



REPÚBLICA FEDERATIVA DO BRASIL
MINISTÉRIO DA ECONOMIA
INSTITUTO NACIONAL DA PROPRIEDADE INDUSTRIAL

CARTA PATENTE Nº PI 1107321-7

O INSTITUTO NACIONAL DA PROPRIEDADE INDUSTRIAL concede a presente PATENTE DE INVENÇÃO, que outorga ao seu titular a propriedade da invenção caracterizada neste título, em todo o território nacional, garantindo os direitos dela decorrentes, previstos na legislação em vigor.

(21) Número do Depósito: PI 1107321-7

(22) Data do Depósito: 26/12/2011

(43) Data da Publicação Nacional: 28/11/2017

(51) Classificação Internacional: G01N 25/22; G01N 33/483; C10L 5/46.

(52) Classificação CPC: G01N 25/22; G01N 33/4833; C10L 5/46.

(54) Título: MÉTODO IMPLEMENTADO POR COMPUTADOR PARA AVALIAÇÃO DE LODOS DE ESGOTO COMO BIOMASSA PARA GERAR ENERGIA EM PROCESSOS DE COMBUSTÃO

(73) Titular: UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARA, Instituição de Ensino e Pesquisa. CGC/CPF: 34621748000123. Endereço: Av. Augusto Correa, 1, Guamá, Belém, PA, BRASIL(BR), 66075-900; UNIVERSIDADE DO ESTADO DO PARÁ - UEPA, Instituição de Ensino e Pesquisa. CGC/CPF: 34860833000144. Endereço: Rua do Una, 156, Telégrafo, Belém, PA, BRASIL(BR), 66050-540

(72) Inventor: JOSÉ ALMIR RODRIGUES PEREIRA; YVELYNE BIANCA IUNES SANTOS.

Prazo de Validade: 20 (vinte) anos contados a partir de 26/12/2011, observadas as condições legais

Expedida em: 31/03/2020

Assinado digitalmente por:

Liane Elizabeth Caldeira Lage

Diretora de Patentes, Programas de Computador e Topografias de Circuitos Integrados

MÉTODO IMPLEMENTADO POR COMPUTADOR PARA AVALIAÇÃO DE LODOS DE ESGOTO COMO BIOMASSA PARA GERAR ENERGIA EM PROCESSOS DE COMBUSTÃO

[001] A presente patente de invenção refere-se a um método implementado por computador para avaliação de lodos de esgoto como biomassa para gerar energia em processos de combustão. O método implementado classifica o potencial energético do lodo em alto, médio, baixo ou nenhum, para gerar energia útil em processos de combustão e informa se esta aplicação pode ser feita de forma segura, sem causar impactos ambientais adversos, danos ou riscos à saúde pública.

[002] A implementação do método, faz uso de regras de lógica para representar o conhecimento. As regras são inseridas no sistema por interface de aquisição e armazenadas automaticamente em banco de dados. Após informações fornecidas pelo usuário, através de interface para usuários, o sistema realiza os testes e encadeamentos lógicos das regras para obtenção das conclusões e explicações resultantes.

[003] Para cada tipo de lodo, e em função de seu destino ou uso, são selecionadas avaliações típicas. Essas avaliações ou são exigidas pelos órgãos de controle, pelas partes interessadas da sociedade, ou demandadas pela própria empresa geradora dos lodos em função de sua responsabilidade ambiental e social corporativa.

[004] Para os gestores da área de saneamento e meio ambiente, avaliarem se o lodo pode ou não gerar energia útil em processos de combustão de forma segura e ambientalmente correta, primeiramente uma amostra do material deve ser analisada e caracterizada quimicamente em laboratório, em seguida passar por ensaios de toxicidade e de queima para verificar possíveis emissões atmosféricas nocivas à saúde e ao meio ambiente, de acordo com normas específicas.

[005] De posse dos resultados laboratoriais e ensaios, cabe ao gestor a decisão sobre o uso do material para a finalidade prevista, utilizando sua experiência, consultando especialistas no assunto em questão e/ou pesquisando em livros, normas, trabalhos publicados, etc, o conhecimento técnico necessário para tomar a decisão certa e segura, o que demanda disponibilidade de tempo e faz com que, muitas vezes, o lodo deixe de ser usado de forma útil para ser desperdiçado com destinação final emergencial, sem utilidade e ambientalmente inadequada, como por exemplo, em aterros sanitários e incineradores.

[006] O método implementado por computador para avaliar o lodo de esgoto como biomassa para gerar energia em processos de combustão consiste em usar os resultados laboratoriais da análise química elementar, toxicidade e do teste de emissões atmosféricas da amostra do lodo de forma sistemática seguindo as seguintes etapas:

- 1) Cálculo do Poder Calorífico Inferior do Lodo, através da fórmula de D. I. Mendeleev para combustíveis sólidos e líquidos, que depende do teor dos componentes químicos elementares do material que influenciam no seu poder combustível, conforme segue:

$$\text{PCI} = 33900 \text{ C} + 103000\text{H} - 10900[\text{O} - \text{S}] - 25\text{W}$$

Equação 1

onde,

PCI= poder calorífico inferior (kJ/kg combustível)

C= teor de carbono (kg C/kg combustível) em base seca

H= teor de hidrogênio (kg H/kg combustível) em base seca

O= teor de oxigênio (kg O/kg combustível) em base seca

S= teor de enxofre (kg S/kg combustível) em base seca

W= teor de umidade (kg de água/kg combustível) em base seca

Considera-se o Poder Calorífico Inferior do lodo no processo de avaliação do seu potencial energético em detrimento do Poder Calorífico Superior, em função de que aquele, normalmente, é o que mais se usa na maioria dos processos industriais, uma vez que, os gases de combustão são liberados a temperaturas altas onde a água neles contida se encontra na fase gasosa. Além do fato de que na maioria da literatura, trabalhos de teses, dissertações, artigos técnicos e normas vigentes predominam informações tomando-se como parâmetro o Poder Calorífico Inferior.

- 2) Enquadramento do Poder Calorífico Inferior calculado dentro dos intervalos de Classe criados:

- Lodo Classe I: apresenta potencial alto para gerar energia em processos de combustão;
- Lodo Classe II: apresenta potencial médio para gerar energia em processos de combustão;
- Lodo Classe III: apresenta potencial baixo para gerar energia em processos de combustão;
- Lodo Classe IV: não apresenta potencial para gerar energia em processos de combustão.

[007] Para a criação dos intervalos numéricos, que associam o valor do Poder Calorífico Inferior a cada Classe, foi feita extensa pesquisa em Normas técnicas e materiais científicos publicados tais como, livros, artigos técnicos, teses e dissertações, a nível nacional e internacional, a fim de reunir informações que fornecessem parâmetros para definir o potencial energético do lodo de esgoto. A partir dessas pesquisas chegou-se às seguintes informações fundamentais que embasam os parâmetros utilizados no método implementado por computador:

- O lodo que “possui PC entre 4 e 10 MJ/kg é necessário queimá-lo junto a outros combustíveis mais energéticos, tais como lenha, gás, óleo, etc.”
- A Resolução 71/2009 (CEMA, 2009), do Conselho Estadual do Meio Ambiente do Estado do Paraná dispõem que serão aceitos para a avaliação as solicitações para co-processamento resíduos sólidos gerados no Estado do Paraná ou em outros Estados da federação com poder calorífico superior (PCS) acima de 1.000 kcal/kg (4,186 MJ/Kg) , quando destinados à mistura com resíduos de maior poder calorífico ou para pontos de alimentação específicos que necessitem entradas com menor poder calorífico. O que demonstra que um resíduo com poder calorífico abaixo de 4 MJ/kg não é aceito nem para co-processamento misturado com resíduos de maior poder calorífico.
- O lodo do tratamento de esgoto “pode manter-se em combustão se possuir Poder Calorífico Inferior (PCI) maior que 2500 kcal/kg (10,467 MJ/kg)”.
- As normas e procedimentos para utilização de resíduos em fornos de produção de clínquer, considera a utilização desta tecnologia para resíduos que atendam ao seguinte critério para reaproveitamento de energia: “...seu poder calorífico inferior na base seca deverá ser superior a 2.775kcal/kg...(11,618 MJ/kg)” (SMA/CETESB – Procedimento para utilização de resíduos em fornos de produção de clínquer. Documentos Câmaras Ambientais. São Paulo, Janeiro/1998). O que ratifica a necessidade do lodo ter que apresentar poder calorífico inferior acima de 10,467 MJ/kg para manter-se em combustão e ser utilizado como combustível principal em processos de queima.
- Para definir o parâmetro de alto potencial energético (Classe I) para o lodo de esgoto, foi pesquisado o Poder Calorífico Inferior que o lodo deve ter a fim de ser

utilizado como biomassa para gerar energia, em cada uma das suas possíveis aplicações úteis. Esse Poder Calorífico Inferior que o lodo deve ter, foi estabelecido baseado na idéia de que o lodo deve possuir, pelo menos, o PCI correspondente ao menor dos Poderes Caloríficos Inferiores dentre àqueles dos biocombustíveis tradicionalmente utilizados em cada uma das aplicações possíveis para que seja viável seu uso do ponto de vista energético. Assim, foi criada uma tabela com as informações resultantes da pesquisa, conforme Tabela 1 a seguir:

Coluna 1	Coluna 2	Coluna 3	Coluna 4
Aplicações possíveis para o lodo de esgoto em processos de combustão	Biocombustíveis tradicionalmente utilizados em cada aplicação apresentada na coluna 1	Poder Calorífico Inferior (em base seca) de cada Biocombustível apresentado na coluna 2	Poder Calorífico Inferior (em base seca) que o lodo deve ter para ser utilizado em cada aplicação.
Exemplo:			
Aplicação 1	Biocombustível 1 utilizado na aplicação1	PCI do Biocombustível 1 utilizado na aplicação1	PCI \geq Menor valor dentre os PCIs apresentados na coluna 3
	Biocombustível 2 utilizado na aplicação1	PCI do Biocombustível 2 utilizado na aplicação1	
	Etc.	Etc.	

Tabela 1

Após análise dos valores dos PCIs encontrados na coluna 4 da Tabela 1, identificou-se que a aplicação para lodos de esgoto em processos de combustão que exige maior potencial energético é em fornos de cimento. Assim, adota-se o poder calorífico inferior do lodo necessário a essa utilização como parâmetro para definir o lodo de esgoto com alto potencial energético (Classe I).

- 3) Enquadramento do teor de Cloro e Cinzas (em base seca), presentes no lodo em estudo, em intervalos pré-definidos para avaliação de corrosão induzida em equipamentos e problemas de incrustações em caldeiras.

Tais intervalos são resultantes de consulta de trabalhos técnicos cujos pesquisadores citam:

“Corrosão induzida podem ser esperados para concentrações de Cl no combustível acima de 0,1% (em massa, b.s.)”.

“A queima de lodos muito ricos em cinzas (acima de 50%) gerará baixa energia térmica e problemas de incrustações nas caldeiras, só sendo recomendável quando a empresa for obrigada pelo legislador/controlador ambiental, ou quando quiser eliminar o lodo para evitar aterr -lo. Caso contrário,   tecnicamente desaconselhado.”

- 4) Enquadramento dos valores de emissões atmosféricas do lodo testado nos intervalos definidos na Resolução nº 316/2002 do CONAMA (Conselho Nacional do Meio Ambiente).
- 5) Se o gestor não tiver os dados de testes de emissões devem ser verificados intervalos pré-definidos para teor de cloro em base seca e teor de enxofre em base seca.

Tais intervalos são resultantes de consulta de trabalhos técnicos cujos pesquisadores citam:

“Problemas de emissão de HCl podem ser esperados para concentrações de Cl no combustível acima de 0,1% (em massa, base seca).”

“Problemas de emissão de SO_x podem ser esperados para concentrações de S no combustível acima de 0,2% (em massa, base seca).”

- 6) Enquadramento dos valores do ensaio de toxicidade do lodo nos intervalos definidos no Anexo F da NBR 10004/04 (ABNT) e na NBR 10004/87 (ABNT).

[008] Finalmente, com base nas informações geradas nas etapas de 1 a 6 acima descritas, é possível o gestor da área de saneamento e meio ambiente avaliar, rapidamente, se o lodo pode ou não gerar energia útil em processos de combustão de forma segura e ambientalmente correta. O método implementado permite ainda visualizar que tipos de medidas devem ser buscadas para viabilizar a utilização do lodo para tal aplicação à medida que indica possíveis limites técnicos ultrapassados. Na Figura 3 apresentam-se os fluxogramas que demonstram a sequência das etapas do método implementado por computador.

[009] O método implementado por computador para avaliação de lodos de esgoto como biomassa para gerar energia em processos de combustão foi codificado em linguagem de máquina (JAVA 1.6) e transformado em sistema computacional. Para o desenvolvimento do sistema foram utilizados alguns frameworks: ZK Framework, JEP e o Enterprise Java Bean - EJB 3.0. O ZK é um framework orientado a eventos para desenvolvimento web baseado em AJAX de código aberto. Já o JEP é um framework utilizado para evoluir expressões matemáticas. O EJB 3.0 permite o desenvolvimento de aplicações distribuídas, possuindo também o controle de transações.

[010] O padrão de arquitetura de software utilizado foi o Model-View-Controller (MVC), que visa separar as camadas de apresentação do negócio, o qual permite o desenvolvimento, manutenção e teste das camadas de maneira isolada. Especificamente para a camada de visão e controle foi utilizado o ZK Framework, na camada de negócio foi utilizado o EJB 3.0. Já a camada de modelo foi desenvolvida de acordo com o diagrama de classe apresentado na Figura 4.

[011] No sistema computacional, os intervalos de enquadramento de dados, apresentados no método implementado, são representados por um conjunto de regras de lógica, que são inseridas, pelo especialista (representado como **a1** na Figura 3), no sistema através de interface de aquisição (representado como **b1** na Figura 3), e armazenadas automaticamente em banco de dados que são chamados de base de conhecimento (representado como **c1** na Figura 3). Após os dados de entrada ser fornecidos pelo usuário (representado como **d1** na Figura 3), através de interface para usuários (representado como **e1** na Figura 3), o sistema realiza testes e encadeamentos lógicos das regras para obtenção das conclusões e explicações resultantes. A codificação responsável pela realização destes testes e encadeamentos lógicos é chamada de motor lógico (representado como **f1** na Figura 3).

[012] A codificação foi feita para aceitar, que as regras inseridas pelo especialista, utilizem operadores lógicos e matemáticos sendo estes: > (maior que), < (menor que), >= (maior ou igual a), <= (menor ou igual a), == (igual), != (diferente), && (e), || (ou), ! (negação), + (soma), - (subtração), * (multiplicação), / (divisão), além da opção para executar uma sub-regra (regra filho) somente no caso de uma regra principal (regra pai) for verdadeira ou somente no caso de ser falsa.

[013] Foram criadas ainda as constantes com valores previamente definidos: “PND” (parâmetro não determinado), para considerar a possibilidade do usuário não preencher algum valor de variável solicitada pelo sistema; a variável “SIM” para indicar uma resposta positiva para uma pergunta; e a variável “NÃO”, para indicar uma resposta negativa a uma pergunta. A codificação do sistema permite também associar mensagens às regras, que são impressas no relatório de resultados, caso a regra em questão seja executada.

[014] A codificação da Interface de Aquisição foi desenvolvida para primeiro cadastrar nome para a base de conhecimento, em seguida cadastrar grupos de variáveis, para essa

base de conhecimento, que serão utilizadas nas regras, posteriormente, cadastrar as variáveis de cada grupo específico, e finalmente cadastrar as regras da base de conhecimento, de forma que, quando o usuário seleciona o nome da Base de Conhecimento, o sistema já faz a associação com as regras que compõem essa Base. A codificação do sistema permite que diversas Bases de Conhecimento possam ser cadastradas por especialistas e utilizadas por usuários de diversas áreas do conhecimento. A codificação da Interface de Aquisição utiliza comandos não só para cadastrar, mas também para listar, imprimir, editar e excluir informações.

[015] A codificação da Interface de Usuário foi desenvolvida para criar um campo de entrada de dados para cada variável que constar no banco de dados de variáveis e para permitir a escolha e geração de relatórios, além de utilizar comandos não só para guardar os dados de entrada, mas também para listar e imprimir informações.

[016] Ao ser solicitada a geração do relatório, o motor lógico do sistema será acionado, processando as informações e realizando o encadeamento lógico necessário para obtenção das conclusões e explicações resultantes. O motor lógico é codificado seguindo a seguinte sequência: lista todas as regras (representado como **a2** na Figura 4), substitui valores das variáveis nas fórmulas das regras (representado como **b2** na Figura 2), analisa a regra (representado como **c2** na Figura 4) (calcula fórmula ou condição da regra (representado como **d2** na Figura 4) e executa a regra (representado como **e2** na Figura 4)), verifica se tem próxima regra (representado como **f2** na Figura 4) e, caso tenha, passa para a próxima regra, até que não tenha mais nenhuma regra para ser analisada. Quando ocorrer esta última situação, o relatório é montado (representado como **g2** na Figura 4) com as informações provenientes das regras executadas.

[017] Para facilitar o entendimento de como foi feita a codificação do motor lógico, considere o exemplo apresentado na Figura 5.

Regra 1: Primeira Regra (regra pai). Possui a expressão $PCI==PND$

Execução da regra: Se o usuário não fornecer o valor do PCI (deixar em branco o campo de preenchimento desta variável), esta regra será executada (verdadeira) e será emitida no relatório de resultados a mensagem “O Poder Calorífico Inferior do lodo é calculado analiticamente”

[018] Em seguida, o sistema passa para a próxima regra:

Regra 2: Sub-regra (regra filho) da regra 1. Possui a expressão $Cl==PND$

Execução da regra: Esta regra apenas será executada se a Regra1 for verdadeira. Caso a Regra 2 seja executada e seja verdadeira, a mensagem, “Teor de Cloro não é avaliado! Para Teor de Cloro acima de 0,1% corrosão induzida e problemas de emissão de HCl podem ser esperados!”, será emitida no relatório final.

[019] Após a Regra 2, o sistema passa para a Regra 3 e assim por diante até finalizar todas as regras, conforme segue:

Regra 3: Sub-regra (regra filho) da Regra 2. Possui a expressão $Cl > 0.1$

Execução da regra: Esta regra apenas será executada se a Regra 2 for falsa. Caso a Regra 3 seja executada e verdadeira, a mensagem, “Teor de Cloro acima de 0,1%! Problemas de corrosão induzida podem ser esperados!”, será emitida no relatório final.

Regra 4: Sub-regra (regra filho) da Regra 1. Possui a expressão $A == PND$

Execução da regra: Esta regra apenas será executada se a Regra 1 for verdadeira. Caso a Regra 4 seja executada e verdadeira, a mensagem, “Teor de Cinzas não será avaliado! Para Teor de Cinzas acima de 50% baixa energia térmica e problemas de incrustações em caldeiras podem ser esperados”, será emitida no relatório final.

Regra 5: Sub-regra (regra filho) da Regra 4. Possui a expressão $A > 50$

Execução da regra: Esta regra apenas será executada se a Regra 4 for falsa. Caso a Regra 5 seja executada e verdadeira, a mensagem, “Teor de Cinzas acima de 50%! Problemas de incrustações em caldeiras podem ser esperados.”, será emitida no relatório final.

Regra 6: Sub-regra (regra filho) da regra 1. Possui a expressão $PCI = (339*C + 1030*H - 109*(O - S) - 0,25*W)/1000$, que é uma fórmula.

[020] Execução da regra: Se a Regra 1 for verdadeira, é executada a fórmula “ $PCI = (339*C + 1030*H - 109 * (O - S) - 0.25* W)/1000$ ” para encontrar o valor do PCI.

REIVINDICAÇÕES

1. Método implementado por computador para avaliação de lodos de esgoto como biomassa para gerar energia em processos de combustão e informar se esta aplicação pode ser feita de forma segura, sem causar impactos ambientais adversos, danos ou riscos a saúde pública, **caracterizado por** usar resultados laboratoriais de análise química elementar, toxicidade e teste de emissões atmosféricas de uma amostra do lodo de forma sistemática seguindo as seguintes etapas:

- Calcular o Poder Calorífico Inferior do Lodo, através da fórmula:

$$PCI = 33900 C + 103000H - 10900 (O - S) - 25W$$

onde, PCI é o poder calorífico inferior (kJ/kg combustível), C é o teor de carbono (kg C/kg combustível) em base seca, H é o teor de hidrogênio (kg H/kg combustível) em base seca, O é o teor de oxigênio (kg O/kg combustível) em base seca, S é o teor de enxofre (kg S/kg combustível) em base seca e W é o teor de umidade (kg de água/kg combustível) em base seca;

- enquadrar o Poder Calorífico Inferior calculado dentro dos intervalos de Classe:

Lodo Classe IV: se $PCI < 4$ MJ/kg,

Lodo Classe III: se $4 \leq PCI < 10,467$ MJ/kg,

Lodo Classe II: se $10,467 \leq PCI < 18,08$ MJ/kg, e

Lodo Classe I: se $PCI \geq 18,08$ MJ/kg;

- enquadrar o teor de Cloro e Cinzas presentes no lodo em estudo para avaliação de corrosão induzida em equipamentos e problemas de incrustações em caldeiras, conforme os intervalos: se teor de cloro em base seca $> 0,1\%$, podem ser esperados problemas de corrosão induzida; e se teor de cinzas em base seca $> 50\%$, podem ser esperados problemas de incrustações em caldeiras;

- enquadrar os valores de emissões atmosféricas do lodo testado nos intervalos definidos na Resolução nº 316/2002 do Conselho Nacional do Meio Ambiente. Se o gestor não tiver os dados de testes de emissões devem ser verificados os seguintes intervalos: se teor de cloro em base seca $> 0,1\%$, são esperados problemas de emissão de Cloreto de Hidrogênio; se teor de enxofre em base seca $> 0,2\%$, são esperados problemas de emissão de Óxidos de Enxofre;

- enquadrar os valores do ensaio de toxicidade do lodo nos intervalos definidos no Anexo F da NBR 10004/04 (ABNT, 2004) e na NBR 10004/87 (ABNT, 1987); e
- avaliar, com base nas informações geradas nas etapas anteriores, se o lodo pode ou não gerar energia útil em processos de combustão de forma segura e ambientalmente correta.

2. Método implementado por computador para classificar o potencial energético do lodo para gerar energia útil em processos de combustão e informar se esta aplicação pode ser feita de forma segura, sem causar impactos ambientais adversos, danos ou riscos a saúde pública, de acordo com a reivindicação 1, **caracterizado por** classificar o lodo conforme segue: Classe IV($PCI < 4$ MJ/kg)- não apresenta potencial energético; Classe III($4 \leq PCI < 10,467$ MJ/kg)- baixo potencial energético; Classe II ($10,467 \leq PCI < 18,08$)- médio potencial energético; Classe I ($PCI \geq 18,08$ MJ/kg)- alto potencial energético.

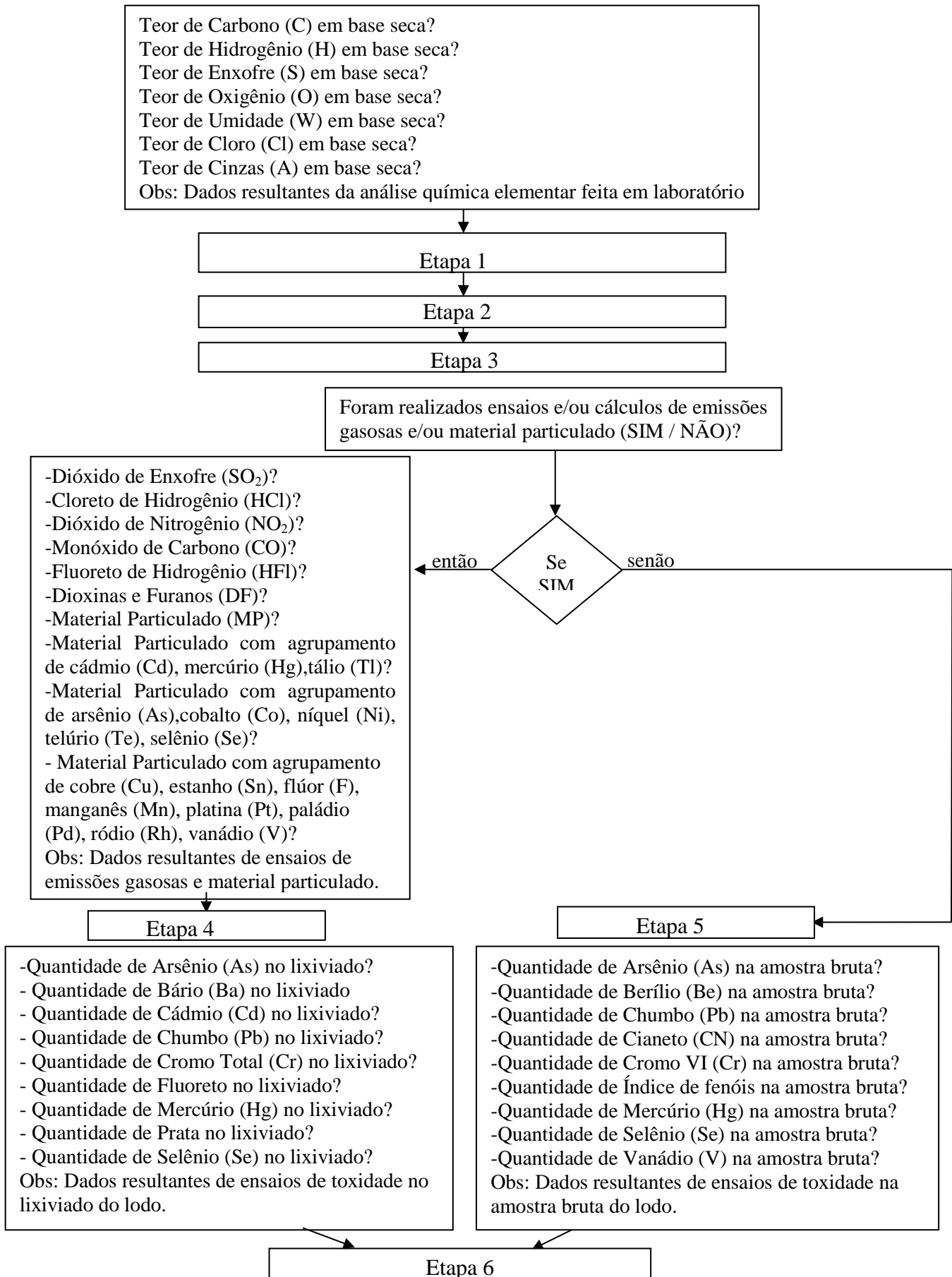


Figura 1

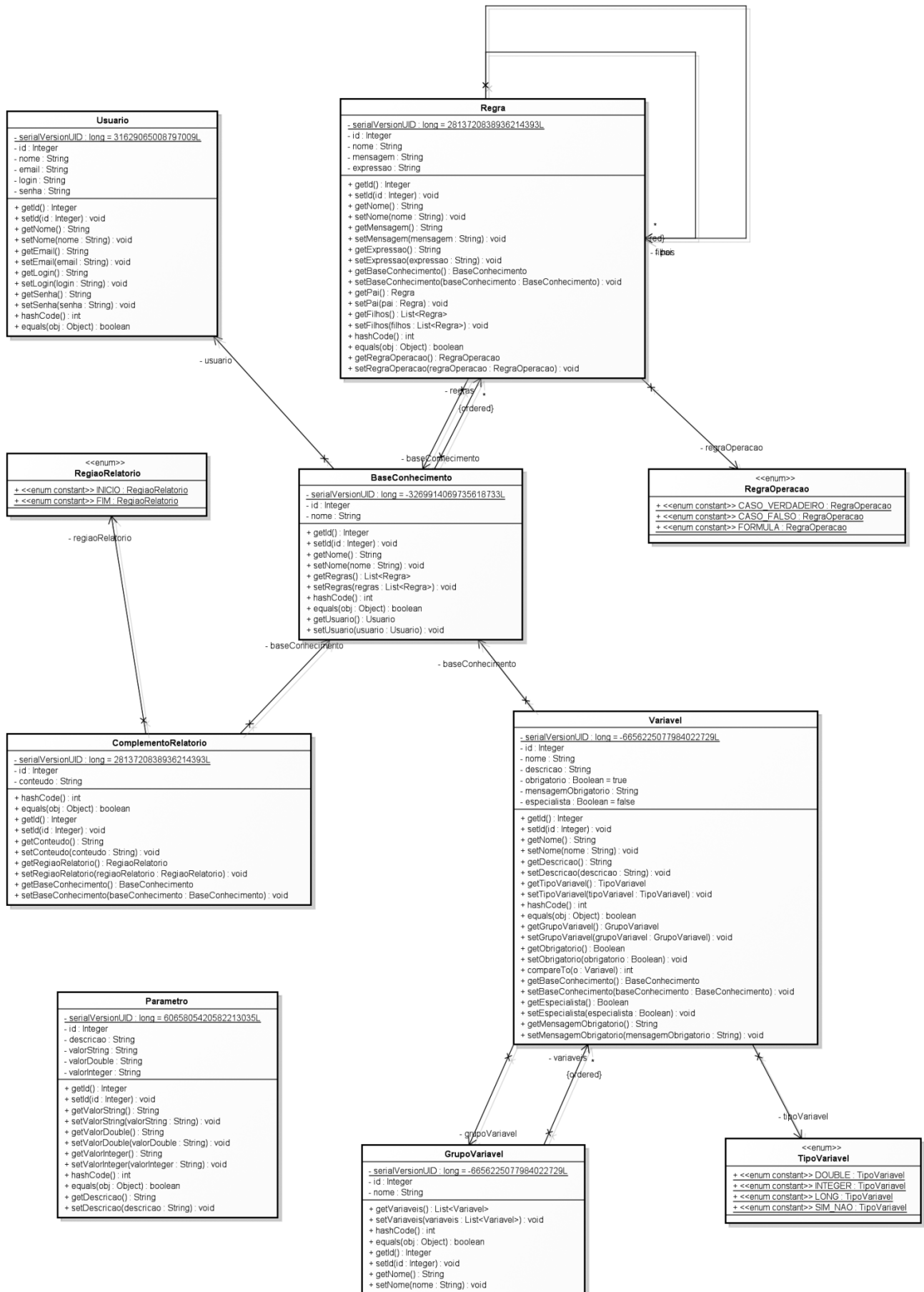


Figura 2

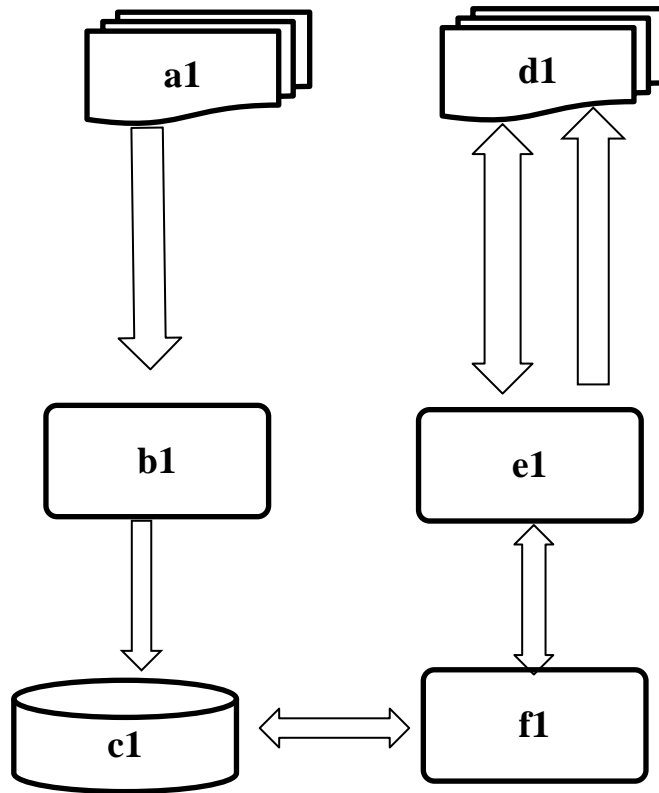


Figura 3

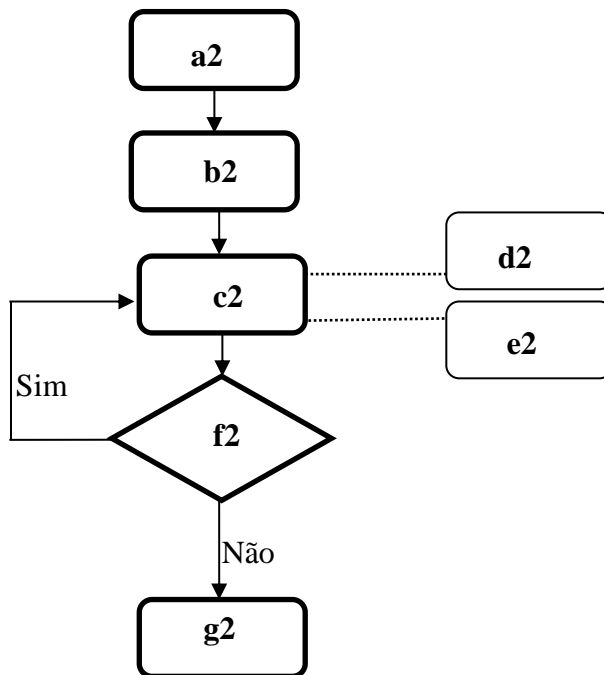


Figura 4

	REGRA	EXPRESSÃO	MENSAGEM	OPERAÇÃO
Regra 1	Poder Calorífico Inferior do Lodo em Mj/Kg	PCI == PND	O Poder Calorífico Inferior do lodo é calculado analiticamente.	
Regra 2	Se %Cl=PND	%Cl == PND	Teor de Cloro não é avaliado! Para Teor de Cloro acima de 0,1% corrosão induzida e problemas de emissão de HCl podem ser esperados!	Verdadeiro
Regra 3	Se %Cl > 0,1%	Cl > 0.1	Teor de Cloro acima de 0,1%! Problemas de corrosão induzida podem ser esperados!	Falso
Regra 4	Se %A = PND	A == PND	Teor de Cinzas não será avaliado! Para Teor de Cinzas acima de 50% baixa energia térmica e problemas de incrustações em caldeiras podem ser esperados.	Verdadeiro
Regra 5	Se %A > 50%	A > 50	Teor de Cinzas acima de 50%! Problemas de Incrustações em caldeiras podem ser esperados.	Falso
Regra 6	Cálculo do PCI em MJ/Kg	$PCI = \frac{339 * C + 1030 * H - 109 * (O - S) - 0.25 * W}{1000}$		Fórmula

Figura 5