

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”

FACULDADE DE CIÊNCIAS

DEPARTAMENTO DE COMPUTAÇÃO

BACHARELADO EM CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO

JOÃO PEDRO MUCHERONI COVOLAN

**PROGRAMAÇÃO NÃO LINEAR PARA DIMENSIONAMENTO DE
BIODIGESTORES RURAIS**

**BAURU - SP
2018**

JOÃO PEDRO MUCHERONI COVOLAN

**PROGRAMAÇÃO NÃO LINEAR PARA DIMENSIONAMENTO DE
BIODIGESTORES RURAIS**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação apresentado à disciplina Projeto e Implementação de Sistemas do curso de Bacharelado em Ciência da Computação da Faculdade de Ciências da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” como requisito parcial para a obtenção do título de bacharel.

Orientadora: Prof^a Dr^a Márcia A. Zanoli
Meira e Silva

Bauru - SP
2018

JOÃO PEDRO MUCHERONI COVOLAN

**PROGRAMAÇÃO NÃO LINEAR PARA DIMENSIONAMENTO DE
BIODIGESTORES RURAIS**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação apresentado à disciplina Projeto e Implementação de Sistemas do curso de Bacharelado em Ciência da Computação da Faculdade de Ciências da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” como requisito parcial para a obtenção do título de bacharel.

Aprovado em 12/11/2018.

BANCA EXAMINADORA

Prof^a Dr^a Márcia Aparecida Zanolli Meira e Silva - Orientadora
Faculdade de Ciências – Unesp/Bauru

Prof^a Associada Edméa Cássia Baptista
Faculdade de Ciências – Unesp/Bauru

Prof^a Dr^a Simone das Graças Domingues Prado
Faculdade de Ciências – Unesp/Bauru

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha orientadora, Márcia, pelo apoio em todos os momentos, em especial nos mais difíceis. Sem ela nada disso teria sido possível.

Agradeço aos meus pais, aos meus avós, ao meu irmão, aos meus tios e tias, primos e primas, pelas conversas, pela força e pela confiança que depositaram em mim antes e durante toda a graduação.

Agradeço a todos os amigos e amigas, sejam aqueles que me acompanharam como colegas de curso nessa trajetória de quatro anos, sejam aqueles que, mesmo de longe, sempre me apoiaram e me motivaram a continuar. São os amigos que fazem tudo valer a pena.

Agradeço a todos os professores e servidores da Unesp, que de uma forma ou de outra contribuíram para essa trajetória e foram exemplo e inspiração para mim.

Agradeço, por fim, a todos aqueles estudantes, dos mais diversos cursos e faculdades da Unesp de Bauru, que foram para mim, durante todos esses anos, exemplo de incansável luta por uma universidade pública, gratuita e de qualidade, que atenda aos interesses de toda a sociedade e, em especial, daqueles que mais precisam. Só assim podemos ter esperança de que dias melhores virão.

*“Um problema só surge quando estão
presentes todas as condições para
solucioná-lo”*

(Karl Marx)

RESUMO

Os biodigestores rurais são hoje uma importante alternativa para a geração de energia, além de permitirem uma destinação correta aos dejetos oriundos da produção agropecuária. Neste trabalho foi desenvolvido um software em Java que permite calcular as dimensões de biodigestores dos três principais modelos presentes no contexto brasileiro: indiano, chinês e batelada. Para isso foram utilizadas modelagens de seus parâmetros e restrições como problemas de programação não linear restritos. Aplicando-se o método Primal Dual Barreira Logarítmica, os problemas restritos foram transformados em irrestritos e, em seguida, otimizados através do método de Newton. Além disso, como esse último método exige a resolução de sistemas lineares, realizou-se uma análise comparativa, em termos de tempo de processamento, entre o método de Gauss com Pivotamento Parcial sem troca linhas, o método da Decomposição LU e um método de Newton modificado utilizando DLU, sendo encontrados resultados superiores nos dois últimos casos.

Palavras-chave: Otimização. Biodigestor. Java. Newton. LU.

ABSTRACT

Rural digesters are today an important alternative for energy generation, as well as allow a correct destination for the manure from agricultural production. In this work, a software was development in Java to calculate the digesters dimensions of the three main models present in the Brazilian context: Indian, Chinese and Batch. For this, modeling of its parameters and constraints were used as restricted nonlinear programming problems. Applying the Primal Dual Logarithmic Barrier method, the restricted problems were transformed into unrestricted and then optimized through Newton's method. In addition, since this last method requires the resolution of linear systems, a comparative analysis was made, in terms of processing time, between the Gauss method with Partial Pivot without exchange lines, the LU Decomposition method and a Newton method modified using LU Decomposition method, with best results found in the last two cases.

Keywords: Optimization. Digester. Java. Newton. LU.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Parâmetros do biodigestor indiano.....	14
Figura 2 – Parâmetros do biodigestor chinês.....	16
Figura 3 – Parâmetros do biodigestor batelada	18
Figura 4 – Entrada de dados para os três biodigestores.....	27
Figura 5 – Tabela de horários de uso dos equipamentos.....	27
Figura 6 – Entradas específicas do biodigestor batelada.....	28
Figura 7 – Saída para o biodigestor indiano.....	29
Figura 8 – Saída para o biodigestor batelada	30
Figura 9 – Saída para o biodigestor chinês.....	30
Figura 10 – Biodigestor abstrato e classes concretas	31

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

DLU - Decomposição LU

GPP - Gauss com Pivotamento Parcial

PDBL - Primal Dual Barreira Logarítmica

SUMÁRIO

1	Introdução	10
1.1	Objetivos	11
1.1.1	Objetivo geral	11
1.1.2	Objetivos específicos.....	11
2	Modelos de biodigestor	13
2.1	Indiano.....	13
2.2	Chinês	15
2.3	Batelada	17
3	Materiais e métodos	20
3.1	Método Primal Dual Barreira Logarítmica (PDBL).....	20
3.2	Método de Newton.....	21
3.3	Método de Newton modificado	23
3.4	Método de Gauss com pivotamento parcial sem troca de linhas	23
3.5	Método da decomposição LU.....	24
3.6	Newton modificado com decomposição LU	24
3.7	Java	25
3.8	NetBeans IDE.....	25
4	<i>Software</i> desenvolvido	26
4.1	Entrada de dados	26
4.2	Saída de dados	29
5	Resultados e discussão.....	31
5.1	Parâmetros calculados	31
5.2	Implementação	31
5.3	Comparação entre os métodos	32
6	Considerações finais	34
	REFERÊNCIAS.....	35

1 Introdução

Os biodigestores rurais são reatores químicos que transformam, através de fermentação anaeróbia, a matéria orgânica residual da agropecuária em biofertilizante, produzindo biocombustível (biogás) durante o processo. Sua importância tem crescido atualmente devido à necessidade de fontes alternativas de geração de energia e de se oferecer descarte adequado aos resíduos orgânicos, tais como fezes e urina de animais e restos de vegetais.

Ortolani, Benincasa e Junior (1991) definiram os parâmetros e restrições que devem ser respeitados para o cálculo das dimensões dos três principais modelos de biodigestores existentes no contexto brasileiro: indiano, chinês e batelada. Os modelos indiano e chinês são do tipo contínuo, ou seja, devem ser alimentados em curtos intervalos de tempo. O modelo indiano trabalha com pressão contínua e o chinês com pressão variável. Já no modelo batelada, o biodigestor é alimentado uma única vez e após um período conveniente de fermentação seu conteúdo é removido. Os autores ainda propõem que o cálculo das dimensões seja feito através do método da tentativa e erro, tendo em vista atender uma certa demanda diária de biogás da propriedade rural. Entretanto, esse método, além de ser lento, garante apenas que os parâmetros calculados sejam viáveis (atendam à demanda e respeitem as restrições) e não ótimos, ou seja, não garante que o volume do biodigestor calculado, e consequentemente seu custo, sejam os mínimos necessários.

Sendo assim, Florentino (2003) propôs um modelo de programação não linear restrito para cada biodigestor, procurando minimizar o seu volume, atendendo a uma demanda diária de biogás e às restrições descritas por Ortolani, Benincasa e Junior (1991). Posteriormente, Portes e Florentino (2006) construíram um software no MATLAB utilizando tal modelo para calcular os parâmetros dos biodigestores, a partir de informações fornecidas pelo usuário acerca da demanda energética e do tipo de dejetos a ser utilizado. Entretanto, o MATLAB é uma plataforma paga, o que dificulta o acesso ao produtor rural e aos desenvolvedores de software.

Procurando superar esse obstáculo, Massola (2015) e Alvarez (2016) desenvolveram, respectivamente, os softwares para os modelos indiano e batelada na linguagem Java (DEITEL; DEITEL, 2010), gratuito e de código aberto, usando o ambiente de desenvolvimento integrado (IDE) NetBeans (ORACLE, 2018). O

método Primal Dual Barreira Logarítmica (PDBL) foi utilizado para transformar o problema restrito proposto por Florentino (2003) em um problema irrestrito, que então foi resolvido pelo método de Newton para otimização não linear multivariáveis. Para a resolução dos sistemas lineares do método de Newton, foi escolhido, por ser o mais simples, o método da eliminação de Gauss com Pivotamento Parcial (GPP) sem troca de linhas. Souza (2016) desenvolveu o software para o modelo chinês, porém utilizando apenas o método da tentativa e erro.

Neste trabalho foram reunidos os três softwares citados anteriormente em um único, utilizando porém, o método PDBL para dimensionamento do biodigestor chinês. Além disso, a eficiência do método de GPP foi comparada com a do método da Decomposição LU (DLU) para a resolução dos sistemas lineares e com a eficiência do método de Newton modificado com DLU. Foram obtidos resultados superiores com os dois últimos métodos.

Este trabalho encontra-se dividido como segue: no capítulo 2 são apresentados os modelos de biodigestor, no capítulo 3 os matérias e métodos utilizados, no capítulo 4 o *software* desenvolvido, no capítulo 5 os resultados e discussão e no capítulo 6 as considerações finais.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

Desenvolver um software em Java para o dimensionamento de biodigestores rurais dos modelos indiano, chinês e batelada, utilizando programação não linear, testando também a eficiência do método da DLU na resolução de sistemas lineares e do método de Newton modificado com DLU.

1.1.2 Objetivos específicos

1. Implementar o algoritmo para dimensionamento de biodigestores do modelo chinês através de programação não linear irrestrita (Método Primal Dual Barreira Logarítmica);
2. Unificar os softwares desenvolvidos para os três modelos;
3. Implementar o método da DLU para resolução dos sistemas lineares gerados pelo Método de Newton e o método de Newton modificado com DLU;

4. Avaliar a diferença de desempenho entre o método da DLU, o método de Newton modificado com DLU e o método de GPP.

2 Modelos de biodigestor

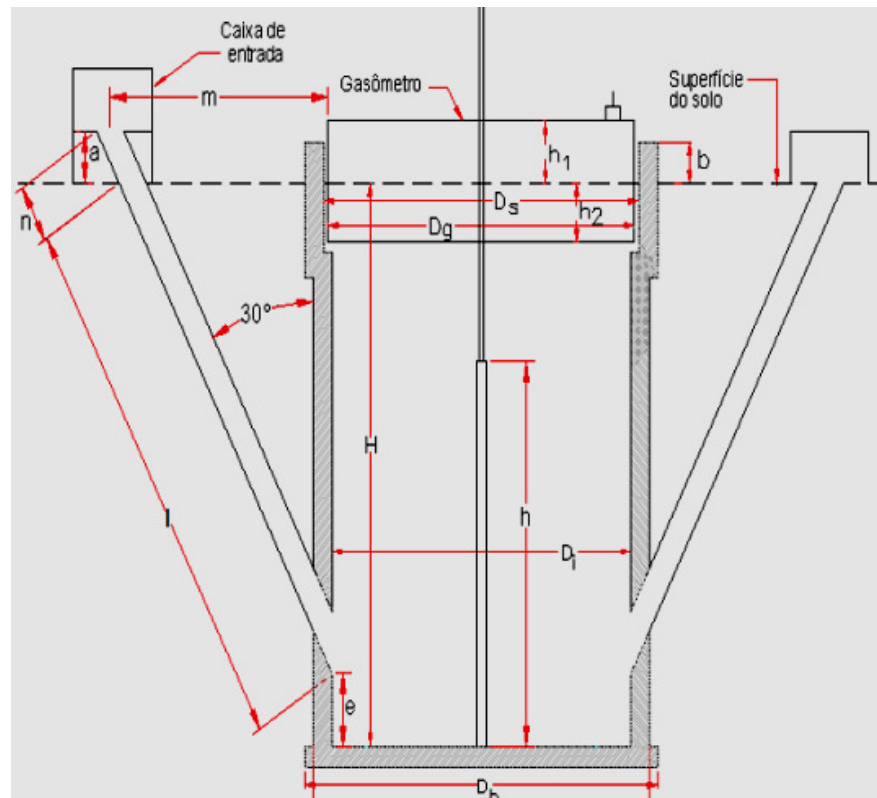
A seguir são descritos os principais parâmetros calculados para cada tipo de biodigestor, de acordo com a metodologia proposta por Ortolani, Benincasa e Junior (1991), bem como os respectivos problemas de programação não linear multivariáveis restritos propostos por Florentino (2003). O problema de otimização determina os dois principais parâmetros do biodigestor (diâmetro interno e a altura do corpo principal), a partir dos quais os demais parâmetros são calculados.

2.1 Indiano

O biodigestor indiano é do tipo contínuo devendo ser alimentado constantemente com dejetos. A parede divisória no centro do cilindro principal tem a função de forçar uma maior movimentação da biomassa em seu interior. Conforme o biogás é produzido e consumido, o gasômetro se desloca através do tubo guia para cima e para baixo, respectivamente, aumentando e diminuindo o volume ocupado pelo biogás e mantendo assim a pressão constante. Essa pressão é determinada pela altura ociosa do gasômetro (h_1).

A Figura 1 apresenta um corte frontal de um biodigestor indiano com os principais parâmetros (D_i e H) e os demais parâmetros obtidos a partir destes parâmetros principais, essenciais para o bom funcionamento do biodigestor.

Figura 1 – Parâmetros do biodigestor indiano



Fonte: Portes e Florentino (2006)

Os parâmetros representados na Figura 1 são:

- | | |
|--|---|
| H: Altura do nível do substrato; | n: Comprimento do tubo de PVC acima da superfície do solo; |
| h: Altura da parede divisória; | e: Altura do posicionamento dos tubos de entrada e saída; |
| h_1: Altura ociosa do gasômetro; | m: Distância entre a parede do gasômetro e o meio da caixa de entrada; |
| h_2: Altura útil do gasômetro; | l: Comprimento do tubo de PVC até a superfície do solo. |
| D_i: Diâmetro interno do biodigestor; | |
| D_g: Diâmetro do gasômetro; | |
| D_b: Diâmetro da base; | |
| D_s: Diâmetro interno da parede superior; | |
| a: Altura do fundo da caixa de entrada; | |
| b: Altura da parede do biodigestor acima do nível do substrato; | |

De acordo com Florentino (2003), o problema de programação não linear associado é dado por:

$$\underbrace{\text{Minimizar } pD^2H}_{(D,H)}$$

Sujeito a:

$$\begin{cases} pD^2H \geq xKB \\ D - H \leq 0 \\ D - 0,6H \geq 0 \\ 3 \leq H \leq 6 \end{cases} \quad (1)$$

em que:

$$p = \frac{\pi}{4};$$

D = D_i: diâmetro interno (m);

H: altura do biodigestor (m);

x: Porcentagem mínima a ser adicionada ao volume útil do biodigestor;

K: fator de rendimento (adquirido em literatura específica);

B: demanda energética diária (m³);

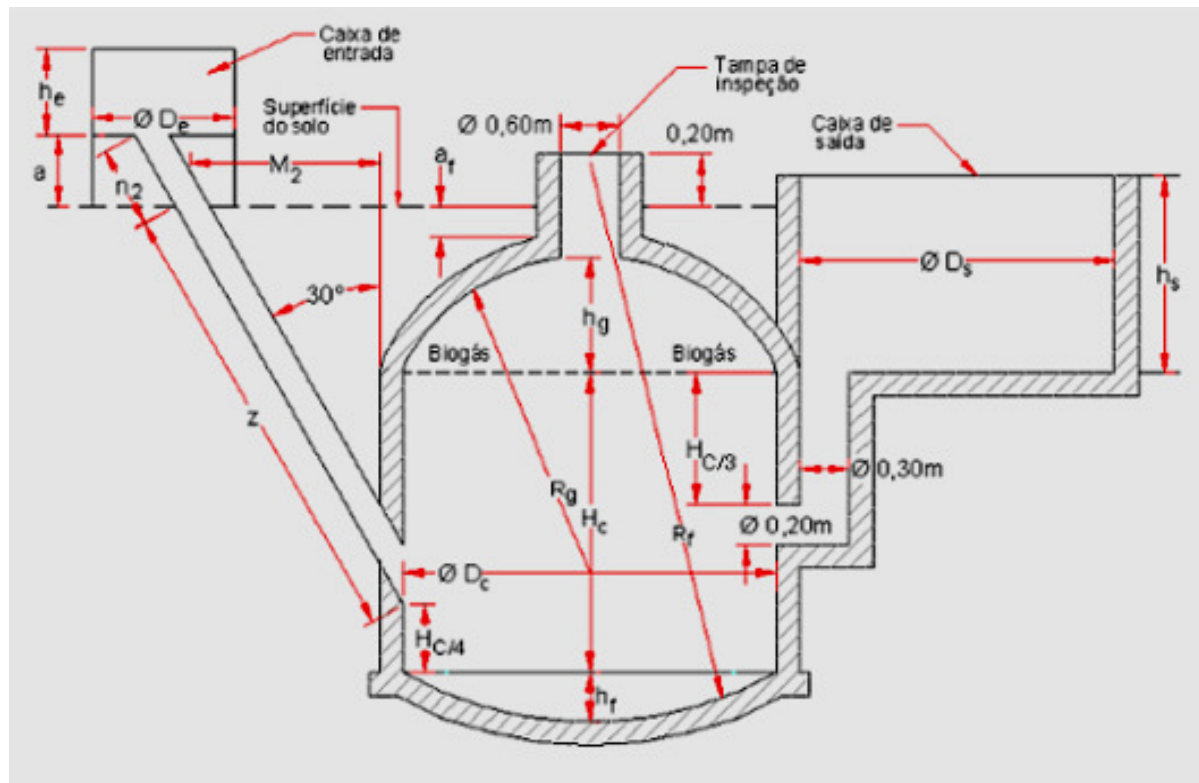
K B: volume útil do biodigestor e obedece a relação $2 \leq KB \leq 25$.

2.2 Chinês

O biodigestor chinês também é do tipo contínuo mas trabalha com pressão variável. Em consequência ao não deslocamento do gasômetro, conforme o biogás é produzido, a pressão aumenta empurrando a biomassa para a caixa de saída, e com o consumo do biogás a pressão diminui. A pressão máxima é atingida quando um terço do volume do cilindro principal é ocupado pelo biogás.

A Figura 2 apresenta um corte frontal de um biodigestor modelo chinês com os parâmetros essenciais para o seu bom funcionamento.

Figura 2 – Parâmetros do biodigestor chinês



Fonte: Portes e Florentino (2006)

Os parâmetros representados na Figura 2 são:

D_c : Diâmetro do corpo cilíndrico;
 H_c : Altura do corpo cilíndrico;
 h_g : Altura da calota do gasômetro;
 h_f : Altura da calota do fundo;
 R_g : Raio da calota do gasômetro;
 R_f : Raio da calota do fundo;
 D_e : Diâmetro da caixa de entrada;
 h_e : Altura da caixa de entrada;
 z : Comprimento do tubo de PVC até a superfície do solo;

D_s : Diâmetro da caixa de saída;
 h_s : Altura da caixa de saída;
 a_f : Afundamento da cúpula no solo;
 a : Altura do fundo da caixa de entrada;
 M_2 : Distância entre o meio da caixa de entrada e o corpo cilíndrico do biodigestor;
 n_2 : Comprimento do tubo de PVC acima da superfície do solo.

De acordo com Florentino (2003), o problema de programação não linear para este biodigestor é modelado como:

$$\underbrace{\text{Minimizar}}_{(D,H)} \left(p_1 D^2 H + p_2 D^3 \right)$$

Sujeito a:

$$\begin{cases} p_1 D^2 H + p_2 D^3 \geq K B \\ 0,5 D - H \leq 0 \\ 0,6 D - H \geq 0 \\ D \geq 0 \end{cases} \quad (2)$$

em que:

$$p_1 = \frac{\pi}{4};$$

$$p_2 = \frac{49\pi}{3072};$$

$D = D_c$: diâmetro do corpo cilíndrico (m);

$H = H_c$: altura do corpo cilíndrico (m);

K: fator de rendimento;

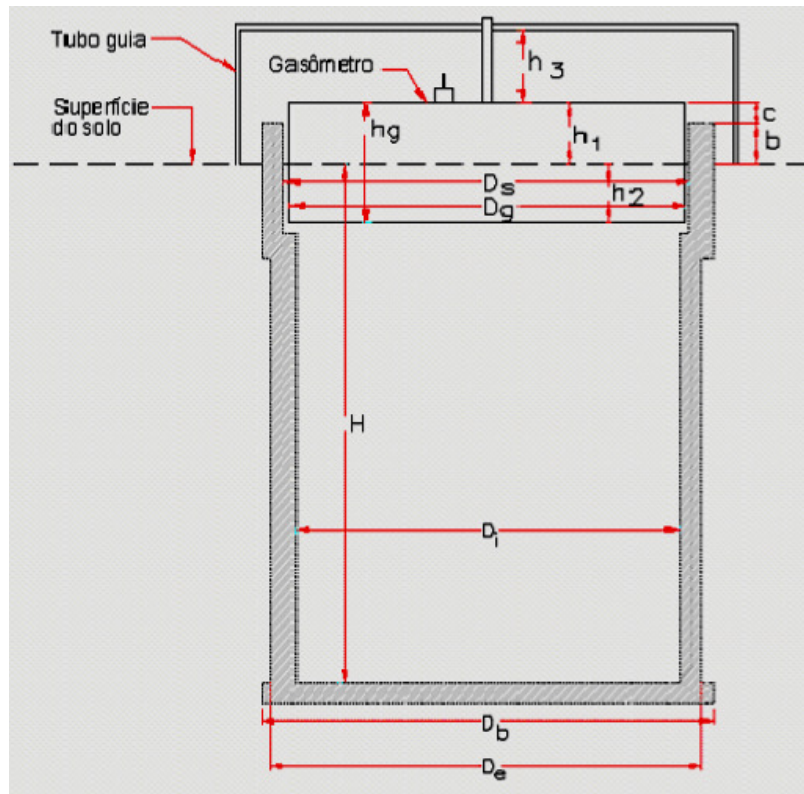
B: demanda energética diária (m³).

2.3 Batelada

O biodigestor do tipo batelada é alimentado de uma só vez e após um período conveniente de fermentação é aberto e a biomassa retirada. Para que seja possível manter um fornecimento contínuo de biogás costuma-se adotar uma bateria de biodigestores, que são preenchidos e esvaziados alternadamente em períodos regulares, conforme detalhado em Ortolani, Benincasa e Junior (1991).

A Figura 3 apresenta um corte frontal de um biodigestor modelo batelada com seus principais parâmetros.

Figura 3 – Parâmetros do biodigestor batelada



Fonte: Portes e Florentino (2006)

Os parâmetros representados na Figura 3 são:

H: Altura do nível do substrato;	b: Altura da parede do biodigestor acima do nível do substrato;
h₁: Altura ociosa do gasômetro;	D_i: Diâmetro interno do biodigestor;
h₂: Altura útil do gasômetro;	D_g: Diâmetro do gasômetro;
h₃: Altura livre para o deslocamento do gasômetro;	D_b: Diâmetro da base;
h_g: Altura do gasômetro;	D_s: Diâmetro interno da parede inferior;
c: Altura do gasômetro acima da parede do biodigestor;	D_e: Diâmetro externo da parede superior.

De acordo com Florentino (2003), o problema de programação não linear associado, por sua vez, é:

Minimizar pD^2H
 (D,H)

Sujeito a:

$$\begin{cases} p D^2 H \geq VD \\ H - D \geq 0 \\ 0,6 H - D \leq 0 \\ 0 < H < 6 \end{cases} \quad (3)$$

em que:

$$p = \frac{\pi}{4};$$

D = D_i: diâmetro interno (m);

H: altura do nível do substrato (m);

VD: volume do substrato a ser colocado no biodigestor (m³).

3 Materiais e métodos

Durante o desenvolvimento deste trabalho vários métodos foram utilizados. Os modelos de programação não linear multivariáveis restritos foram transformados em problemas irrestritos com o uso do método PDBL; os métodos de Newton e Newton modificado foram aplicados na otimização dos problemas irrestritos; e o método da eliminação de Gauss com pivotamento parcial sem troca de linhas e o método da DLU, utilizados para resolver os sistemas lineares em uma das etapas do método de Newton. A linguagem de programação Java e a IDE NetBeans foram as ferramentas utilizadas no desenvolvimento do software.

Uma breve descrição desses métodos e das ferramentas utilizadas é apresentada nas seções deste capítulo.

3.1 Método Primal Dual Barreira Logarítmica (PDBL)

De acordo com Bazaraa, Sherali, Shetty, (2006), o método PDBL é um método de barreira, que transforma o problema restrito em irrestrito. Partindo de um ponto inicial factível (método de pontos interiores), as barreiras impedem que as variáveis saiam da região de viabilidade. Entre os métodos de pontos interiores, o PDBL é o mais utilizado por ser eficiente e fácil de se implementar.

Dado um problema de programação não linear restrito na forma:

$$\begin{aligned} &\text{Minimizar } f(x) \\ &\text{sujeito a: } \begin{cases} g_i(x) = 0, & i = 1, 2, \dots, m < n \\ h_j(x) \geq 0, & j = 1, 2, \dots, p \end{cases} \end{aligned} \quad (4)$$

sendo $x \in \mathbb{R}^n$, $g(x) \in \mathbb{R}^m$, $h(x) \in \mathbb{R}^p$ e as funções de classe C^2 .

Pelo método PDBL, as restrições de desigualdade são transformadas em restrições de igualdade por meio da introdução de variáveis de folga ou excesso positivas. O problema (4), portanto, pode ser reescrito como:

$$\begin{aligned}
& \text{Minimizar } f(x) \\
& \text{sujeito a: } \begin{cases} g_i(x) = 0, & i=1, \dots, m \\ h_j(x) - s_j = 0, & j=1, \dots, p \\ s_j \geq 0 \end{cases}
\end{aligned} \tag{5}$$

sendo $s \in \mathbb{R}^p$.

Em seguida, adiciona-se uma função barreira logarítmica à função objetivo para garantir a não negatividade da variável de excesso. Com isso, tem-se:

$$\begin{aligned}
& \text{Minimizar } f(x) - \mu \sum_{j=1}^p \ln(s_j) \\
& \text{sujeito a: } \begin{cases} g_i(x) = 0, & i=1, \dots, m \\ h_j(x) - s_j = 0, & j=1, \dots, p \end{cases}
\end{aligned} \tag{6}$$

em que μ , denominado de parâmetro de barreira, é um número positivo que tende a zero e $\ln(s_j)$ tende ao infinito quando s_j se aproxima de zero, impedindo assim que as restrições de não negatividade de s_j sejam violadas, dado que a função objetivo é de minimização.

Determina-se então a função Lagrangiana associada ao problema (6):

$$L = f(x) - \mu \sum_{j=1}^p \ln(s_j) - \sum_{i=1}^m \lambda_i g_i(x) - \sum_{j=1}^p \pi_j [h_j(x) - s_j] \tag{7}$$

em que λ_i e π_j são os multiplicadores de Lagrange.

Tem-se assim um problema de otimização não linear multivariáveis irrestrito, que será otimizado pelo Método de Newton.

3.2 Método de Newton

Para a solução do problema de minimização da função (7), aplicam-se as condições necessárias de primeira ordem, ou seja:

$$\nabla_d L = 0 \tag{8}$$

sendo $d = (x, s, \lambda, \pi)^T$.

A equação (8) representa um sistema de equações não lineares que pode ser resolvido pelo método de Newton através da resolução do sistema linear $H\Delta d = \nabla_d L$, em que H é a matriz Hessiana e $\nabla_d L$ é o vetor gradiente da função Lagrangiana L descrita em (7). A direção de busca $\Delta d = (\Delta x, \Delta s, \Delta \lambda, \Delta \pi)^T$ é utilizada para atualizar as variáveis x, s, λ e π da seguinte forma:

$$\begin{aligned} x^{k+1} &= x^k + \alpha_p \Delta x \\ s^{k+1} &= s^k + \alpha_p \Delta s \\ \lambda^{k+1} &= \lambda^k + \alpha_d \Delta \lambda \\ \pi^{k+1} &= \pi^k + \alpha_d \Delta \pi \end{aligned} \quad (9)$$

O tamanho dos passos α_p (primais) e α_d (duais) são escolhidos para preservarem a positividade do vetor s e o sinal do vetor π . O valor máximo de $\alpha \in (0, 1]$ é dado por:

$$\begin{aligned} \alpha_p^{\max} &= \tau \min \left\{ \frac{s}{|\Delta s|} : \Delta s < 0 \right\} \\ \alpha_d^{\max} &= \tau \min \left\{ \frac{\pi}{|\Delta \pi|} : \Delta \pi < 0 \right\} \end{aligned} \quad (10)$$

em que $\tau = 0,9995$.

De acordo com Baptista et al. (2006), a otimização ocorre seguindo-se o algoritmo:

Algoritmo 1: PDBL

1. Dado o problema (4), construa a função Lagrangiana (7);
2. Faça $k = 0$ e dê uma estimativa inicial para μ^k e $d^k = (x^k, s^k, \lambda^k, \pi^k)^T$ que satisfaça as condições propostas;
3. Obtenha o sistema linear $H\Delta d = \nabla_d L$ e resolva-o;
4. Calcule os passos primais e duais e atualize d^k utilizando (9);
5. Se $\|\nabla L\| < \varepsilon$ (ε = precisão dada), vá para o passo 6.

Caso contrário, volte para o passo 3;

6. Se as condições de KKT são satisfeitas, então **pare**.

Caso contrário, vá para o passo 7;

7. Atualize μ^k utilizando uma heurística.

Faça $k = k + 1$ e retorne ao passo 3.

3.3 Método de Newton modificado

Uma versão modificada do método de Newton para otimização multivariáveis irrestrita foi pensada para esse trabalho visando aumentar a eficiência computacional no cálculo dos parâmetros do biodigestor a partir de uma analogia com o método de Newton modificado para otimização monovariável.

Neste método modificado, o sistema linear $H\Delta d = \nabla_d L$ é resolvido mantendo-se a mesma matriz Hessiana (H) por n iterações, sendo modificado apenas o valor de $\nabla_d L$. Na iteração $(n+1)$ ou quando o valor de μ for atualizado, a Hessiana é recalculada e o procedimento se repete.

Essa alteração, a princípio, pode tornar o método mais rápido ou mais lento, dependendo do valor escolhido para n e do comportamento da função objetivo. Isso ocorre porque, embora o uso da matriz Hessiana desatualizada adicione uma imprecisão no processo de otimização, o que pode exigir um número maior de iterações para se atingir o valor ótimo, também poupa um considerável esforço computacional, tornando cada iteração do método mais rápida, já que o cálculo da matriz pode ser bastante custoso.

3.4 Método de Gauss com pivotamento parcial sem troca de linhas

Para a resolução do sistema linear apresentado no passo 3 do algoritmo 1, um dos métodos utilizados foi o da eliminação de Gauss com pivotamento parcial sem troca de linhas.

De acordo com Franco (2006), nesse método a matriz A , de um sistema linear do tipo $Ax = b$ (onde A é de ordem n , e x e b são vetores de dimensão n), é transformada em uma matriz triangular superior equivalente escolhendo como pivô o maior elemento em módulo de cada coluna, a cada passo do método.

A linha do pivô deve ser sempre a primeira entre aquelas ainda não triangularizadas, exigindo assim que possivelmente as linhas troquem de posição. Na variação do método utilizada, a troca de linhas não é efetivamente realizada

(para poupar esforço computacional), mas apenas indicada por um vetor de apontadores.

A partir da triangularização, a solução do sistema é trivial (retro-solução). Calcula-se o valor do último elemento do vetor x , substituindo-o nas demais equações. Calcula-se então o penúltimo elemento de x e assim sucessivamente até o primeiro elemento do vetor.

3.5 Método da decomposição LU

De acordo com Franco (2006), dado um sistema linear na forma $Ax = b$, se A pode ser decomposta no produto de duas matrizes L e U , sendo L uma matriz triangular inferior com 1 na diagonal principal e U uma matriz triangular superior, então o sistema pode ser reescrito na forma:

$$LUx = b \quad (11)$$

Fazendo-se $Ux = y$, a equação (11) é correspondente a $Ly = b$, cuja solução é trivial, como descrito na seção anterior (3.4), pois se trata de um sistema triangular. Obtém-se assim o vetor y . Em seguida, é possível resolver o sistema $Ux = y$, também de maneira trivial, obtendo-se finalmente o valor do vetor x desejado. Por vezes, a presença de elementos iguais a zero na diagonal principal da matriz U impede que a decomposição seja feita. Para solucionar o problema, esses elementos são substituídos por valores muito pequenos (iguais ao erro aceitável), chegando a uma solução próxima à que se obteria originalmente.

3.6 Newton modificado com decomposição LU

É possível aproveitar uma propriedade da resolução de sistemas lineares pela DLU para acelerar ainda mais a otimização através do método de Newton modificado. Em um sistema do tipo $Ax = b$, uma mesma decomposição LU da matriz A pode ser utilizada para resolver o sistema com diferentes vetores b . Isso ocorre porque, diferentemente do método da eliminação de Gauss, as operações de decomposição não afetam o vetor de termos independentes.

Isso significa que, no sistema $H\Delta d = \nabla_d L$, uma mesma decomposição LU da Hessiana pode ser utilizada para diferentes gradientes. Ou seja, nas n iterações em que a matriz Hessiana for mantida a mesma. Desta forma, economiza-se não

apenas o cálculo da matriz como também sua decomposição, bastando em cada iteração resolver dois sistemas triangulares.

3.7 Java

A linguagem de programação Java foi desenvolvida na década 90 e possui uma sintaxe similar a C, C++ e C#. Por suportar o paradigma orientado a objetos, permite uma programação melhor estruturada e genérica, além de facilitar a reutilização de componentes (DEITEL; DEITEL, 2010).

Além disso, a linguagem possui ampla portabilidade, já que é interpretada pela Java Virtual Machine (JVM), que possui versões para a maioria das plataformas mais comumente utilizadas, principal motivo para a sua escolha na implementação do *software* desenvolvido nesse trabalho.

3.8 NetBeans IDE

De acordo com a Oracle (2018), o NetBeans IDE é um ambiente de desenvolvimento integrado gratuito e de código aberto, sendo considerado a IDE oficial do Java 8. Seu foco é a linguagem Java, mas também possui suporte robusto para C/C++ e PHP, além de editores e ferramentas para XML, HTML, Groovy, Javadoc, JavaScript, JSP e, mediante a adição de *plugins*, uma série de outras linguagens.

Por ser em Java o NetBeans é multiplataforma e oferece, entre suas funcionalidades, editor de texto, gerenciador de projetos e ferramentas avançadas de depuração. Permite também o desenvolvimento de interface gráfica com o usuário de maneira bastante simples, rápida e intuitiva através de comandos de “arrastar e soltar” componentes, tabelas para edição de propriedades e eventos de objetos, árvore de componentes e geração automática de código.

A IDE foi escolhida tanto por ter sido utilizada nos projetos anteriores (indiano e batelada) como por suas facilidades e integração com Java, tornando mais ágil o desenvolvimento e manutenção do código, facilitando também a correção de erros.

4 Software desenvolvido

O *software* desenvolvido foi construído com base em uma reestruturação do *software* do biodigestor indiano e permite que o usuário forneça informações acerca da sua demanda diária de biogás, bem como os horários/pico de consumo. Com base nelas, e no modelo de biodigestor selecionado pelo usuário, são calculados e exibidos em uma nova janela todos os parâmetros descritos no Capítulo 2. A seguir, são detalhadas e ilustradas as entradas e saídas do aplicativo.

4.1 Entrada de dados

Na tela principal de entrada de dados, o usuário informa, através de uma caixa de combinação, o modelo de biodigestor de sua preferência e o tipo de resíduo com que o biodigestor será alimentado. São informados também, em caixas de edição de texto, o número de pessoas que irão utilizar o biogás para cozinhar, o número de lampiões, a quantidade de horas de uso desses lampiões, o número de pessoas que usarão o chuveiro e, através de uma tabela, a quantidade, potência e horas de uso de motores. Com tais informações posteriormente será calculada a demanda diária de biogás.

Ao informar a frequência, em dias, de retirada dos resíduos, a interpretação do valor apresentado depende do modelo de biodigestor selecionado. Caso seja um biodigestor contínuo (indiano ou chinês), o valor corresponde ao tempo de retenção da biomassa, ou seja, o tempo transcorrido desde que uma determinada porção de biomassa é inserida no biodigestor até o momento em que é retirada na caixa de saída. Caso seja o modelo batelada, corresponde ao Período Base para Cálculo (PBC), conforme descrito em Ortolani, Benincasa e Junior (1991).

Por fim, o usuário informa a pressão máxima necessária (maior pressão exigida pelos equipamentos que farão uso do biogás) em metros de coluna de água e o pico de consumo, em metros cúbicos de biogás. Todas essas entradas são comuns aos três modelos de biodigestor e são ilustradas na Figura 4.

Figura 4 – Entrada de dados para os três biodigestores

Dados

Tipo de biodigestor: Indiano

Tipo de resíduo: Exemplo (K = 2,5)

Número de pessoas que irão cozinhar: 5

Número de lâmpadas: 6

Tempo [horas] de uso dos lâmpões: 4

Número de pessoas que usarão o chuveiro: 5

Frequência [dias] de retirada dos resíduos: 50

Pressão máxima [m.c.a] = 0.15

☒ Informar horários: Horários de uso dos equipamentos ☐ Informar pico de consumo [m³]:

Motores

Quantidade: 1

Potência (HP)	Horas de uso
5	1

Fonte: Elaborada pelo autor

O valor do pico de consumo pode ser informado diretamente, através de uma caixa de edição de texto, ou calculado pelo programa utilizando os dados preenchidos em uma tabela correspondentes aos períodos de uso dos equipamentos que demandam biogás. Os períodos podem ser informados iniciando-se em qualquer horário, mas devem ser ordenados de maneira consecutiva e ao final devem cobrir as 24 horas do dia. A tabela de preenchimento é apresentada na Figura 5.

Figura 5 – Tabela de horários de uso dos equipamentos

Digite as informações de uso de equipamentos em diferentes intervalos de tempo

Horario inicio (h)	Horario fim (h)	Motores em uso	Chuveiros em u...	Lâmpões acesos	Fogões em uso
22	5	0	0	0	0
5	6	1	0	2	1
6	9	0	0	0	0
9	12	0	0	0	1
12	17	0	0	0	0
17	19	0	5	6	1
19	22	0	0	8	0

Fonte: Elaborada pelo autor

No caso do biodigestor batelada, algumas informações extras devem ser fornecidas: o Período Útil de Fermentação (PUF) e o Período Efetivo de Produção (PEP), ambos em dias; o percentual de sólidos totais presentes nos resíduos coletados da propriedade rural; o percentual de sólidos totais finais, ou seja, a concentração de sólidos que deverá estar presente no substrato que alimentará o biodigestor; e o rendimento, em metros cúbicos por quilograma, da biomassa durante o PEP. As caixas de texto e indicações para o preenchimento dessas informações se tornam visíveis quando o biodigestor batelada é selecionado, como mostra a Figura 6.

Figura 6 – Entradas específicas do biodigestor batelada

Ajuda

Dados

Tipo de biodigestor: Batelada

Número de pessoas que irão cozinhar: 8 PUF [dias]: 150

Número de lampiões: 4 PEP [dias]: 105

Tempo [horas] de uso dos lampiões: 4 Sólidos totais [%]: 85.5

Número de pessoas que usarão o chuveiro: 14 Sólidos totais final: 8

Frequência [dias] de retirada dos resíduos: 65 Rendimento [m³/kg]: 0.15

Pressão máxima [m.c.a.] = 0.2

Executar Fechar ☐ Informar horários: Horários de uso dos equipamentos

☒ Informar pico de consumo [m³]: 10

Exemplo

Motores

Quantidade: 0

Potência (HP)	Horas de uso

Fonte: Elaborada pelo autor

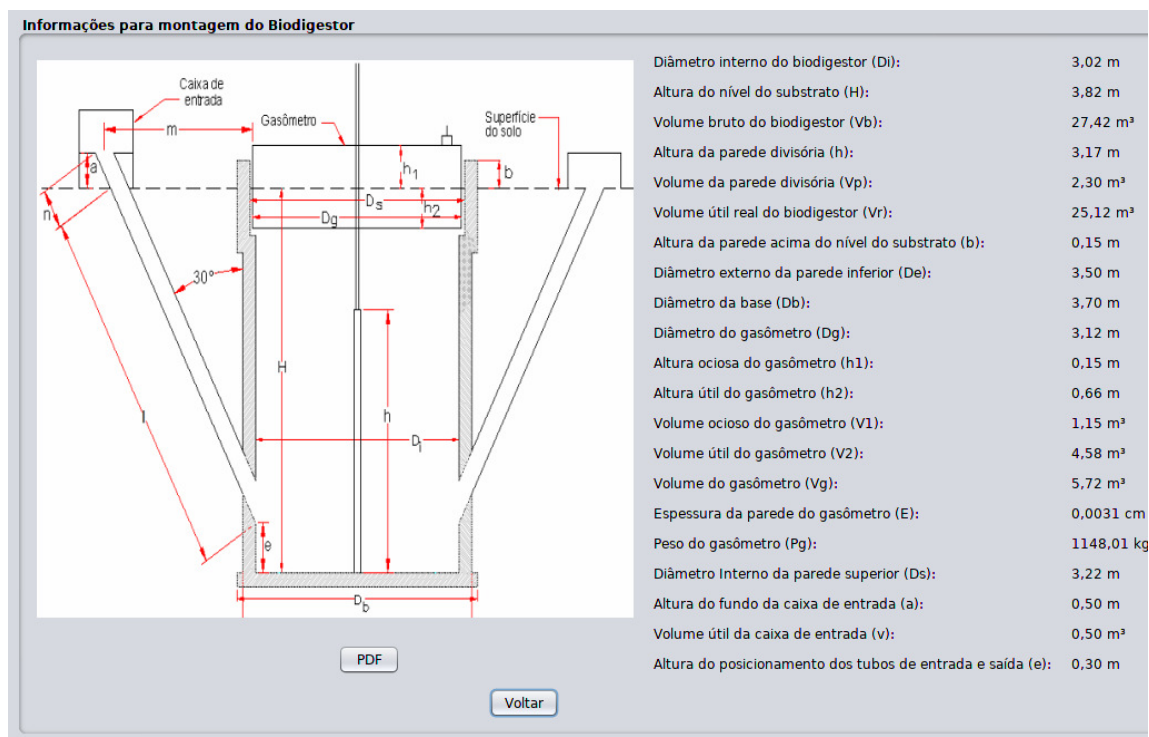
O botão “Exemplo”, tanto na janela principal de entrada de dados quanto na tabela de horários, preenche os campos com os dados dos exemplos de aplicação descritos em Ortolani, Benincasa e Junior (1991). Vale ressaltar que os dados de entrada são os mesmos para o exemplo do indiano e do chinês, mas diferente para o modelo batelada (incluindo os dados comuns aos dois modelos).

Após o preenchimento dos dados, basta clicar no botão executar para que os cálculos sejam realizados e os resultados exibidos na janela de saída, descrita e ilustrada a seguir.

4.2 Saída de dados

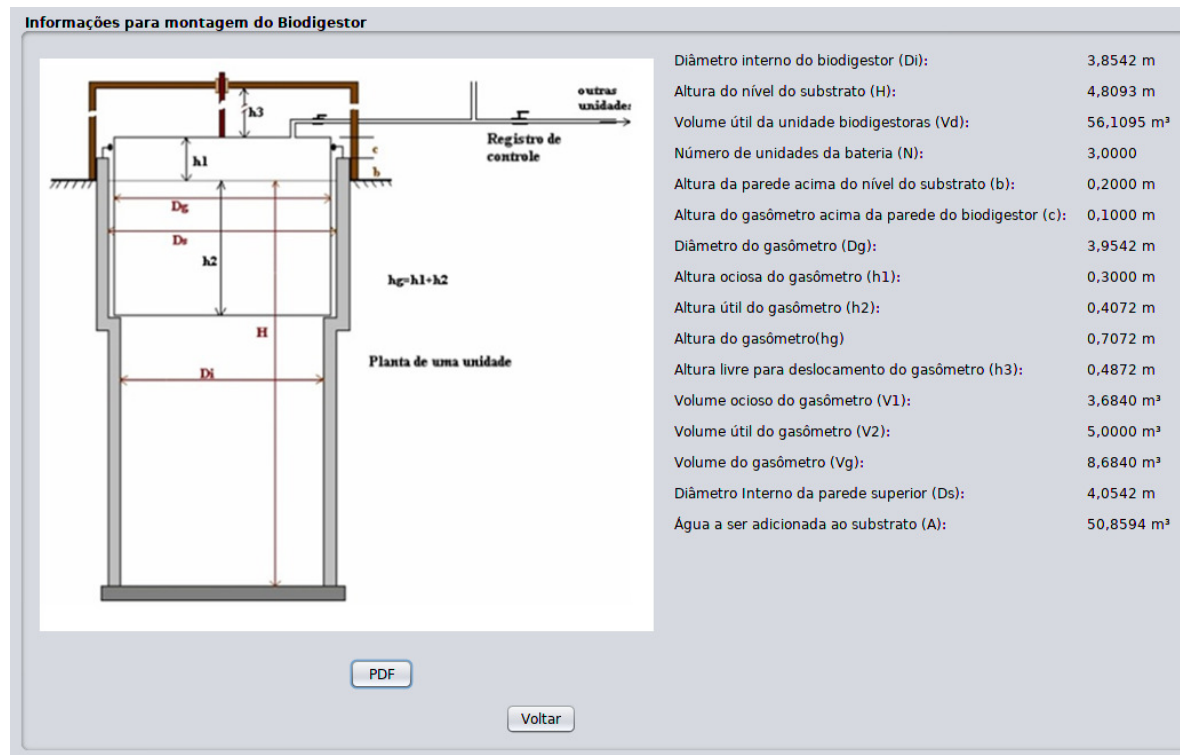
A janela de saída exibe uma imagem esquemática fixa de um biodigestor do modelo selecionado e, ao lado, os respectivos valores dos parâmetros calculados. Abaixo da imagem, o botão “PDF” permite que o usuário gere um arquivo em formato PDF com os dados presentes no formulário. Dessa forma, torna-se mais fácil que os dados sejam impressos e estejam disponíveis em locais onde não seria conveniente portar um computador. As Figuras 7, 8 e 9 ilustram, respectivamente, as janelas de saída dos biodigestores indiano, batelada e chinês.

Figura 7 – Saída para o biodigestor indiano



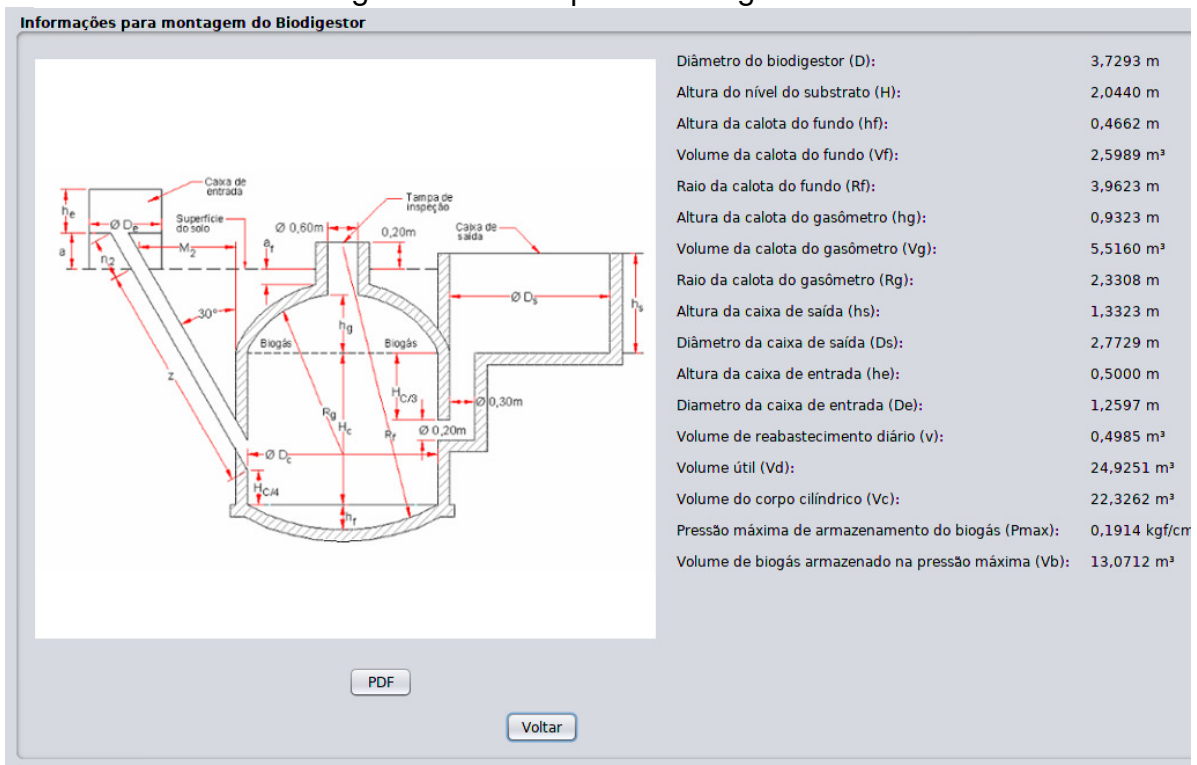
Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 8 – Saída para o biodigestor batelada



Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 9 – Saída para o biodigestor chinês



Fonte: Elaborada pelo autor

5 Resultados e discussão

5.1 Parâmetros calculados

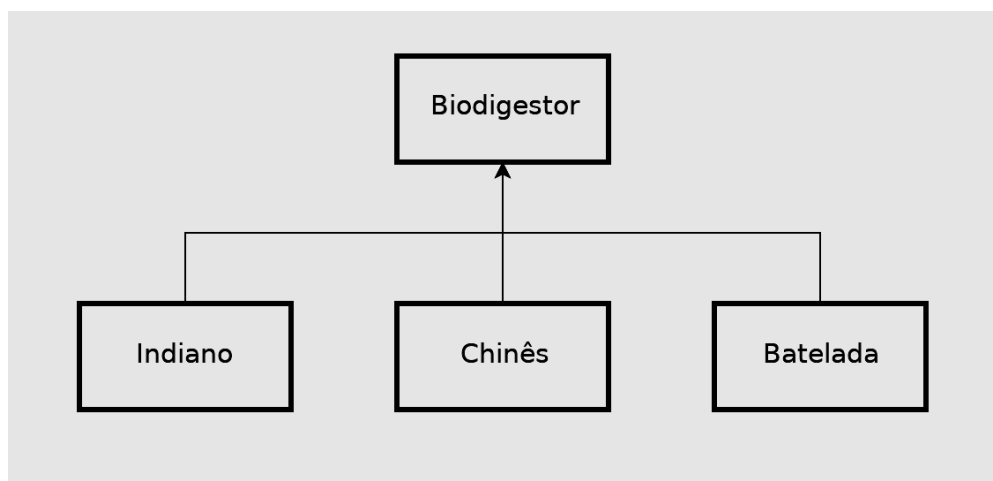
Considerando a solução do sistema linear pelo método de Gauss com pivotamento parcial sem trocas de linhas, o estudo de caso apresentando por Ortolani, Benincasa e Junior (1991) e o biodigestor chinês, pode-se dizer que os valores dos parâmetros obtidos pelo *software* desenvolvido correspondem a um volume de 24,925 m³, sendo menor e, portanto, melhor do que aqueles apresentados em Ortolani, Benincasa e Junior (1991) (25,033 m³) e em Florentino (2003) (25,007 m³), e semelhante ao valor obtido por Souza (2016) (24,929 m³).

Deve-se destacar que os resultados obtidos para os biodigestores indiano e batelada utilizando este mesmo método são os obtidos, respectivamente, em Massola (2015) e Alvarez (2016).

5.2 Implementação

Em termos de implementação, o *software* foi estruturado para realizar os cálculos de otimização das dimensões de um biodigestor genérico, representado por uma classe abstrata que possui uma função objetivo, m restrições representadas por inequações e n restrições de igualdade. Cada modelo de biodigestor, por sua vez, é representado por uma classe concreta que herda a classe abstrata, conforme representado pela Figura 10.

Figura 10 – Biodigestor abstrato e classes concretas



Fonte: Elaborada pelo autor

Cada classe concreta define também um conjunto de parâmetros associados ao biodigestor em questão e implementa um método que calcula esses parâmetros a partir do resultado da otimização. Essa estruturação facilita a compreensão do programa, bem como seu desenvolvimento, manutenção, reutilização de código e extensão.

Com isso, torna-se simples, por exemplo, adicionar outros modelos de biodigestor, bastando criar uma nova classe concreta que herde a classe abstrata “biodigestor” e implemente os métodos que ela exige, não sendo necessário modificar nenhum dos métodos de otimização. Por outro lado, e por consequência, também não é necessário se preocupar com a implementação concreta de cada biodigestor caso se queira modificar os métodos de otimização. Isso facilitou muito a análise comparativa entre os métodos de GPP, DLU e Newton modificado com DLU, que será apresentada na seção 5.3.

Não é necessário nem mesmo modificar a exibição da saída caso sejam adicionados outros modelos ou os parâmetros desses sejam modificados, já que essa também é feita de maneira genérica, carregando a imagem cujo arquivo é informado pela variável *nomeImagem* e exibindo em *labels* os parâmetros calculados no formato indicado nos objetos da classe interna *Parametro*, ambos presentes na classe abstrata “biodigestor”.

5.3 Comparação entre os métodos

Na Tabela 1, são comparados os tempos de execução, em milissegundos, para o cálculo dos parâmetros dos três modelos de biodigestores, com os três métodos propostos. Os dados de entrada utilizados são aqueles apresentados em Ortolani, Benincasa e Junior (1991).

Nesta Tabela 1, a sigla “GPP” identifica o método da eliminação de Gauss com pivotamento parcial sem troca de linhas e “DLU(n)” identifica o método de Newton modificado com decomposição LU mantendo a mesma matriz Hessiana por n iterações. Quando $n = 1$, o método de Newton modificado é o método de Newton comum, já que a matriz Hessiana é recalculada a cada iteração.

Quadro 1 – Tempos de execução para os três modelos e métodos

	Indiano	Chinês	Batelada
GPP	21	39	6138
DLU(1)	24	43	142
DLU(2)	19	50	50
DLU(3)	15	72	28
DLU(4)	5979	26	5
DLU(5)	180	74	7
DLU(6)	62	131	41
DLU(7)	12	30	10
DLU(8)	14	34	8
DLU(9)	130	55	313
DLU(10)	11	66	38

Fonte: Elaborada pelo autor

Os números indicados em vermelho são aqueles que não seguiram o padrão de normalidade apresentado na maioria dos casos, levando mais de um segundo para chegar no valor ótimo. Depurando a execução da otimização, foi possível constatar que isso ocorreu porque alguns sistemas lineares, no interior do método de Newton, não tinham solução, provavelmente devido a problemas de mal condicionamento e erros de arredondamento que podem surgir no método PDBL quando o ponto ótimo se aproxima.

Os números em verde são os menores tempos encontrados para cada modelo de biodigestor, e os números em azul indicam os tempos do método que apresentou o menor tempo médio para os três modelos. Nesse caso, foi o método de Newton modificado com DLU e $n = 7$, com tempo médio de aproximadamente 17,33 milissegundos. Por isso, esse método foi o adotado na versão final do *software* desenvolvido.

6 Considerações finais

Esse trabalho reuniu e aprimorou as aplicações desenvolvidas por Massola (2015) e Alvarez (2016) e complementou o sistema de Souza (2016) com a resolução do problema utilizando o método PDBL. Assim, criou-se um *software* único, gratuito e de código aberto para o dimensionamento dos três principais modelos de biodigestores em uso no contexto brasileiro.

Além dessa unificação e aprimoramento de *software*, este trabalho resolveu o sistema linear do método PDBL considerando: a) o método de Gauss com pivotamento parcial sem troca de linhas, b) o método da decomposição LU e, c) o método aqui denominado de Newton modificado, que resolve o sistema linear por decomposição LU mantendo a matriz Hessiana fixa por n iterações. Esta etapa do desenvolvimento foi realizada visando comparar o tempo de execução de cada método, visto que a resolução do sistema linear é o ponto mais delicado da metodologia adotada neste projeto.

O *software* foi desenvolvido de forma a facilitar a sua modificação e expansão, permitindo que futuramente novas possibilidades sejam testadas, tanto em relação à adição de outros modelos de biodigestores quanto ao teste de outros métodos para resolução do problema de otimização.

Além disso, o método de Newton modificado com DLU proposto demonstrou ser funcional e apresentou resultados positivos, com desempenho superior ao método de GPP e ao método de Newton comum com DLU. Assim, a eficiência do *software* foi aprimorada e abre-se a possibilidade para que o método proposto seja testado em outras aplicações envolvendo programação não linear.

Todas essas possibilidades, tanto em relação a outros modelos de biodigestor quanto em relação a outros métodos de resolução do problema de otimização, podem ser exploradas em trabalhos futuros.

REFERÊNCIAS

- ALVAREZ, I. L. Software para construção de biodigestores do modelo batelada. Monografia (Bacharelado em Ciência da Computação), Faculdade de Ciências, Universidade Estadual Paulista, Bauru, 2016.
- BAPTISTA, E.C.; BELATI, E.A.; SOUSA V.A. and COSTA G.R.M. Primal-Dual Logarithmic Barrier and Augmented Lagrangian Function to the Loss Minimization in Power Systems. *Electric Power Components and Systems*, 34:7, 775-784, 2006.
- BAZARAA, M. S.; SHERALI, H. D.; SHETTY, C. M. Nonlinear programming theory and algorithms. Hoboken: John Wiley & Sons, 2006.
- DEITEL, H. M.; DEITEL, P. J. Java: Como Programar, 6. ed. São Paulo: Prentice Hall, 2010.
- FLORENTINO, H. O. Mathematical tool to size rural digesters. *Scientia Agricola, SciELO Brasil*, v. 60, n. 1, p. 185–190, 2003.
- FRANCO, N. B. Cálculo numérico. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2006.
- MASSOLA, W. C. Uso da programação não linear para o dimensionamento de biodigestores indianos. Monografia (Bacharelado em Ciência da Computação), Faculdade de Ciências, Universidade Estadual Paulista, Bauru, 2015.
- ORACLE. NetBeans IDE 8.0.2 Information. 2018. Disponível em: <<https://netbeans.org/community/releases/80/>>. Acesso em 20 de março de 2018.
- ORTOLANI, A. F.; BENINCASA, M.; JUNIOR, J. L. Biodigestores rurais: modelos indiano, chinês e batelada. Jaboticabal, FUNEP, 1991.
- PORTES, Z. A.; FLORENTINO, H. O. Aplicativo computacional para projetos e construções de biodigestores rurais. *Energia na Agricultura, Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista*, v. 21, n. 1, p. 118–138, 2006.
- SOUZA, M. B. Desenvolvimento de um software para dimensionamento de biodigestores do modelo chinês. In: Congresso de Iniciação Científica da UNESP. [S.l.: S.n.], 2016. Disponível em: <http://prope.unesp.br/cic_isbn/> Acesso em 20 de março de 2018.