automaticamente regulado pelo *software* de controle do processo. Mais importante ainda, através do monitoramento *online* (exemplo na Figura 2) de alguns parâmetros, como a amônia, o nitrato e o fosfato permitem acompanhar a evolução das reações biológicas em tempo real e, se necessário, atingir concentrações de NH_4-N e PO_4-P inferiores a 1 mgL^{-1}. Estes parâmetros podem ser usados para ajustar as fases do ciclo ou outras variáveis do processo. Estas condições tornam a tecnologia Nereda® altamente flexível. O processo de LGA é controlado para atender aos requisitos do efluente tratado nos diversos parâmetros de qualidade (DQO, DBO_5, SST, N e P), otimizar o tempo de retenção de lodos e responder a variações da vazão afluente (Chen et al, 2023).

Figura 1 – Ciclo Nereda®



Fonte: Chen et al, 2023.

Figura 2 – Monitoramento *online* de amônia, fosfato, nitrato, oxigênio e vazão de alimentação numa ETE Nereda®

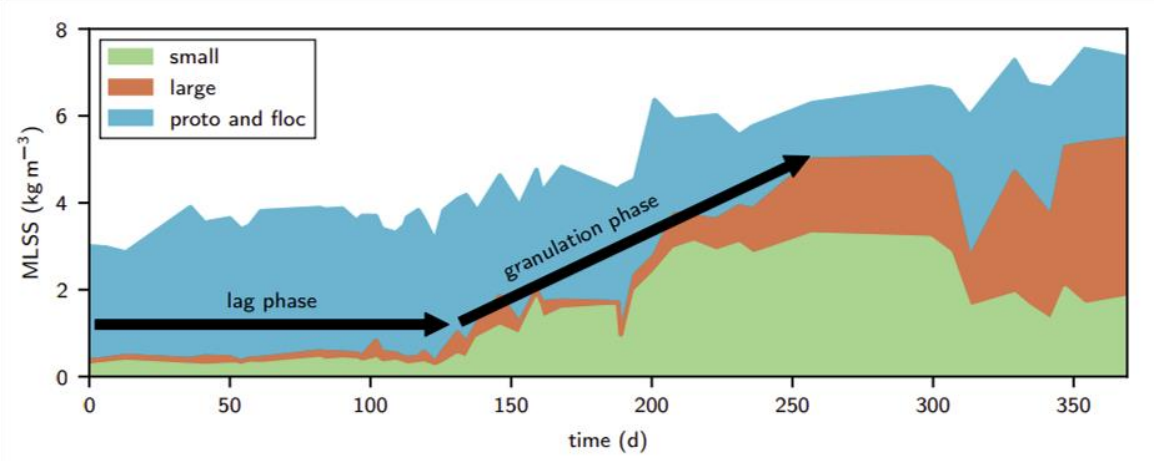


Fonte: Chen et al, 2023.

Na primeira etapa do ciclo Nereda® o efluente bruto é alimentado pelo fundo do reator atravessando a manta de lodo, enquanto o efluente tratado da batelada anterior é descartado pelo topo do reator. Devido às boas propriedades de sedimentação dos LGA este processo pode ocorrer com uma vazão e velocidade de alimentação relativamente elevadas, sem o risco saída de sólidos no efluente tratado. Na fase de reação, o reator é operado numa sequência de condições anaeróbias, anóxicas e aeróbias para conversão de DQO e nutrientes (amônia, nitrato, nitrito e fósforo). A fase de sedimentação permite assentar a manta de lodo para evitar a saída de sólidos quando se inicia a alimentação do ciclo seguinte. É também nesta etapa que parte dos mecanismos de seleção de LGA ocorrem (Chen et al, 2023).

Quando um reator Nereda® é inoculado com lodos ativados (concentração típica de 3 gL^{-1}), nas circunstâncias certas, o lodo granular desenvolve -se a partir de lodo floculento. Na prática o processo de granulação tem várias dinâmicas e fatores que contribuem para o seu sucesso, nomeadamente: i) pressão de seleção, ii) regime alternado de fome/alimento, iii) relação A/M, iv) concentração do oxigênio dissolvido, v) forças hidrodinâmicas, entre outros. O processo de granulação tem geralmente uma fase retardada, na qual não há muita mudança no grau de granulação (fração de biomassa floculenta). Em segundo lugar, existe a fase de granulação, na qual os grânulos começam a aparecer no reator e o grau de granulação aumenta rapidamente (Figura 3) (Van Dijk et al, 2022). Nesta fase observa-se o crescimento de LGA e uma otimização do índice volumétrico de lodo (IVL), nos primeiros 5 minutos de sedimentação (IVL_5) e ao fim de 30 minutos de sedimentação (IVL_{30}). A partir do momento em que a concentração de lodo é suficiente para atender à qualidade do efluente tratado, entra-se na fase de maturação da manta granular de forma a conseguir uma distribuição das frações granulares o mais uniforme possível (Figura 4,Figura **5** eFigura **6**).

Figura 3 – Estrutura típica de um reator LGA a partir de flocos, mostrando uma fase inicial de retardamento com melhoria lenta da morfologia do lodo, seguida da fase de granulação, onde aparecem grânulos no reator. As cores indicam o tamanho dos agregados de biomassa, mostrando protogrânulos e flocos (<200 µm), grânulos pequenos (>200 µm) e grânulos grandes (>1000 µm). Dados provenientes do reator Nereda® em Utrecht, Holanda



Fonte: Van Dijk et al, 2022.

A Figura 4 e a Figura 5 apresentam uma perspetiva alargada no tempo (480 dias) da evolução da concentração de lodo, IVL_5 e IVL_{30}, de uma Planta que utilizou apenas efluente bruto como inóculo, no período de crescimento e maturação da granulação que estabilizou ao fim de cerca de 350 dias de operação. A distribuição das frações de LGA e fotografias de grânulos aeróbios maduros são detalhadas na Figura 6.

A utilização de um inóculo inicial com boas propriedades de sedimentação ($IVL_5 < 150$ mlg^{-1} e $IVL_{30} < 120$ mlg^{-1}) e com presença de microbiota para remoção de nutrientes (N e P), permite atender a qualidade do efluente tratado mais rapidamente, assim como acelerar o crescimento e maturação de LGA.

Figura 4 – Exemplo da evolução da concentração de lodo numa ETE desde o início do *start-up*

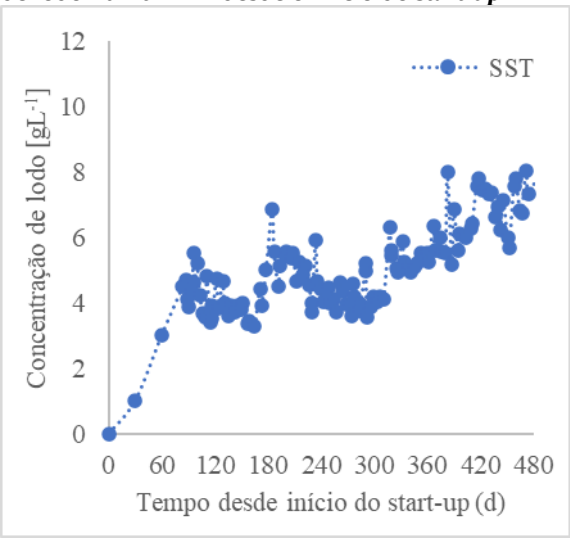
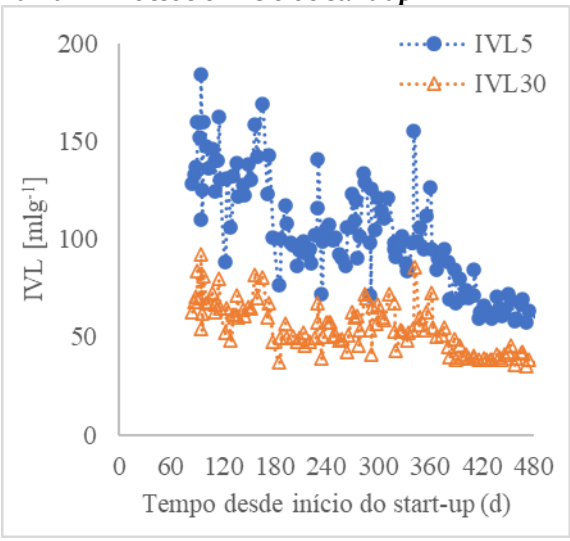
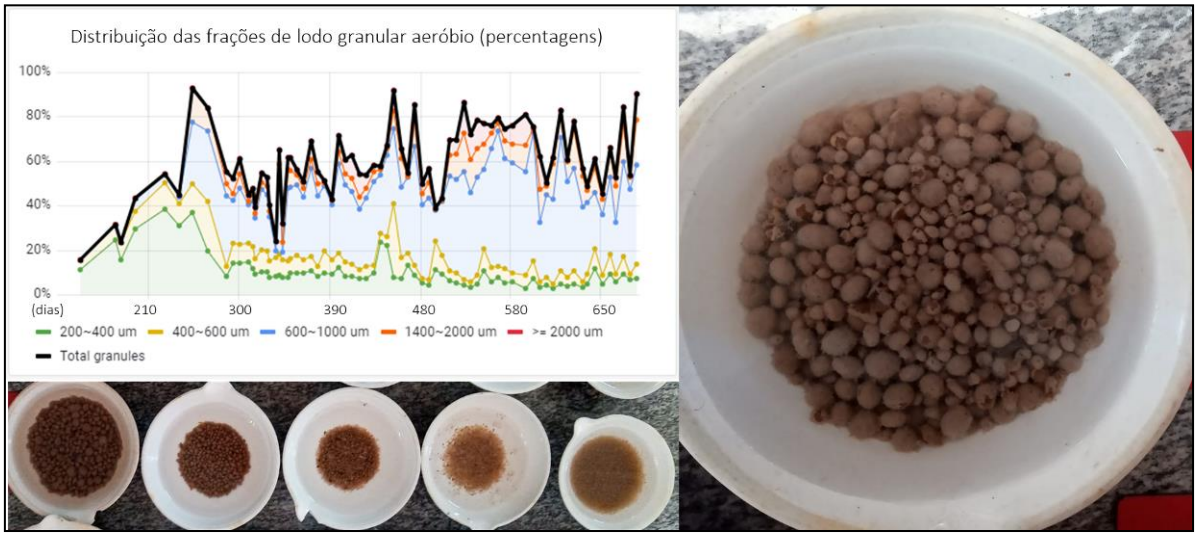


Figura 5 – Exemplo da evolução do IVL_5 e IVL_{30} numa ETE desde o início do *start-up*



Fonte: Dados provenientes do reator Nereda® em operação no Brasil.

Figura 6 – Exemplo da distribuição das frações e morfologia típica de lodos granulares aeróbios maduros numa ETE



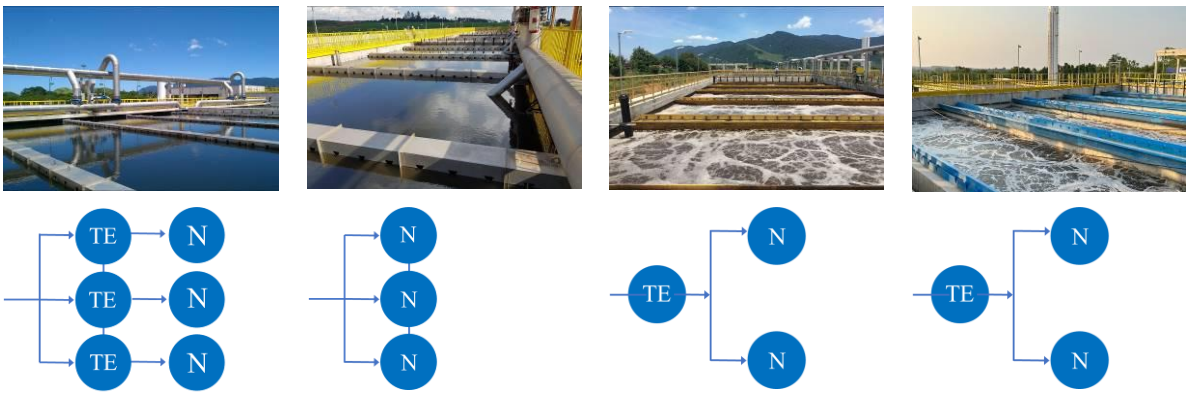
Fonte: Dados provenientes do reator Nereda® em operação no Brasil.

Descrição das Estações de Tratamento de Efluentes em estudo

As ETEs selecionadas para este estudo iniciaram a operação entre 2016 e 2023. Uma vez que a tecnologia Nereda® se baseia em ciclos de bateladas sequenciais, o tratamento de uma vazão contínua requer a existência de múltiplos reatores Nereda® e/ou um tanque de equalização a montante dos reatores biológicos. A Figura 7 apresenta a configuração das 4 ETEs do estudo. As características gerais de projeto são apresentadas na Tabela 1 e as características do afluente bruto e efluente tratado são apresentadas na Tabela 2.

Figura 7 – Configurações das ETEs em estudo

Planta A **Planta B** **Planta C** **Planta D**



TE – Tanque de equalização
N - Reator Nereda®

Fonte: Documentos de Projeto Nereda® (RHDHV, 2015-2022).

Tabela 1 - Dados de projeto das ETEs em estudo (Plantas A, B, C e D)

Parâmetro	Unidade	Planta A	Planta B	Planta C	Planta D
População equivalente	P.E.	324,000	137,083	144,000	228,083
Vazão média afluente	Ls^{-1}	750	272	500	395
Volume de equalização	m^3	6,933	-	6,300	4,000
Volume de reator (processo)	m^3	6,400	3,500	6,900	6,800
Nº de reatores		3	3	2	2
Volume total de reatores	m^3	19,200	10,500	13,800	13,600

Fonte: Documentos de Projeto Nereda® (RHDHV, 2015-2022).

Tabela 2 - Dados de projeto para afluente bruto (AF) e efluente tratado (EF) das ETEs em estudo (Plantas A, B, C e D)

Parâmetro	Planta A			Planta B			Planta C			Planta D		
	AF		EF	AF		EF	AF		EF	AF		EF
	mgL^{-1}	kgd^{-1}	mgL^{-1}	mgL^{-1}	kgd^{-1}	mgL^{-1}	mgL^{-1}	kgd^{-1}	mgL^{-1}	mgL^{-1}	kgd^{-1}	mgL^{-1}
DBO_5	300	19,440	40	350	8,225	9	200	8,640	40	401	13,685	23
DQO	560	36,288	-	671	15,769	-	450	19,440	-	758	25,869	-
NH_4-N	-	-	-	-	-	-	-	-	5	-	-	-
N_t	45	2,916	-	58	1,363	20	35	1,512	-	79	2,681	10
P_T	10	648	-	8	188	1	8	324	-	7	249	-
SST	300	19,440	40	208	4,888	20	150	6,480	40	210	7,167	20

Fonte: Documentos de Projeto Nereda® (RHDHV, 2015-2022).

Dados operacionais

Os dados operacionais utilizados para a análise e discussão do estudo resultam das medições dos parâmetros *on-line*, através dos sensores de monitoramento instalados nas ETEs e dos resultados analíticos de qualidade provenientes de laboratório.

Os parâmetros *on-line* permitem o monitoramento contínuo da cinética do LGA através da medição de parâmetros como amônia, nitrato, fosfato, sólidos, entre outros. Os resultados analíticos provenientes de laboratório baseiam-se numa amostragem composta de 24 horas dos parâmetros de qualidade no afluente, reator e efluente.

Condições para definição da estratégia de *start-up*

A execução dos *start-ups* teve em conta as condições descritas na Tabela 3. Os *start-ups* em estudo utilizaram diferentes tipos de inóculo em função da disponibilidade local. O período oficial de *start-up* em todas as ETEs foi de 180 dias.

Tabela 3 – Condições de base para o *start-up* das ETEs em estudo

ETEs	Vazão afluente prevista (% da nominal)	Inóculo disponível	Objetivos de tratamento
Planta A	33%	Lodo ativado convencional	Remoção de DBO_5, SST
Planta B	100%	Esgoto bruto	Remoção de DBO_5, N_t e P_t
Planta C	40%	Lodo granular aeróbio	Remoção de DBO_5, SST e NH_4
Planta D	28%	Lodo UASB e biofilme	Remoção de DBO_5, SST, N_t

RESULTADOS

Condições operacionais das ETEs na fase de *start-up*

Durante a fase de *start-up* vários parâmetros operacionais foram sendo ajustados de forma a tratar a totalidade da vazão afluente, intensificar o crescimento de LGA e atingir os objetivos de qualidade do efluente tratado num curto espaço de tempo. Na Tabela 4 resumem-se as condições operacionais das ETEs em estudo.

Tabela 4 – Condições operacionais das ETEs em estudo durante a fase de *start-up*

Condições operacionais	Unidade	Planta A		Planta B		Planta C		Planta D	
		Início	Fim	Início	Fim	Início	Fim	Início	Fim
Vazão média afluente	Ls^{-1}	78	179	250	248	90	135	30	109
No. de reatores em operação	-	2	2	3	3	1	1	1	2
Tempo de ciclo	minutos	180	180	180	180	240	180	240	360
Tempo de sedimentação	minutos	60	25	60	18	60	18	60	50
Concentração de lodo	gL^{-1}	2	9	0	5	1	4	1	7
Relação A/M (tempo biológico)	$kgDQOkgSST^{-1}$	>0.5	<0.4	>0.5	<0.4	<0.5	<0.4	<0.5	<0.3
Objetivo de tratamento(*)	-	C	C	C	C/N/P	C/N	C/N	C	C/N

(*) Remoção de carbono (C), nitrogénio (N) e fósforo (P)

Os *start-ups* das Plantas A, C e D foram realizados com um aumento gradual da vazão afluente a tratamento até se atingir a vazão final de *start-up* pretendida. Esta estratégia foi possível de implementar à medida que novas ligações de redes de esgoto domiciliar foram sendo finalizadas e no caso específico das Plantas A e D foi também em conjunto com o descomissionamento de Plantas existentes. No caso da Planta B a vazão média diária afluente esteve próxima da vazão nominal desde o primeiro dia de *start-up*.

Importante referir que no decorrer da fase de *start-up* dos reatores biológicos Nereda® também se realizaram atividades paralelas de comissionamento e *start-up* do processo de tratamento de lodo. Em todas as instalações verificou-se que a etapa de tratamento de lodo ficou disponível alguns meses depois do início do *start-up* do processo biológico. Estas atividades paralelas tiveram algum impacto no processo de seleção de lodo granular e resultaram em tempos de sedimentação diferentes no final da fase de *start-up* em cada instalação.

Desenvolvimento do lodo granular aeróbio

O crescimento do LGA em concentração suficiente para garantir a qualidade do efluente tratado foi um dos primeiros objetivos operacionais durante a fase de *start-up* de todas as ETEs em estudo. A Figura 8 e Figura 9 indicam a progressão da concentração de lodo e do índice volumétrico de lodo após 5 minutos de sedimentação (IVL_5) nas ETEs em estudo durante os 180 dias da fase de *start-up*. As variações observadas acompanharam os períodos de inoculação, crescimento e maturação inicial da manta de LGA.

Figura 8 – Evolução da concentração de lodo das ETEs em estudo na fase de *start-up*

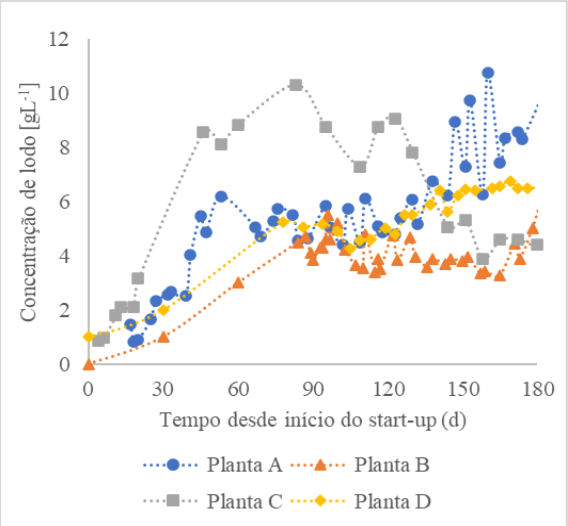
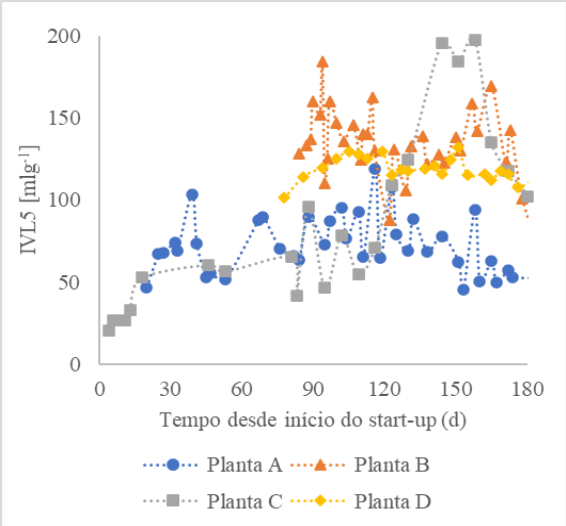


Figura 9 – Evolução do IVL_5 das ETEs em estudo na fase de *start-up*



O desenvolvimento de LGA passou por 3 estágios em todas as plantas em estudo: i) inoculação, ii) crescimento e iii) maturação. O tipo de inóculo e as condições operacionais dos reatores Nereda® resultaram em estágios de desenvolvimento com duração distintas conforme indicado na Figura 10. Interessante verificar que o desenvolvimento de LGA das ETEs em estudo seguem curvas semelhantes ao indicado na Figura 3. A utilização de um inóculo inicial com boas propriedades de sedimentação (IVL_5 entre 50 e 100 mlg^{-1} como verificado nas Plantas A e C) acelerou o crescimento e maturação de LGA nos novos reatores biológicos.

Figura 10 – Duração dos estágios de desenvolvimento de lodo granular aeróbio

	Tempo desde início do start-up (d)															
Crescimento de lodo granular aeróbio	**30**	**60**	**90**	**120**	**150**	**180**	**210**	**240**	**270**	**300**	**330**	**360**	**390**	**420**	**450**	**480**
Planta A - Inóculo lodo ativado																
Planta B - Inóculo efluente bruto																
Planta C - Inóculo lodo granular aeróbio																
Planta D - Inóculo lodo UASB e biofilme																

Legenda:

Período de inoculação dos reatores Nereda®

Período de crescimento do lodo

Fase de maturação do lodo

Qualidade do efluente tratado na fase de *start-up*

O objetivo central da fase de *start-up* foi otimizar e estabilizar a qualidade do efluente tratado dentro dos limites estabelecidos em projeto e pela outorga de descarga de efluentes. As Figura 11 a Figura 15 detalham a evolução das concentrações diárias no decorrer da fase de *start-up* das ETEs em estudo. A Tabela 5 resume a concentração média diária de DQO, DBO_5, SST, NH_4-N, N_t e P_t no período de estabilização operacional ainda no decorrer da fase de *start-up*, com excepção da Planta B cuja estabilização ocorreu após a fase de *start-up*. De referir que todos os resultados são avaliados em amostras compostas em 24 h/d.

Figura 11 – Concentração de DQO no efluente tratado das ETEs em estudo na fase de *start-up*

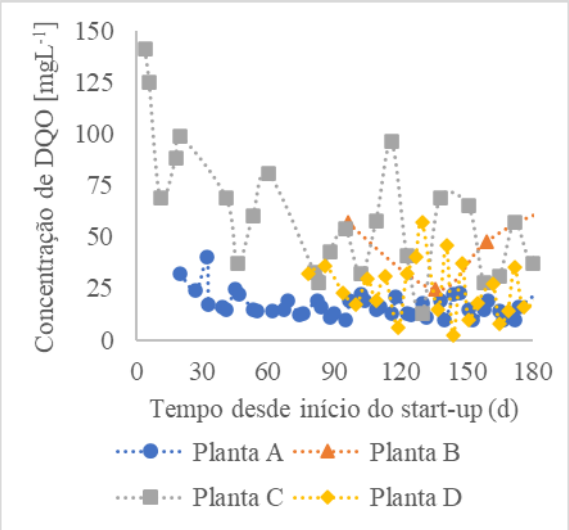


Figura 12 – Concentração de DBO_5 no efluente tratado das ETEs em estudo na fase de *start-up*

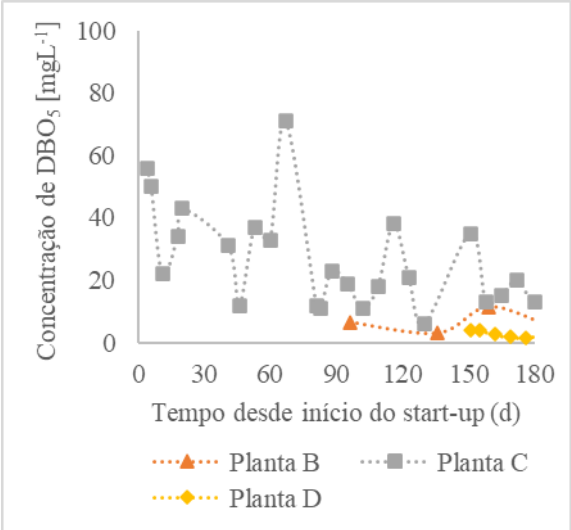


Figura 13 – Concentração de SST no efluente tratado das ETEs em estudo na fase de *start-up*

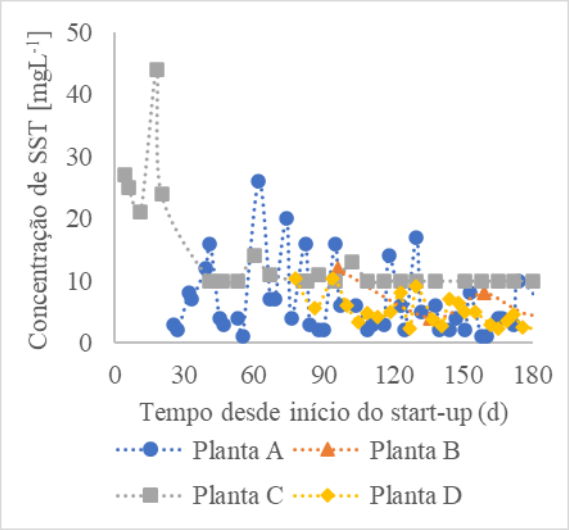


Figura 14 – Concentração de NH_4-N no efluente tratado das ETEs em estudo na fase de *start-up*

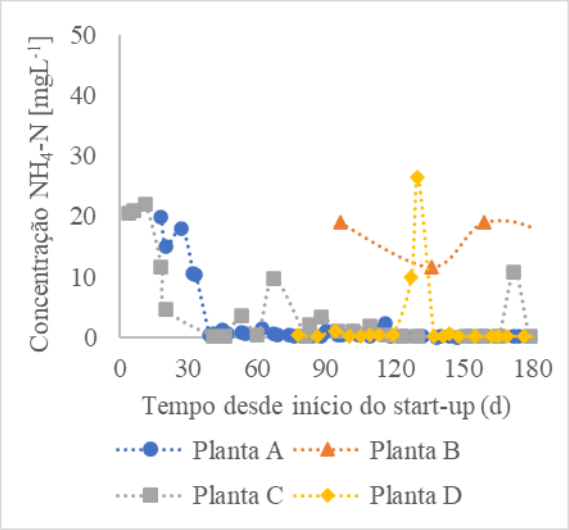


Figura 15 – Concentração de N_t no efluente tratado das ETEs em estudo na fase de *start-up*

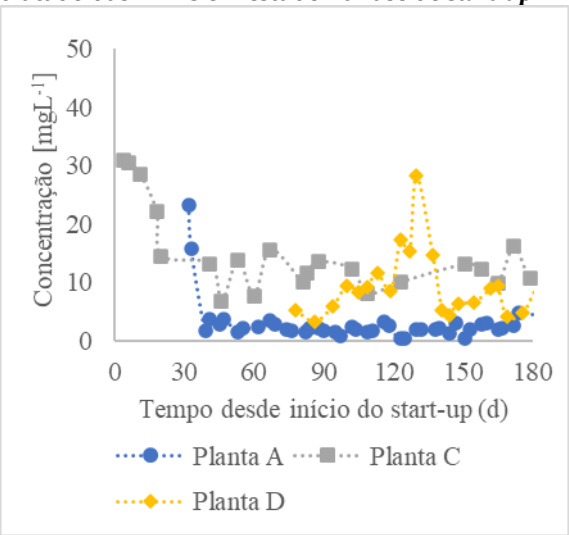


Figura 16 – Concentração de P_t no efluente tratado das ETEs em estudo na fase de *start-up*

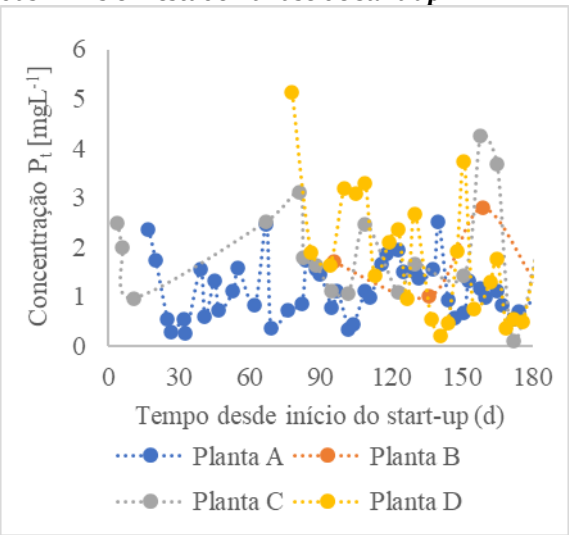


Tabela 5 – Qualidade do efluente tratado das ETEs no período de estabilização operacional na fase de *start-up*

Parâmetro	Unidade	Planta A	Planta B	Planta C	Planta D
Período de estabilização	d	30 - 180	390 – 480(*)	30 - 180	60 - 180
DQO	mgL^{-1}	16	55	49	25
DBO_5	mgL^{-1}	-	18	23	-
SST	mgL^{-1}	6.7	23	10	5.2
NH_4-N	mgL^{-1}	0.9	2.0	1.8	2.2
N_t	mgL^{-1}	-	6.9	12	9.3
P_t	mgL^{-1}	1.1	1.8	2.0	1.8

(*) A estabilização da qualidade do efluente tratado ocorreu após os 180 dias de *start-up*.

O período necessário para a estabilização da qualidade do efluente tratado nas ETEs em estudo apresenta-se na Figura 17. Todas as Plantas com exceção da Planta B enquadraram-se nos objetivos de qualidade do efluente

tratado indicados na Tabela 2 nos primeiros 30 a 60 dias de *start-up*. A utilização de um inóculo inicial com microbiota para remoção de nitrogênio e fósforo (como nas Plantas A e C) acelerou o atendimento da qualidade de efluente tratado. A Planta D, como utilizou em parte lodo anaeróbio, precisou de mais tempo para aclimatização e crescimento da microbiota. Este período foi ainda mais prolongado na Planta B, inoculada apenas com efluente bruto.

Figura 17 – Período necessário à estabilização da qualidade do efluente tratado nas ETEs em estudo

	Tempo desde início do start-up (d)															
Qualidade do efluente tratado	**30**	**60**	**90**	**120**	**150**	**180**	**210**	**240**	**270**	**300**	**330**	**360**	**390**	**420**	**450**	**480**
Planta A - Inóculo lodo ativado																
Planta B - Inóculo efluente bruto																
Planta C - Inóculo lodo granular aeróbio																
Planta D - Inóculo lodo UASB e biofilme																

Legenda:

- Objetivos de qualidade atingidos
- Objetivos de qualidade parcialmente atingidos
- Objetivos de qualidade não atingidos

DISCUSSÃO

Controle operacional em *start-up*

A estratégia de *start-up* de plantas Nereda® é ajustada às condições locais e depende de vários fatores sendo os mais relevantes os seguintes: i) a evolução da vazão afluente à planta entre o início e o fim da fase de *start-up*, ii) a quantidade e tipo de inóculo disponível, iii) objetivos de qualidade do efluente tratado, iv) número de reatores biológicos disponíveis, v) disponibilidade da linha de tratamento de lodos e de outras equipamentos relevantes ao controle do processo. Tipicamente após uma fase inicial de inoculação dos reatores biológicos, com uma concentração mínima de biomassa entre 1 e 3 $gL^{-}1$, inicia-se a fase *start-up* com o recebimento de efluente bruto na instalação.

As Plantas A, C e D consideraram o aumento gradual da vazão e carga afluentes aos reatores biológicos como parte fundamental do controle operacional. A relação A/M nestas instalações esteve dentro dos parâmetros de projeto garantindo que rapidamente a qualidade do efluente tratado fosse cumprida. Este controle da relação A/M também favorece o crescimento estável de biomassa, com o aumento da concentração de lodo e diminuição do IVL, que favorece o desenvolvimento de biomassa granular. A relação A/M da Planta B excedeu o valor de projeto durante a maioria da fase de *start-up*, em resultado da ausência de inóculo inicial com biomassa (apenas efluente bruto) e pela impossibilidade de controlar a vazão (e carga) afluente ao processo biológico. Dessa forma o controle operacional da Planta B foi mais complexo e a otimização da *performance* da ETE mais lenta.

Outro parâmetro de controle operacional relevante no decorrer da fase de *start-up* é a pressão de seleção. Este parâmetro relaciona-se com a diminuição gradual do tempo de sedimentação no ciclo, desde os 60 minutos iniciais até aos 15 a 20 minutos no período de estabilização. Estes mecanismos de seleção de lodo permitem manter o lodo com sedimentação mais rápida no reator biológico e descartar do processo o lodo mais fino acelerando o crescimento contínuo de lodo granular. De salientar que em todas as ETEs foi possível reduzir o tempo de sedimentação nos 180 dias de *start-up*, chegando-se a um valor mínimo de 25 minutos na Planta A e 18 minutos nas Plantas B e C. Na Planta D o mecanismo de seleção de lodo foi limitado pela indisponibilidade temporária da linha de tratamento de lodos, o que justifica um tempo de sedimentação de 50 minutos ao fim de 180 dias de *start-up*. Ainda assim, as características de sedimentabilidade do lodo biológico da Planta D evoluíram razoavelmente, com um IVL_5 próximo de 100 mlg^{-1} no final dos 180 dias de *start-up*.

O controle e otimização de parâmetros de processo como a relação A/M, concentração de lodo, tempo de sedimentação, tempo de ciclo, concentração de oxigênio dissolvido, entre outros, são o resultado de um monitoramento contínuo de resultados analíticos e *online* no decorrer da fase de *start-up*.

Efeito do tipo de inóculo no crescimento de lodo granular aeróbio

Os resultados das Plantas em estudo confirmam que a inoculação de reatores biológicos Nereda® é possível utilizando várias formas de inóculo desde efluente bruto (Planta B), passando por lodos ativados convencionais (Planta A), lodos granulares aeróbios (Planta C) e também através da combinação de diversas fontes de lodo como por exemplo lodos de reatores UASB juntamente com lodos em excesso de discos biológicos (Planta D).

As Plantas A e C, inoculadas com lodo ativado e LGA respetivamente, registaram um crescimento acentuado de lodo, com IVL reduzido, nos primeiros 60 dias de operação. Ficou também evidente a que a inoculação com LGA permitiu acelerar ainda mais o processo de crescimento, e posterior maturação, da manta granular como se observa pelas curvas de desenvolvimento da Planta C (Figura 8 e Figura 9).

A definição da concentração inicial de lodo na fase de *start-up* é um aspeto importante e os resultados da ETEs em estudo indicam que a concentração mínima recomendada situa-se entre 1 e 3 gL^{-1} por reator biológico (Figura 10). Esta concentração inicial de lodo depende do tipo de inóculo, da vazão afluente a tratamento e do tempo disponível para enquadrar o efluente tratado na qualidade exigida. Os resultados indicam também que mesmo uma concentração inicial mínima por reator tem um efeito muito positivo na aceleração do crescimento e maturação da manta granular aeróbia. A concentração de lodo no final da fase de *start-up* é a necessária para atender à carga afluente à ETE e à outorga de descarga de efluente tratado, não existindo uma concentração fixa comum para todas as ETEs.

A sedimentabilidade do inóculo inicial é também um fator importante para a rapidez no crescimento e maturação da manta granular aeróbia. Ficou demonstrado pelos resultados da Planta C que a inoculação com LGA permite manter uma sedimentabilidade muito boa na manta, com um IVL_5 próximo de 50 mlg^{-1} (Figura 9) desde o início do *start-up*. A sedimentabilidade foi apenas pontualmente reduzida (IVL_5>100 mgL^{-1}) após períodos de menor seleção de lodo e de menor eficiência de captura de sólidos na linha de tratamento de lodo. Nas restantes ETEs em estudo verificou-se que o IVL_5 foi reduzindo durante os 180 dias de *start-up* e que a tendência foi estabilizar entre 50 mlg^{-1} e 100 mlg^{-1}.

Em resumo, quanto menor for o período disponível para *start-up*, mais se justifica a opção por LGA como inóculo. E quanto maior for a vazão afluente inicial, e/ou mais restritivos forem os objetivos de qualidade do efluente tratado, maior deverá ser a concentração de LGA no início do *start-up*.

Qualidade do efluente tratado na fase de *start-up*

Na fase inicial de *start-up* a qualidade do efluente tratado em todas as ETEs focou-se na remoção de carbono, no entanto observou-se que o controle operacional implementado permitiu uma rápida otimização da qualidade do efluente tratado no que diz respeito à remoção de nitrogênio e fósforo, nas Plantas A, C e D, nos primeiros 30 dias de operação, com posterior estabilização até aos 180 dias de *start-up*. Na Planta B a estabilização com remoção completa de carbono, nitrogênio e fósforo foi atingida após o primeiro ano operacional. Este *start-up* foi bastante condicionado pela inoculação com apenas efluente bruto e com uma demanda de tratamento de aproximadamente 100% da vazão nominal afluente desde o início da operação.

No processo de estabilização da qualidade do efluente tratado verificou-se que independentemente dos objetivos de qualidade requeridos para cada instalação, todas as 4 ETEs em estudo atingiram uma remoção elevada de carbono e nutrientes, situando-se a qualidade média do efluente tratado no intervalo indicado na Tabela 6. Importante referir que a remoção de fósforo foi garantida sem qualquer dosagem de químicos nas 4 ETEs em estudo.

Tabela 6 – Intervalo de qualidade do efluente tratado operacional das ETEs em estudo no período de estabilização

Parâmetro	Unidade	Intervalo de qualidade do efluente tratado
DQO	mgL^{-1}	16 - 55
DBO_5	mgL^{-1}	2.0 - 23
SST	mgL^{-1}	5.2 - 23
NH_4-N	mgL^{-1}	0.9 - 2.2
N_t	mgL^{-1}	6.9 - 12
P_t	mgL^{-1}	1.1 - 2.0

Período de *start-up*

A fase de *start-up* das instalações em estudo teve um período fixo de 180 dias, desde a inoculação e recebimento de efluente até à estabilização do efluente tratado. No entanto, o resumo dos resultados operacionais das ETEs em estudo demonstra que o período otimizado para cumprimento dos objetivos de qualidade do efluente tratado foram cerca de 30 dias (Tabela 7).

Tabela 7 – Referências para períodos de *start-up* nas condições de operação das ETEs em estudo

Inóculo	% vazão nominal tratada em *start-up*	Objetivos de tratamento	Período mínimo até cumprir objetivos de qualidade	Potencial duração do *start-up* (*)
Lodo granular aeróbio (3 gL^{-1})	40%	Remoção de DBO_5, SST e NH4	30 dias	60 dias
Lodo ativado convencional (2 gL^{-1})	33%	Remoção de DBO_5, SST	30 dias	60 dias
Lodo UASB e biofilme (3 gL^{-1})	28%	Remoção de DBO_5, SST, N_t	90 dias	120 dias
Esgoto bruto	Aprox. 100%	Remoção de DBO_5, N_t e P_t	>365 dias	>365 dias

(*) Incluindo cerca de 30 dias adicionais para estabilização da qualidade do efluente.

Como demonstrado a aplicação de LGA como inóculo de reatores Nereda® acelera a fase de *start-up*, que pode ser tanto mais rápida quanto maior for a concentração inicial desse inóculo. Garantindo-se uma quantidade de inóculo elevada para equilibrar a relação A/M e atender aos requisitos da descarga de efluente tratado, o período de *start-up* pode ser reduzido a poucos dias. No entanto, o tipo e quantidade de inóculo disponível e/ou restrições no transporte de lodo entre ETEs são fatores tipicamente limitantes para possibilitar períodos de *start-up* muito curtos. Por esse motivo é mais comum planejar a fase de *start-up* com uma duração entre 60 e 120 dias dependendo de condições específicas locais.

CONCLUSÃO

- As estratégias de *start-up* de ETEs Nereda® são ajustadas a critérios e condições de operação especificas locais. Tendo como base os resultados analisados, a duração da fase de *start-up* tende a variar entre 30 e 120 dias.
- Podem aplicar-se vários tipos de inóculo em reatores Nereda®, desde lodo granular aeróbio, lodo ativado convencional, lodos de reatores UASB combinados com biofilme em excesso e até efluente bruto.
- Recomenda-se a inoculação de reatores Nereda® com lodo ativado convencional e/ou LGA.
- Inocular reatores Nereda® com LGA acelera a estabilização do processo biológico e o cumprimento dos objetivos de qualidade de efluente, reduzindo a duração da fase de *start-up*. Esta vantagem é conseguida mesmo com a aplicação de uma concentração mínima de LGA (1 a 3 gL^{-1} por reator).

- O *start-up* de reatores biológicos com efluente bruto como inóculo não é recomendado, embora seja possível. Nesse caso, os resultados revelam que o *start-up* pode ser mais complexo e prolongado.
- A fase de *start-up* deve ser operada em condições controladas, preferencialmente com aumento gradual da vazão afluente a tratamento e mantendo a relação A/M dentro dos parâmetros de projeto.
- A seleção de LGA é um processo contínuo no tempo, iniciado com a inoculação dos reatores Nereda® e com posteriores fases de crescimento e maturação que geralmente têm início durante o *start-up*, mas que se estendem por toda a vida operacional dos reatores Nereda®.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ALMEMARK, M.. *Report on simulations of scenarios for existing and emerging technologies*. *Part 3 Sequencing Batch Reactor (Nereda) compared to activated sludge treatment, INNOWATECH, EU Specific Targeted Research Project, Contract-No. 036882*, 2007.

2. BEUN, J.J., HENDRIKS, A., VAN LOOSDRECHT, M.C.M., MORGENROTH, E., WILDERER, P.A.,HEIJNEN, J.J.. *Aerobic granulation in a sequencing batch reactor. Water Res.33 (10*), p. 2283-2290, 1999.

3. CHEN, G., VAN LOOSDRECHT M.C.M., EKAMA, G.A., BRDJANOVIC, D. *Biological Wastewater Treatment: Principles, Modelling and Design, 2nd edition*. IWA Publishing, cap.11, p. 497-522, Jul. 2023. DOI:10.2166/9781789060362.

4. DE BRUIN, L.M.M., DE KREUK, M.K., VAN DER ROEST, H.F.R., UIJTERLINDE, C., VAN LOOSDRECHT, M.C.M. *Aerobic granular sludge technology: an alternative to activated sludge*?. *Water Sci. Technol. 49*, p. 1-7, 2004.

5. GIESEN, A., DE BRUIN, L.M.M., NIERMANS, R.P., VAN DER ROEST, H.F.. *Advancements in the application of aerobic granular biomass technology for sustainable treatment of wastewater. Water Pract. Technol. 8 (1)* p. 47-54, 2013.

6. ISANTA, E., SUAREZ-OJEDA, M.E., VAL DEL RÍO, A., MORALES, N., PEREZ, J., CARRERA, J.. *Long term operation of a granular sequencing batch reactor at pilot scale treating a low-strength wastewater. Chem. Eng. J.*, p 198-199, 163-170, 2012.

7. LIU, Y.; TAY, J. H.. *State of the art of biogranulation technology for wastewater treatment. Biotechnology Advances, v. 22, n. 7*, p. 533–563, 2004.

8. MORALES, N., FIGUEROA, M., FRA-VAZQUEZ, A., VAL DEL RÍO, A., CAMPOS, J.L., MOSQUERA CORRAL, A., MENDEZ, R.. *Operation of an aerobic granular pilot scale SBR plant to treat swine slurry. Process Biochem. 48 (8)*, p. 1216-1221, 2013.

9. MORGENROTH, E., SHERDEN, T., VAN LOOSDRECHT, M.C.M.,HEIJNEN, J.J., WILDERER, P.A.. *Aerobic granular sludge in a sequencing batch reactor*. *Water Res. 31(12),* p. 3191–3194, 1997.

10. PRONK, M., DE KREUK, M.K., DE BRUIN, B., KAMMINGA, P., KLEEREBEZEM, R., VAN LOOSDRECHT, M.C.M.. *Full scale performance of the aerobic granular sludge process for sewage treatment. Water Res.84*, p. 207-217, 2015.

11. TAY, J.H., LIU, Q.S., LIU, Y.. *Characteristics of aerobic granules grown on glucose and acetate in sequential aerobic sludge blanket reactors. Environ. Technol. 23 (8)*, p. 931-936, 2002.

12. VAN DIJK, E.J.H., HAAKSMAN, V.A., VAN LOOSDRECHT, M.C.M., PRONK, M.. *On the mechanisms for aerobic granulation - model based evaluation. Water Research 216*, 118365, 2022.

13. WEI, D., SI, W., ZHANG, Y., QIAO, Z., YAO, Z., ZHAO, W., ZHAO, J., CHEN, G., WEi, Q., DU, B.. *Aerobic granulation and nitrogen removal with the effluent of internal circulation reactor in start-up of a pilot-scale sequencing batch reactor. Bioprocess Biosyst. Eng. 35 (9)*, p. 1489-1496, 2012