



Estudo de Caso de Sistemas de Tratamento de Efluentes Domésticos com o Uso de Indicadores Ambientais

Carlos C. Silva
Cecília M. V. B. Almeida
Sílvia H. Bonilla



1st
INTERNATIONAL WORKSHOP
ADVANCES IN CLEANER PRODUCTION

IV SEMANA PAULISTA DE P+L
CONFERÊNCIA PAULISTA DE P+L



Estudo de Caso de Sistemas de Tratamento de Efluentes Domésticos com o Uso de Indicadores Ambientais

Tópicos abordados nesta apresentação

Descrição do sistema de Biodigestão

Descrição do sistema de Lodo Ativado

Comparação entre os sistemas utilizando a contabilidade energética, e seus indicadores

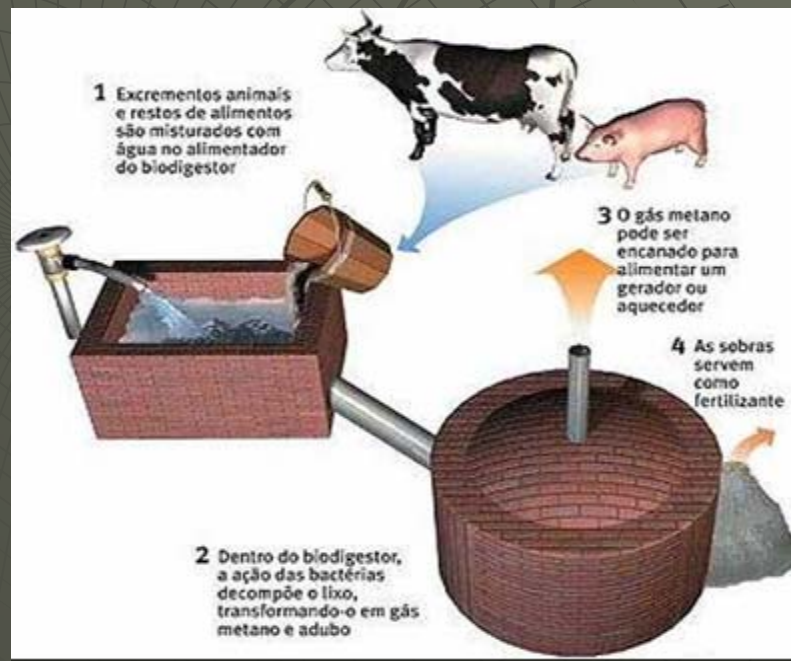


Estudo de Caso de Sistemas de Tratamento de Efluentes Domésticos com o Uso de Indicadores Ambientais

Descrição do sistema de Biodigestão

Digestão Anaeróbica: Processo fermentativo, sem a presença de oxigênio, em que a matéria orgânica é degradada a compostos mais simples, formando, basicamente, metano e gás carbônico.

Biodigestor Chinês: Construído em alvenaria, modelo de peça única. Desenvolvido na China, onde as propriedades eram pequenas, por isso foi desenvolvido esse modelo que é enterrado, para ocupar menos espaços.

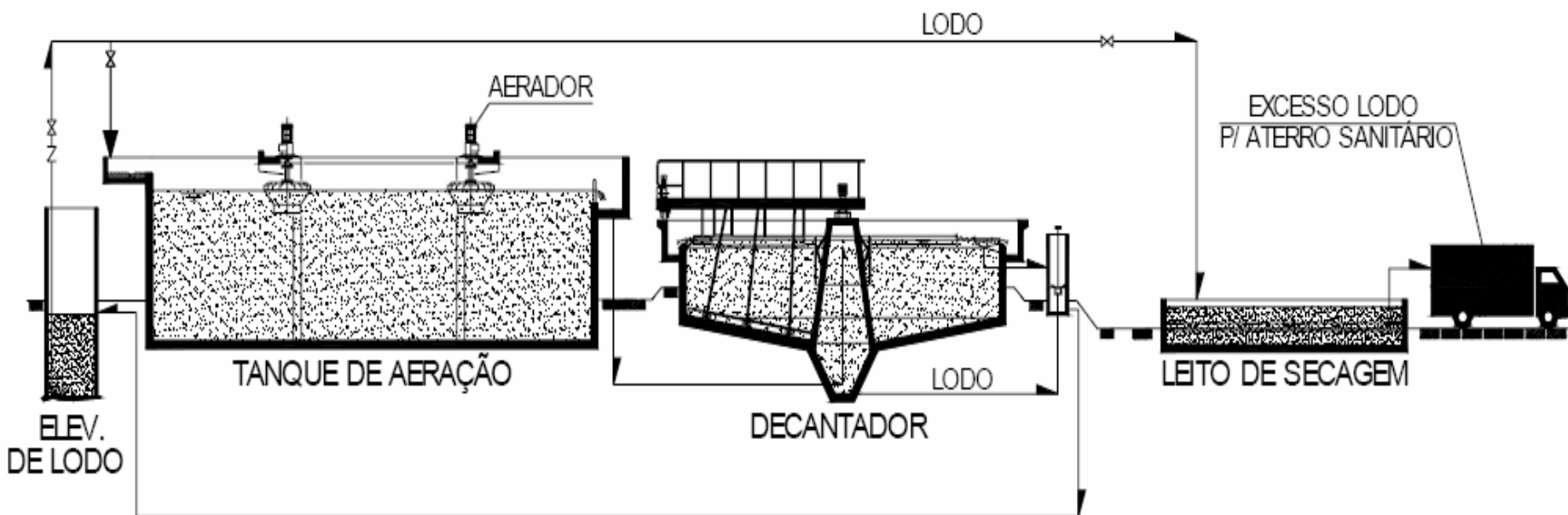


Estudo de Caso de Sistemas de Tratamento de Efluentes Domésticos com o Uso de Indicadores Ambientais

Descrição do sistema de lodo ativado

SISTEMA DE LODO ATIVADO CONVENCIONAL

- Possui tanques de aeração, decantação e leito de secagem (adensador);
- O tempo de detenção hidráulico é bem baixo, da ordem de 6 a 8 horas e a idade do lodo em torno de 4 a 10 dia;
- Como o lodo retirado possui grande quantidade de colônias de bactérias aeróbicas, há necessidade retorno de parte do lodo (13%) ao tanque e aeração;





Estudo de Caso de Sistemas de Tratamento de Efluentes Domésticos com o Uso de Indicadores Ambientais

Estudo de Caso

O volume anual de efluente tratado no Biodigestor é de 30.275 m³/ano. O efluente é enviado ao tanque de biodigestão, entrando pela parte inferior, o que causa a agitação do lodo presente. O efluente sobrenadante é enviado a um filtro biológico para retirada do lodo residual e, então, despejado em um corpo de água. O lodo é utilizado como fertilizante em hortas comunitárias.

O volume anual de efluente tratado é de 504.576 m³/ano. O efluente é enviado a 4 tanques de aeração abertos, acondicionado em 4 tanques de decantação, onde fica em repouso para que o lodo se deposite em seu fundo. O efluente tratado é liberado no rio Guaratinguetá, e o lodo é enviado a dois tanques adensadores, que acondicionarão este lodo até o embarque ao seu descarte final (aterro sanitário).



Estudo de Caso de Sistemas de Tratamento de Efluentes Domésticos com o Uso de Indicadores Ambientais

EMERGIA

ODUM (1996) desenvolveu uma metodologia capaz de avaliar o uso de recursos por um determinado sistema, sejam eles naturais ou antropogênicos.

A esta metodologia, Odum atribuiu o nome de eMergia (grafada com "M"), que significa Memória da energia solar necessária para a aquisição de um bem ou serviço.

A eMergia utiliza uma álgebra própria com a qual é possível calcular indicadores a partir das relações entre as fontes de recursos (renováveis (R), não renováveis (N), renováveis para diluição de poluentes (R_2) ou fontes pagas (F)), identificadas no diagrama de energia que compõem o sistema estudado. A unidade da emergia é o joule de emergia solar, que permite contabilizar os fluxos provenientes do meio ambiente e da economia com uma base comum, sej (*solar emergy joules*).



Estudo de Caso de Sistemas de Tratamento de Efluentes Domésticos com o Uso de Indicadores Ambientais

Para avaliar diferentes recursos e processos com uma única métrica, ODUM (1996) criou o conceito de transformidade solar, que é a quantidade de energia solar exigida para obter uma unidade de insumo para o processo.

Uma vez determinada a transformidade de um produto, torna-se possível calcular a energia solar direta e indireta necessária para sua obtenção.

A contabilidade considera tanto os recursos utilizados para a implantação dos processos como aqueles empregados durante sua operação.

Existe uma rede mundial de pesquisadores que calculam as transformidades, sejam estas naturais ou antrópicas. Esses resultados são apresentados em livros e artigos, que são base para novos estudos.



Estudo de Caso de Sistemas de Tratamento de Efluentes Domésticos com o Uso de Indicadores Ambientais

A análise emergética se inicia com a construção de diagramas de energia e em seguida a contabilidade. A observação dos diagramas auxilia na identificação dos limites estabelecidos para os sistemas estudados, assim como na identificação de seus principais componentes e das interações entre eles, a contabilidade, permite uma visão sintética dos custos.

Nos diagramas são identificados todos os fluxos de material, energia e serviços necessários para a operação dos sistemas, na álgebra contábil pode-se visualizar a contribuição de cada um desses fluxos. Neste estudo de caso, foram coletados dados de um sistema de Biodigestão instalado na Comunidade Independência em Petrópolis, Rio de Janeiro e uma Estação de Tratamento de Esgoto na Cidade de Guaratinguetá, São Paulo.

SISTEMA DE BIODIGESTÃO

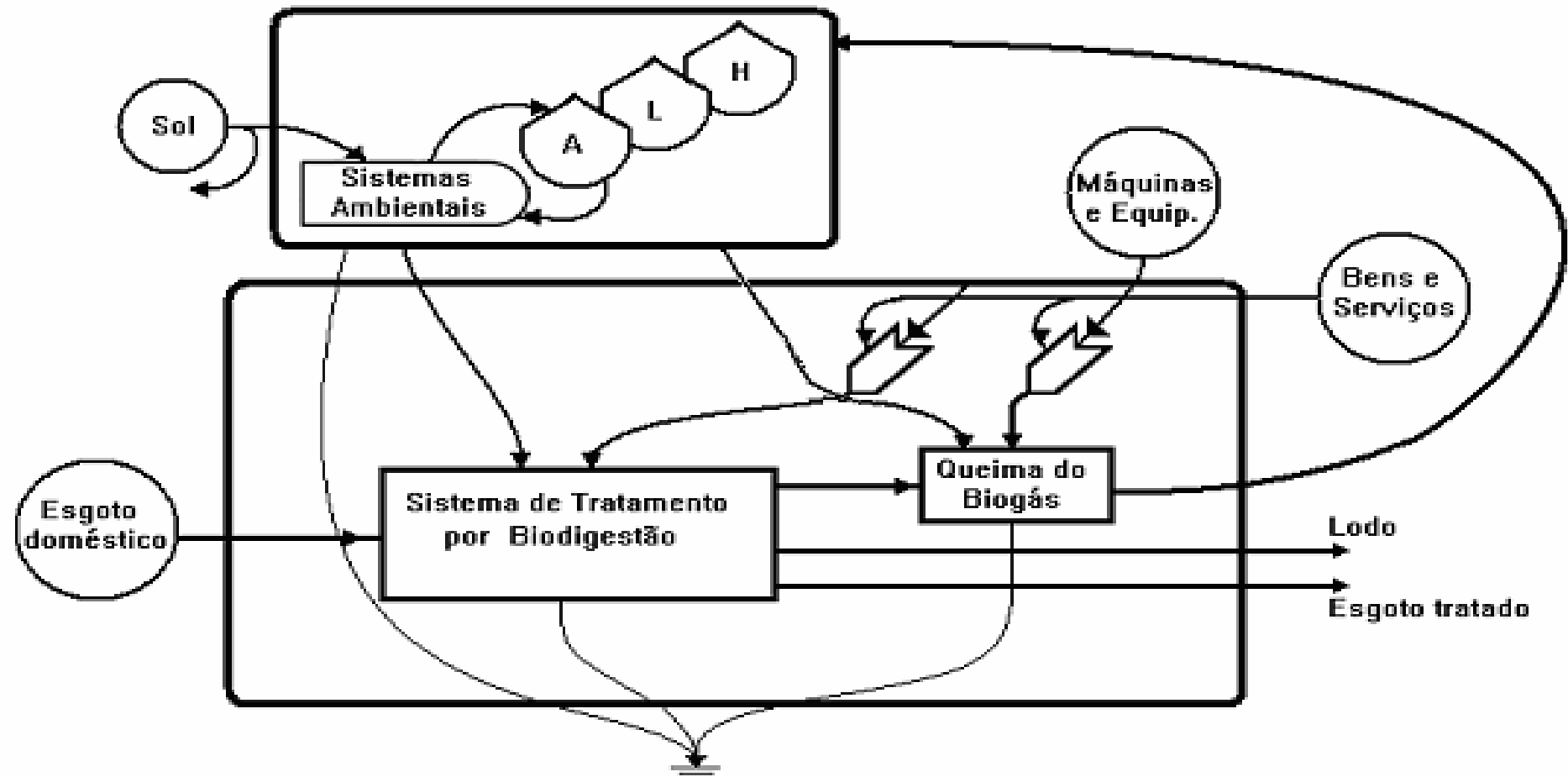


Diagrama de Energia da Estação de Tratamento de Efluente do Biodigestor. (A) Atmosfera, (L) Litosfera e (H) Hidrosfera.



Estudo de Caso de Sistemas de Tratamento de Efluentes Domésticos com o Uso de Indicadores Ambientais

Avaliação Contábil da Energia do Tratamento de Efluente por Biodigestão

Nota	Descrição	Unidade	Classe	Valor	Energia	Energia	% /(sej/sej)
					/(sej/un)	/(sej/ano)	
Fase de Implantação							
1	Mão-de-obra	J	F	$3,72 \times 10^7$	$4,30 \times 10^6$	$1,60 \times 10^{14}$	<1%
2	Concreto	g	F	$2,10 \times 10^6$	$1,54 \times 10^9$	$3,23 \times 10^{15}$	13%
3	Tijolo	g	F	$1,90 \times 10^5$	$2,52 \times 10^9$	$4,79 \times 10^{14}$	2%
4	Plástico	g	F	$2,48 \times 10^2$	$5,87 \times 10^9$	$1,46 \times 10^{12}$	<1%
5	Uso do solo	J	N	$4,29 \times 10^9$	$2,21 \times 10^4$	$9,48 \times 10^{13}$	<1%
Fase de Operação							
6	Mão-de-obra	J	F	$4,58 \times 10^9$	$4,30 \times 10^6$	$1,97 \times 10^{16}$	82%
7	Aço	g	F	$3,80 \times 10^4$	$2,77 \times 10^9$	$1,05 \times 10^{14}$	<1%
8	Sol	J	R	$8,69 \times 10^9$	1,00	$8,69 \times 10^8$	
9	Calor geotérmico	J	R	$1,08 \times 10^8$	$2,55 \times 10^4$	$2,75 \times 10^{12}$	<1%
10	O ₂ na queima de CH ₄	g	R	$7,30 \times 10^6$	$5,16 \times 10^7$	$3,77 \times 10^{14}$	2%
11	Energia Cinética do vento	J	R ₂	$1,09 \times 10^8$	$1,50 \times 10^3$	$1,64 \times 10^{11}$	<1%
Energia Total com os serviços do ambiente						$2,41 \cdot 10^{16}$	100%
TRANSFORMIDADE		Transformidade = $\frac{\text{eMergia total}}{\text{unidade}}$				$\frac{2,41 \cdot 10^{16}}{30275\text{m}^3}$	$7,96 \cdot 10^{13}$

SISTEMA DE LODO ATIVADO

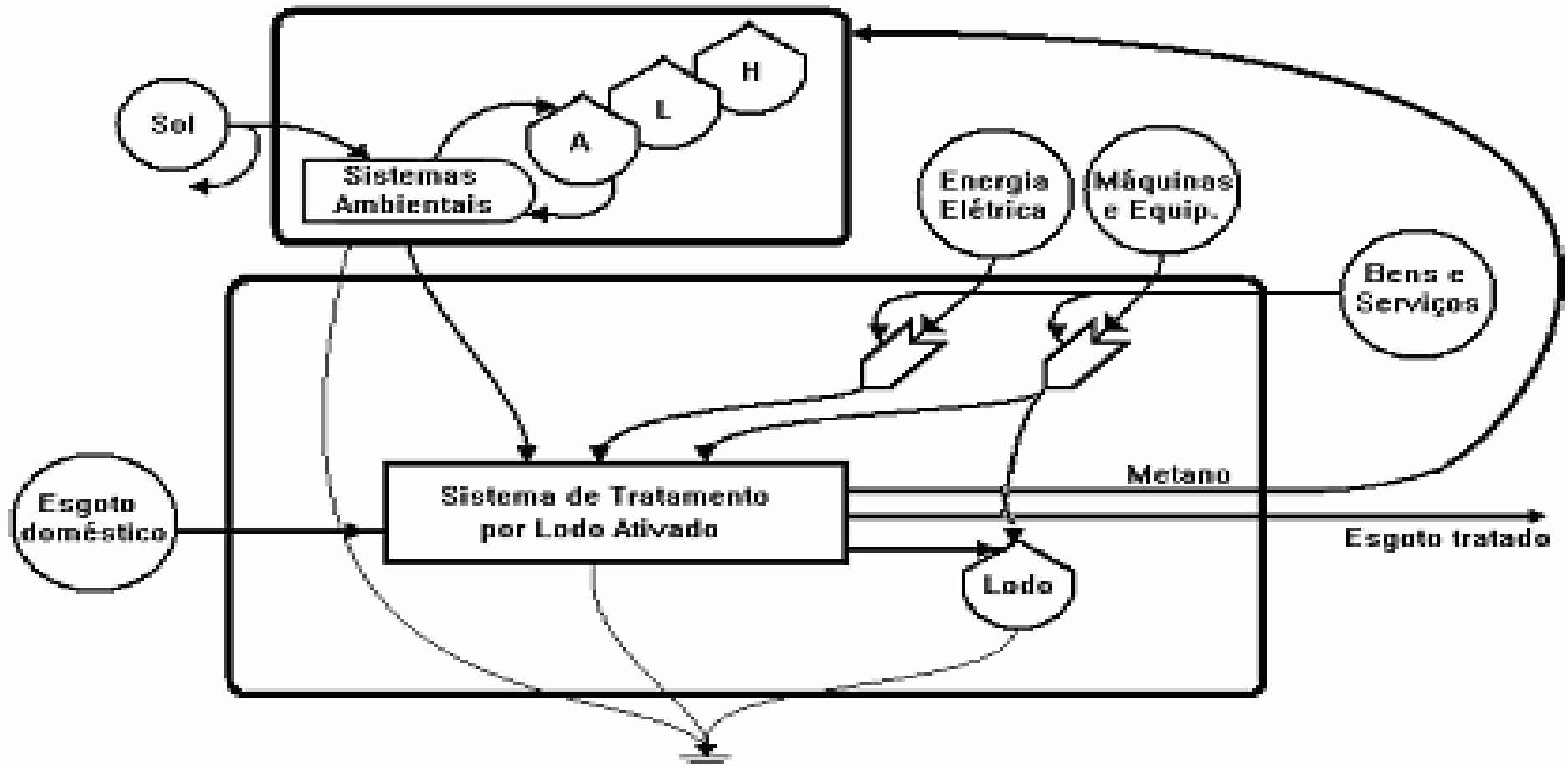


Diagrama de Energia da Estação de Tratamento de Efluente de Lodo Ativado. (A) Atmosfera, (L) Litosfera e (H) Hidrosfera.



Estudo de Caso de Sistemas de Tratamento de Efluentes Domésticos com o Uso de Indicadores Ambientais

Avaliação Contábil da Energia do Tratamento de Efluente por Lodo Ativado

Nota	Descrição	Unidade	Classe	Valor /(un/ano)	Energia por unidade /(sej/un)	Energia /(sej/ano)	%/(sej/sej)	
Fase de Implantação								
1	Concreto	g	F	$3,56 \times 10^7$	$1,54 \times 10^9$	$5,48 \times 10^{16}$	8%	
2	Motores e Bombas	g	F	$5,40 \times 10^4$	$4,10 \times 10^9$	$2,21 \times 10^{14}$	<1%	
3	Mão-de-obra	J	F	$1,43 \times 10^9$	$4,30 \times 10^6$	$6,15 \times 10^{14}$	<1%	
4	Aço	g	F	$3,18 \times 10^6$	$2,77 \times 10^9$	$8,81 \times 10^{15}$	1%	
5	Cobre	g	F	$2,77 \times 10^3$	$2,00 \times 10^9$	$5,54 \times 10^{12}$	<1%	
6	Massa S10 - aço	g	F	$3,21 \times 10^5$	$2,77 \times 10^9$	$8,90 \times 10^{14}$	<1%	
7	Solo ocupado	J	N	$1,05 \times 10^{11}$	$2,21 \times 10^4$	$2,32 \times 10^{15}$	<1%	
Fase de Operação								
8	Diesel p/ transporte do lodo	J	F	$3,50 \times 10^{11}$	$6,60 \times 10^4$	$2,31 \times 10^{16}$	4%	
9	Energia Elétrica	J	F	$8,07 \times 10^{11}$	$1,65 \times 10^5$	$1,33 \times 10^{17}$	20%	
10	Mão-de-obra	J	F	$1,92 \times 10^{10}$	$4,30 \times 10^6$	$8,26 \times 10^{16}$	13%	
11	Aterro Sanitário	g	N	$1,23 \times 10^9$	$3,79 \times 10^7$	$4,66 \times 10^{16}$	7%	
12	Sol **	J	R	$7,03 \times 10^9$	1,00	$7,03 \times 10^9$		
13	Evaporação **	g	R	$2,02 \times 10^8$	$1,45 \times 10^5$	$2,93 \times 10^{13}$		
14	Precipitação	g	R	$6,18 \times 10^8$	$1,57 \times 10^5$	$9,70 \times 10^{13}$	<1%	
15	O ₂ para queima completa do diesel	g	R	$2,72 \times 10^7$	$5,16 \times 10^7$	$1,40 \times 10^{15}$	<1%	
16	O ₂ na aeração	g	R	$2,40 \times 10^9$	$5,16 \times 10^7$	$1,24 \times 10^{17}$	19%	
17	Energia cinética do vento para diluição do CO ₂	g	R ₂	$5,69 \times 10^{11}$	$1,50 \times 10^3$	$8,35 \times 10^{14}$	<1%	
18	Energia Cinética do vento para diluição de CH ₄	J	R ₂	$1,18 \times 10^{14}$	$1,50 \times 10^3$	$1,77 \times 10^{17}$	27%	
Energia Total com os serviços do ambiente						$6,56 \times 10^{17}$		
TRANSFORMIDADE						Transformidade = $\frac{\text{eMergia total}}{\text{unidade}}$	$\frac{6,56 \cdot 10^{17}}{504576\text{m}^3}$	$1,30 \cdot 10^{12}$



Estudo de Caso de Sistemas de Tratamento de Efluentes Domésticos com o Uso de Indicadores Ambientais

Indicadores Ambientais Emergéticos

Descrição	Indicador	Equação	
Rendimento emergético é a relação entre a energia total (Y) e a energia dos insumos (F). É um indicador da energia líquida que o sistema gera, pois fornece a habilidade do processo para explorar recursos locais provenientes da natureza, sejam renováveis ou não. O valor mínimo é a unidade, que ocorre quando a contribuição da natureza é nula (R+N = 0). A diferença do valor unitário mede a contribuição do meio ambiente.	EYR	$Y/(F+R_2)$ onde $Y = R + R_2 + N + F$	(1)
Investimento emergético: mede o investimento da sociedade no sistema em relação à contribuição da natureza; avalia se o processo usa adequadamente os recursos locais. Um índice baixo indica que o ambiente provê mais recursos para o processo que a economia (materiais e serviços). Pode medir o desenvolvimento econômico. ODUM (1996) menciona que, em países desenvolvidos, o EIR tende a ser 7 ou maior.	EIR	$(F+R_2)/(N+R)$	(2)
Índice de Carga Ambiental: Mede a proporção de recursos não renováveis em relação aos renováveis para um dado processo produtivo; é um indicador da tensão que a atividade produtiva analisada produz no ecossistema.	ELR	$(N + F+R_2) / R$	(3)
Índice de Sustentabilidade: Mede a taxa de sustentabilidade. Valores maiores indicam sustentabilidade por períodos de tempo maior. Um sistema para ser considerado sustentável por longo prazo deve ter uma baixa carga ambiental e alto rendimento emergético.	ESI	EYR/EIR	(4)
Índice de não sustentabilidade: Mede a não sustentabilidade, valores menores são desejáveis para o sistema. Valores de transformidade e de carga ambiental maiores indicam baixa eficiência e alto estresse ambiental. Neste trabalho Tr é a energia por volume de efluente tratado.	NSI	$Tr \times ELR$ Onde $Tr=Y/m^3$	(5)
Percentual de recursos renováveis: Indica a porcentagem de energia que é derivada de fontes renováveis. Os sistemas com alto valor deste índice são mais sustentáveis.	% R	$100^* (R / Y)$	(6)



Estudo de Caso de Sistemas de Tratamento de Efluentes Domésticos com o Uso de Indicadores Ambientais

Resultado dos Indicadores Emergéticos

	Lodo Ativado	Biodigestor
Índices Emergéticos		
Rendimento Emergético (EYR)	1,36	1,02
Investimento Emergético (EIR)	2,77	49,92
Carga ambiental (ELR)	4,24	62,64
Índice de sustentabilidade (ESI)	0,32	0,02
Índice de não sustentabilidade (NSI / (sej/m ³))	6x10 ¹²	430x10 ¹²
Percentual de Energia Renovável (%R)	19,09	1,57

De acordo com o índice EYR, pode-se verificar que o sistema de Lodo Ativado apresenta melhor rendimento emergético que o de Biodigestão, pois utiliza uma proporção maior de recursos locais renováveis e não renováveis (R+N) em relação ao investimento econômico.



Estudo de Caso de Sistemas de Tratamento de Efluentes Domésticos com o Uso de Indicadores Ambientais

Resultado dos Indicadores Emergéticos

	Lodo Ativado	Biodigestor
Índices Emergéticos		
Rendimento Emergético (EYR)	1,36	1,02
Investimento Emergético (EIR)	2,77	49,92
Carga ambiental (ELR)	4,24	62,64
Índice de sustentabilidade (ESI)	0,32	0,02
Índice de não sustentabilidade (NSI / (sej/m ³))	6x10 ¹²	430x10 ¹²
Percentual de Energia Renovável (%R)	19,09	1,57

O índice de EIR indica que o sistema de Lodo Ativado é mais competitivo que o de Biodigestão. O investimento de recursos da economia em relação aos recursos naturais utilizados no Lodo Ativado é menor.



Estudo de Caso de Sistemas de Tratamento de Efluentes Domésticos com o Uso de Indicadores Ambientais

Resultado dos Indicadores Emergéticos

	Lodo Ativado	Biodigestor
Índices Emergéticos		
Rendimento Emergético (EYR)	1,36	1,02
Investimento Emergético (EIR)	2,77	49,92
Carga ambiental (ELR)	4,24	62,64
Índice de sustentabilidade (ESI)	0,32	0,02
Índice de não sustentabilidade (NSI / (sej/m ³))	6x10 ¹²	430x10 ¹²
Percentual de Energia Renovável (%R)	19,09	1,57

O índice de carga ambiental ELR avalia o estresse ambiental, quanto menor o valor deste indicador (BROWN e ULGIATI, 2002), menor o estresse imposto ao ambiente. Verifica-se que o resultado obtido pelo sistema de Biodigestão é 15 vezes maior.



Estudo de Caso de Sistemas de Tratamento de Efluentes Domésticos com o Uso de Indicadores Ambientais

Resultado dos Indicadores Emergéticos

	Lodo Ativado	Biodigestor
Índices Emergéticos		
Rendimento Emergético (EYR)	1,36	1,02
Investimento Emergético (EIR)	2,77	49,92
Carga ambiental (ELR)	4,24	62,64
Índice de sustentabilidade (ESI)	0,32	0,02
Índice de não sustentabilidade (NSI / (sej/m ³))	6x10 ¹²	430x10 ¹²
Percentual de Energia Renovável (%R)	19,09	1,57

O índice de sustentabilidade ESI, apresenta valores pequenos para ambos os sistemas, mas ao compararmos esses valores, encontramos o índice do Lodo Ativado é aproximadamente 28 vezes maior do que o valor do Biodigestor, indicando ser o sistema de Lodo Ativado sustentável por maior tempo.



Estudo de Caso de Sistemas de Tratamento de Efluentes Domésticos com o Uso de Indicadores Ambientais

Resultado dos Indicadores Emergéticos

	Lodo Ativado	Biodigestor
Índices Emergéticos		
Rendimento Emergético (EYR)	1,36	1,02
Investimento Emergético (EIR)	2,77	49,92
Carga ambiental (ELR)	4,24	62,64
Índice de sustentabilidade (ESI)	0,32	0,02
Índice de não sustentabilidade (NSI / (sej/m ³))	6x10 ¹²	430x10 ¹²
Percentual de Energia Renovável (%R)	19,09	1,57

O índice de não sustentabilidade NSI, apresenta valores maiores, para sistemas menos sustentáveis, o estresse ambiental causado pelo Biodigestor é 72 vezes maior.



Estudo de Caso de Sistemas de Tratamento de Efluentes Domésticos com o Uso de Indicadores Ambientais

Resultado dos Indicadores Emergéticos

	Lodo Ativado	Biodigestor
Índices Emergéticos		
Rendimento Emergético (EYR)	1,36	1,02
Investimento Emergético (EIR)	2,77	49,92
Carga ambiental (ELR)	4,24	62,64
Índice de sustentabilidade (ESI)	0,32	0,02
Índice de não sustentabilidade (NSI / (sej/m ³))	6x10 ¹²	430x10 ¹²
Percentual de Energia Renovável (%R)	19,09	1,57

O índice de energia renovável %R indica o percentual de energia renovável envolvida no processo. De acordo com o protocolo de Kyoto, que estabelece que até 2010 o uso de fontes de energia renovável deve alcançar 10% (BRAGA, 2002), verifica-se que apenas o sistema de Lodo Ativado alcança este índice.



Estudo de Caso de Sistemas de Tratamento de Efluentes Domésticos com o Uso de Indicadores Ambientais

Conclusão

A comparação dos valores dos indicadores energéticos para os dois sistemas, indica que o sistema de tratamento por Lodo Ativado é menos danoso para o ambiente do que o tratamento por biodigestão, pois este sistema utiliza principalmente recursos provenientes da economia. A distribuição dos fluxos no sistema de Lodo Ativado, entre R , R_2 , N e F mostra um melhor aproveitamento dos recursos locais e gratuitos por este sistema, o que se reflete nos valores dos indicadores calculados.



Estudo de Caso de Sistemas de Tratamento de Efluentes Domésticos com o Uso de Indicadores Ambientais

Obrigado