

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA – UFU
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA



**OS EFEITOS DA TEMPERATURA NA PRODUÇÃO DE
BIOGÁS EM BIODIGESTORES**

Mariana Nalesto Gonçalves

Uberlândia - MG

2018

Mariana Nalesto Gonçalves

**OS EFEITOS DA TEMPERATURA NA PRODUÇÃO DE
BIOGÁS EM BIODIGESTORES**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Área de concentração: Fontes Alternativas de Energia

Orientador: José Roberto Camacho, PhD. Prof.

Uberlândia - MG

2018

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da UFU, MG, Brasil.

G635e Gonçalves, Mariana Nalessio, 1993-
2018 Os efeitos da temperatura na produção de biogás em biodigestores /
Mariana Nalessio Gonçalves. - 2018.
76 f. : il.

Orientador: José Roberto Camacho.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia,
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.
Disponível em: <http://dx.doi.org/10.14393/ufu.di.2018.1165>
Inclui bibliografia.

1. Engenharia elétrica - Teses. 2. Biodigestores - Teses. 3. Biogás -
Teses. 4. Metano - Teses. I. Camacho, José Roberto. II. Universidade
Federal de Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Elétrica. III. Título.

CDU: 621.3

Maria Salete de Freitas Pinheiro – CRB6/1262

OS EFEITOS DA TEMPERATURA NA PRODUÇÃO DE BIOGÁS EM BIODIGESTORES

Dissertação aprovada para a obtenção do título de Mestre no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia, pela banca examinadora.

Uberlândia, 28 de junho de 2018.

José Roberto Camacho, PhD. Prof.

Orientador

José Rubens Macedo Junior, PhD. Prof.

Coordenador da Pós-Graduação

*Dedico essa dissertação aos meus pais e ao meu
irmão, por todo amor, carinho e suporte que sempre
me deram.*

Agradecimentos

Agradeço aos meus pais Joel e Eliane, e ao meu irmão Lucas, por sempre estarem ao meu lado, apoiando as minhas escolhas, me fortalecendo e me iluminando.

Agradeço ao meu orientador José Roberto Camacho, por toda a sabedoria e disponibilidade que ofereceu durante o desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço ao meu namorado, por toda a paciência que teve com o meu mau humor e as noites sem dormir preocupada com as simulações e a dissertação, e por todo o amor que dispôs em todo esse período tão estressante.

Agradeço aos meus amigos Iasmin, Caetano, Kenepher, Bianca, Leonardo e Ludimila, pelo apoio e pelos momentos de descontração.

Agradeço aos meus colegas de laboratório, Débora, Ana Camila, Laiz e Adelicio, pelos cafezinhos e longos momentos de desabafos no NUPEA.

Agradeço aos meus primos, tios e às minhas avós por todo o amor e o apoio que me ofereceram. Agradeço em especial à Tia Silvia, que, infelizmente, não pôde acompanhar o resultado deste projeto, mas que sempre esteve tão presente, sempre tão carinhosa e cuidadosa.

Agradeço, por fim, à CAPES pelo auxílio financeiro através concessão da minha bolsa de estudos.

Resumo

A utilização dos Biodigestores para o tratamento de resíduos por biodigestão anaeróbica tem como vantagens a produção de biogás e fertilizantes, facilidade de implantação e simplicidade operacional. A produção de biogás através da reciclagem de matéria orgânica, além de solução para o descarte de resíduos, tornou-se economicamente custo-efetiva. Neste trabalho são apresentados os tipos mais comuns de biodigestores, os aspectos gerais da biodigestão anaeróbica, os modelos cinéticos para obtenção dos parâmetros que regem este processo, e por fim, foi feita uma análise da influência da temperatura em um destes parâmetros, a taxa máxima de crescimento dos microrganismos, e o impacto das variações de temperatura no processo de produção de biogás. Os cálculos foram feitos com o auxílio do software Octave, e os resultados são apresentados em uma interface gráfica, construída pela própria autora.

Palavras-chave: Biodigestores, Biogás, Temperatura de Produção de Metano.

Abstract

The use of Biodigesters for the treatment of residues by anaerobic biodigestion has as advantages the production of biogas and fertilizers, ease of implantation and operational simplicity. The production of biogas through the recycling of organic matter, as well as a solution for waste disposal, has become economically cost-effective. In this work the most common types of biodigesters, the general aspects of anaerobic biodigestion, the kinetic models to obtain the parameters that govern this process are presented, and finally, an analysis of the influence of the temperature in one of these parameters, the maximum specific growth rate, and the impact of temperature variations on the biogas production process was studied. The calculations were made with the aid of Octave software, and the results are presented in a graphic interface, built by the author herself.

Lista de Ilustrações

Figura 1 - Representação tridimensional de um biodigestor indiano.....	14
Figura 2 - Representação tridimensional de um biodigestor chinês.....	15
Figura 3 - Representação de um biodigestor canadense.....	16
Figura 4 - Biodigestor modelo BioKohler.....	17
Figura 5 - Biodigestor modelo batelada	18
Figura 6 - Etapas da biodigestão anaeróbica	23
Figura 7 - Variação de temperatura de um solo arenoso e um argiloso, sem cobertura, ao longo de um dia.	27
Figura 8 - Perfil de temperatura de um latossolo desnudo.	29
Figura 9 – Gráfico dos efeitos da temperatura na Taxa Máxima de Crescimento dos Microrganismos.....	43
Figura 10 - Captura de tela do software desenvolvido pelo autor.....	46
Figura 11 - Captura de tela da simulação com os dados de O'Rourke para Santa Maria – RS.	55
Figura 12 - Captura de tela da simulação com os dados de O'Rourke para Uberlândia - MG.....	56
Figura 13 - Captura de tela da simulação com os dados de O'Rourke para Sobral – CE.	57

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Constantes cinéticas para a fermentação de substratos complexos.....	41
Tabela 2 - Taxa máxima de crescimento dos microrganismos.....	50
Tabela A - Resultados obtidos na simulação do experimento de O'Rourke.....	66

Lista de Siglas

DQO – *Demanda Química de Oxigênio*

SV – *Sólidos Voláteis*

COD – *Carbono Orgânico Degradável*

CNTP – *Condições Normais de Temperatura e Pressão*

TRH – *Tempo de Retenção Hidráulica*

AGV – *Ácidos Graxos Voláteis*

PVC – *Policloreto de Vinila*

Sumário

Sumário.....	10
CAPÍTULO 1	12
Introdução	12
1.1 Contextualização	12
1.2 Tipos de Biodigestores	13
1.3 Problematização	19
1.4 Objetivos	20
1.5 Estrutura do Trabalho.....	20
CAPÍTULO 2	22
A Biodigestão Anaeróbica	22
2.1 Fundamentos da Biodigestão Anaeróbica	22
2.2 Efeitos dos Fatores Ambientais.....	23
2.3 Dependência da Temperatura.....	25
2.4 Comportamento Térmico do Solo.....	27
CAPÍTULO 3	30
Cinética da Fermentação.....	30
3.1 Biodegradabilidade do Substrato	30
3.2 Modelos Cinéticos de Fermentação	31
CAPÍTULO 4	40
Metodologia	40
4.1 Origem dos Dados Analisados	40
4.2 Considerações.....	41

4.3	Metodologia de Cálculo	42
4.4	Funcionamento do Software.....	45
CAPÍTULO 5		49
	Resultados e Discussão.....	49
5.1	Taxa de Crescimento dos Microrganismos (μm)	49
5.2	Experimento O'Rourke (1968).....	54
5.3	Discussão.....	59
Capítulo 6		61
	Conclusão.....	61
6.1	Sugestões para trabalhos futuros	62
REFERÊNCIAS		63
APENDICE I		66
	Apresentação Detalhada dos Resultados	66
	A. Experimento O'Rourke (1968).....	66

CAPÍTULO 1

Introdução

1.1 Contextualização

Os primeiros registros da descoberta do metano vêm do ano de 1776, e era conhecido como "gás dos pântanos". A descoberta é atribuída ao físico italiano Alessandro Volta. No século XIX, Louis Pasteur começou a estudar a possibilidade de utilizar este gás como combustível.

Os primeiros sinais da criação dos biodigestores são da Índia e da Inglaterra, aproximadamente na mesma época, por volta de 1857. Em Bombain, na Índia, o biodigestor foi construído com a finalidade de alimentar um hospital, e em Exter, Inglaterra, o combustível era destinado à iluminação pública (Soares & Da Silva, 2010).

A recuperação do gás de aterros sanitários tem sido praticada há bastante tempo, mas o gás era captado e queimado em flares apenas com o objetivo de evitar explosões. A partir da década de 70, passou-se a utilizá-lo em grande escala para produzir calor e energia elétrica, ou distribuí-lo para a população através de dutos. Apenas após esse período foi que os esforços se direcionaram a aumentar a produção do biogás gerenciando os aterros sanitários (Gunnerson & Stuckey, 1986).

No Brasil, os biodigestores só ganharam visibilidade após a crise do petróleo na década de 70, principalmente no setor rural, utilizando-se resíduos da agropecuária para alimentar os sistemas.

Os biodigestores são equipamentos que aceleram o processo de decomposição da matéria orgânica, e possibilitam a reutilização dos produtos resultantes desse processo, que são o biogás e os biofertilizantes.

“Biodigestor é um tanque protegido do contato com o ar atmosférico, onde a matéria orgânica contida nos efluentes é metabolizada por bactérias anaeróbias (que se desenvolvem em ambiente sem oxigênio). Neste processo, os subprodutos obtidos são o gás (Biogás), uma parte sólida que decanta no fundo do tanque (Biofertilizante), e uma parte líquida que corresponde ao efluente mineralizado (tratado).”

[<http://www.iengep.com.br> – Artigo: Biodigestores, 2012. Acesso em setembro de 2017]

O biogás é composto majoritariamente por metano, com cerca de 60% da composição, 35% de dióxido de carbono e 5% de outros gases como hidrogênio, nitrogênio e amônia (Wereko-Brobbey & Hagen, 2000).

Estes equipamentos têm sido amplamente utilizados como solução para os problemas ambientais de descartes de resíduos sólidos orgânicos. As principais matérias primas utilizadas são resíduos da lama de esgoto, dejetos de animais e resíduos da agricultura. O sistema de tratamento de esgoto da cidade de Uberlândia - MG, por exemplo, conta com uma cadeia de Reatores Anaeróbicos de Fluxo Ascendente (RAFA), composto por 12 Biodigestores com capacidade de 5 mil m³. Os resíduos de lodo que também são produzidos nesse processo são transferidos ao Aterro Sanitário da cidade.

A utilização dos Biodigestores para o tratamento de dejetos por digestão anaeróbica apresenta diversas vantagens como a simplicidade operacional, produção de biofertilizantes e a produção de biogás em substituição do GLP.

1.2 Tipos de Biodigestores

Os biodigestores são equipamentos de fabricação simples e se dividem quanto ao tipo de construção e quanto ao tipo operação.

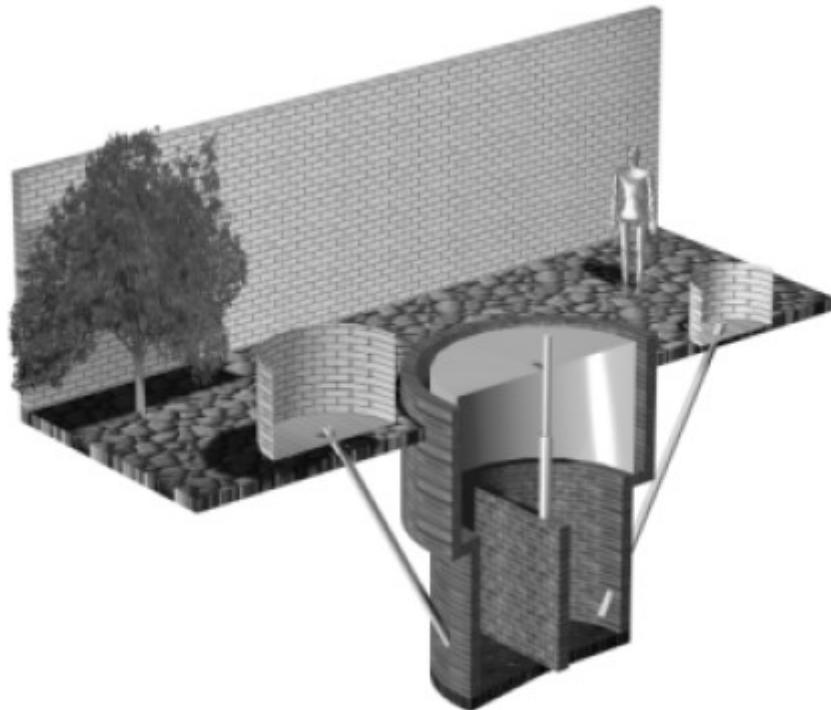
Os tipos de operação dos biodigestores são classificados como contínuos, onde o sistema é mantido fechado durante todo o processo, e de batelada, onde a matéria prima é inserida periodicamente no sistema.

Os tipos de construção mais comuns são o indiano, o chinês e de lona, também conhecido como modelo da marinha ou canadense.

1.2.1 Biodigestor Modelo Indiano

O modelo indiano, na Figura 1, é caracterizado por possuir uma campânula na parte superior do sistema, que funciona como gasômetro, onde o gás produzido se acumula. A campânula é móvel, e se movimenta a medida que o volume de gás aumenta ou quando este é consumido. A pressão do gás é determinada pelo peso da campânula, e variando-o, pode-se conservar a pressão na saída quase uniforme.

Figura 1 - Representação tridimensional de um biodigestor indiano.



Fonte: Deganutti, *et. al.* (2008)

Seixas (1981) descreve o tipo de material a ser inserido no sistema como homogêneo. A matéria orgânica que possuir composição não homogênea deverá ser

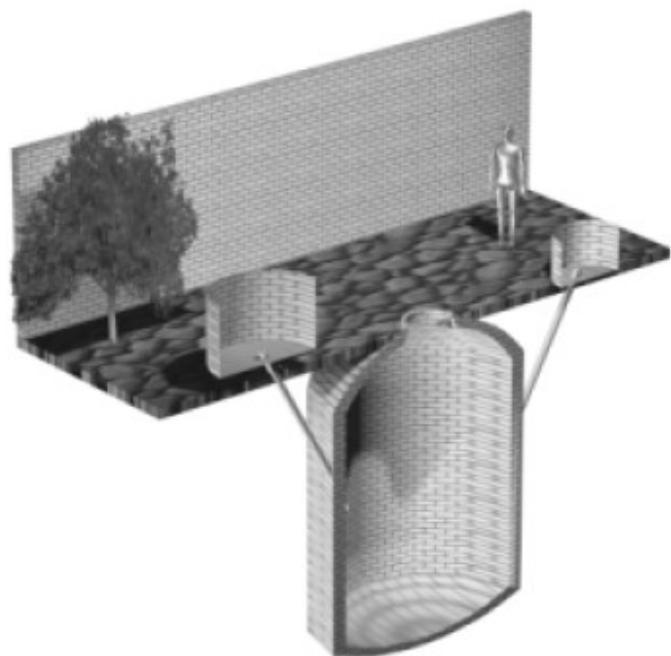
triturada para evitar o entupimento de canos de entrada e saída de material. Deganutti (2008) afirma que o resíduo deverá apresentar uma concentração de sólidos totais inferior a 8%.

A alimentação do sistema deve ser continua, e o tamanho do sistema e a carga diária determinam o tempo de digestão. Sua construção é relativamente simples, e pode ser montado pelo próprio usuário. Seixas (1981) afirma que a desvantagem do sistema indiano são as perdas de calor pela câmara de gás metálica.

1.2.2 Biodigestor Modelo Chinês

O biodigestor chinês, na Figura 2, diferentemente do indiano, não possui partes móveis. Sua construção é completamente rígida e subterrânea. É formado por uma câmara cilíndrica para fermentação e a parte superior é uma abobada impermeável, onde o gás é armazenado. Sua concepção completamente enterrada faz com que o seu isolamento natural seja melhor que o modelo indiano (Seixas, 1981).

Figura 2 - Representação tridimensional de um biodigestor chinês.



Fonte: Deganutti, *et. al.* (2008)

A pressão do gás não é constante, e por isso, o sistema exige uma câmara de compensação de volume equivalente ao gás necessário em estoque.

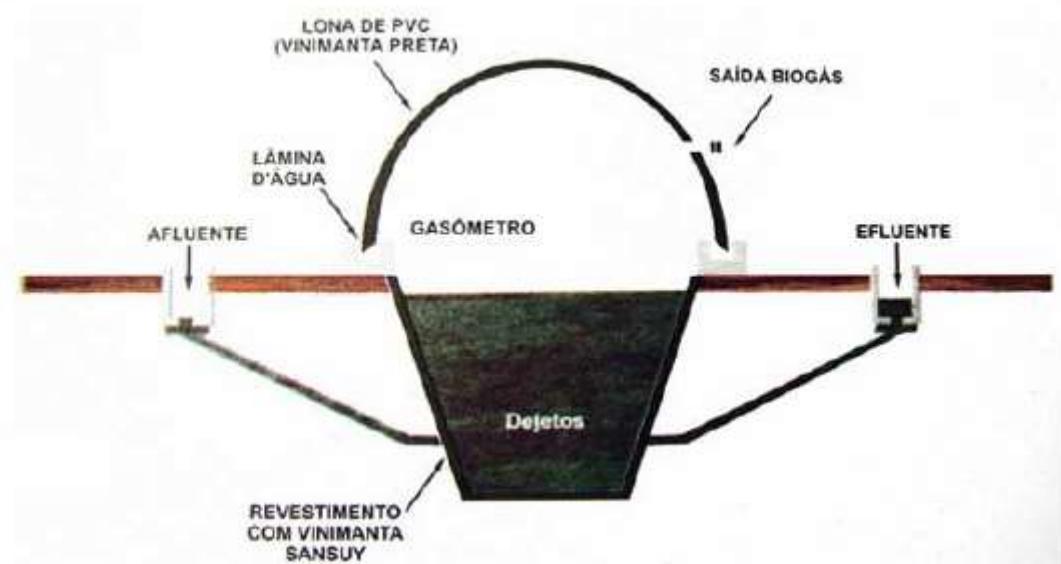
Nesse tipo de construção, entretanto, devem ser tomados cuidados para que o poço seja a prova de água e a abobada à prova de gás, para que não ocorram vazamentos (Seixas, 1981).

O fornecimento de matéria orgânica deve ser contínuo, e assim como no modelo indiano, a concentração de sólidos totais também não deve ser superior a 8%.

1.2.3 Biodigestor Modelo Canadense

O modelo canadense, ou de lona, na Figura 3, é o mais utilizado nas propriedades rurais do Brasil. Sua concepção é diferente dos modelos indiano e chinês que possuem construção vertical. O modelo de lona é construído horizontalmente, de modo que a sua largura seja maior que a profundidade.

Figura 3 - Representação de um biodigestor canadense



Fonte: Instituto Winrock (2008)

A cobertura do sistema é feita em material plástico maleável, geralmente uma lona de PVC, para aproveitar a exposição ao sol, capaz de inflar a medida que a produção de gás aumenta.

Este modelo, por estar sujeito à exposição solar, é fortemente dependente das mudanças climáticas, podendo sofrer variações consideráveis de temperatura.

1.2.4 Biodigestor de BioKholer

O modelo BioKholer, Figura 4, é relativamente novo e pouco estudado, mas sua utilização vem crescendo principalmente no sul do Brasil.

Figura 4 - Biodigestor modelo BioKohler



Fonte: Tietz, *et. al.* (2014)

A câmara de biodigestão é formada pela união de duas caixas d'água, sendo uma totalmente enterrada, e a outra, posicionada de cabeça para baixo, de modo que o seu

corpo fique fora do solo. O sistema contém uma saída para manutenção, permitindo a abertura da mesma em caso de necessidade. Ambas as caixas têm seu material reforçado em função da pressão hidráulica do líquido e do gás. A câmara de biodigestão é instalada no sentido vertical, conforme a Figura 4, e possui sistema de alimentação intermitente e de fluxo ascendente.

A canalização do biodigestor é construída totalmente subterrânea para proteção do sol, da chuva e de possíveis impactos que venham a danificá-la.

1.2.5 Biodigestor de Batelada

Diferente dos biodigestores apresentados anteriormente que aceitam a inserção de carga a qualquer momento, os sistemas que operam por batelada, Figura 5, são abastecidos uma única vez, e ao final de cada ciclo, o tanque é esvaziado e preparado para receber uma nova quantidade de matéria orgânica.

Figura 5 - Biodigestor modelo batelada



Fonte: Deganutti, *et. al.* (2008)

O sistema pode ser composto por um único tanque, ou vários tanques em série. É um sistema simples e de fácil implantação, ideal para locais cuja matéria orgânica se torna disponível após longos intervalos de tempo.

1.3 Problematização

A crescente necessidade de preservação do meio ambiente vem gerando desafios à comunidade científica, principalmente tratando-se dos processos de tratamento de resíduos poluidores e a possibilidade de utilização dos mesmos como fonte alternativa de energia (Souza, 2007).

Os biodigestores surgiram como uma eficiente alternativa do ponto de vista de saneamento, estimulando a reciclagem de matéria orgânica de todos os tipos, sejam resíduos sólidos urbanos, seja o lodo do esgoto, e ainda resíduos da agricultura e da pecuária.

A produção de biogás através da reciclagem de matéria orgânica tornou-se economicamente custo-efetiva, podendo ser, além de uma solução para os problemas de descartes de resíduos, uma fonte adicional de renda.

A aceitação de altas taxas de carregamento de matéria orgânica e a baixa produção de lodo estão entre as muitas vantagens que os processos anaeróbicos possuem, quando comparados a outras operações de unidades biológicas (Batstone, 2002). Mas a principal característica que fez com que os sistemas anaeróbicos ganhassem visibilidade é a possibilidade de produção de energia elétrica à partir da queima de biogás.

O tratamento anaeróbio dos resíduos é reconhecido mundialmente como um processo que afeta significativamente a redução dos gases de efeito estufa, que reduz, assim, em grande parte o impacto ambiental do crescimento populacional urbano e rural, no que diz respeito à produção de resíduos sólidos (Zohorovic 2016).

Entretanto, as bactérias responsáveis pela degradação da matéria e produção do biogás são extremamente sensíveis a alterações no processo produtivo. Seixas e Marchetti (1981) afirmam que o ambiente favorável ao crescimento desses microrganismos é imprescindível para que ocorra a fermentação da matéria orgânica, e, se houverem alterações em fatores como temperatura e presença de matéria orgânica, a produção e gás sofrerá uma redução.

1.4 Objetivos

Apresentados os tipos de biodigestores mais comuns, o objetivo deste trabalho centra-se no estudo da influência da temperatura nos parâmetros que regem o processo de Biodigestão Anaeróbica, como a taxa de crescimento dos microrganismos e a constante cinética.

A taxa de crescimento dos microrganismos está diretamente relacionada à temperatura do sistema, e interfere na produção de metano. Portanto, o objetivo principal deste trabalho será recalcular a taxa de crescimento dos microrganismos, variando ao longo do ano com a temperatura, e mostrar, por fim, a variação da produção volumétrica de gás.

A análise é feita através de um software desenvolvido em Octave, com interface simples, onde deverão ser inseridos os dados anuais de temperatura do local que se deseja estudar, e alguns parâmetros do biodigestor, como a concentração influente de substrato.

Apresenta-se uma simulação da produção volumétrica de metano ao longo do ano, considerando-se as variações de temperatura em três regiões distintas do país, utilizando o software OCTAVE. O software retorna ainda as taxas máxima e mínima de produção volumétrica que acompanham as temperaturas máxima e mínima do local escolhido pelo usuário.

1.5 Estrutura do Trabalho

O trabalho é dividido em 6 capítulos, de modo que:

- Capítulo 1: Introdução, onde serão apresentados os aspectos gerais sobre o tema e sobre o trabalho.
- Capítulo 2: A Biodigestão Anaeróbica, onde serão apresentados aspectos específicos sobre o processo de decomposição da matéria orgânica e a sua transformação em metano.
- Capítulo 3: Cinética da Fermentação, onde serão apresentados os modelos de análise dos parâmetros cinéticos que regem o processo de biodigestão anaeróbica.
- Capítulo 4: Metodologia, onde serão apresentados passo a passo todo o procedimento de desenvolvimento do software para realizar as simulações e apresentar os resultados.
- Capítulo 5: Resultados e Discussão, onde serão apresentados os resultados obtidos nas simulações, e suas respectivas discussões.
- Capítulo 6: Conclusões, onde serão apresentadas as conclusões obtidas com todo o estudo realizado.
- Apêndice I, onde serão apresentadas as tabelas mais detalhadas a respeito dos resultados obtidos no experimento.

CAPÍTULO 2

A Biodigestão Anaeróbica

2.1 Fundamentos da Biodigestão Anaeróbica

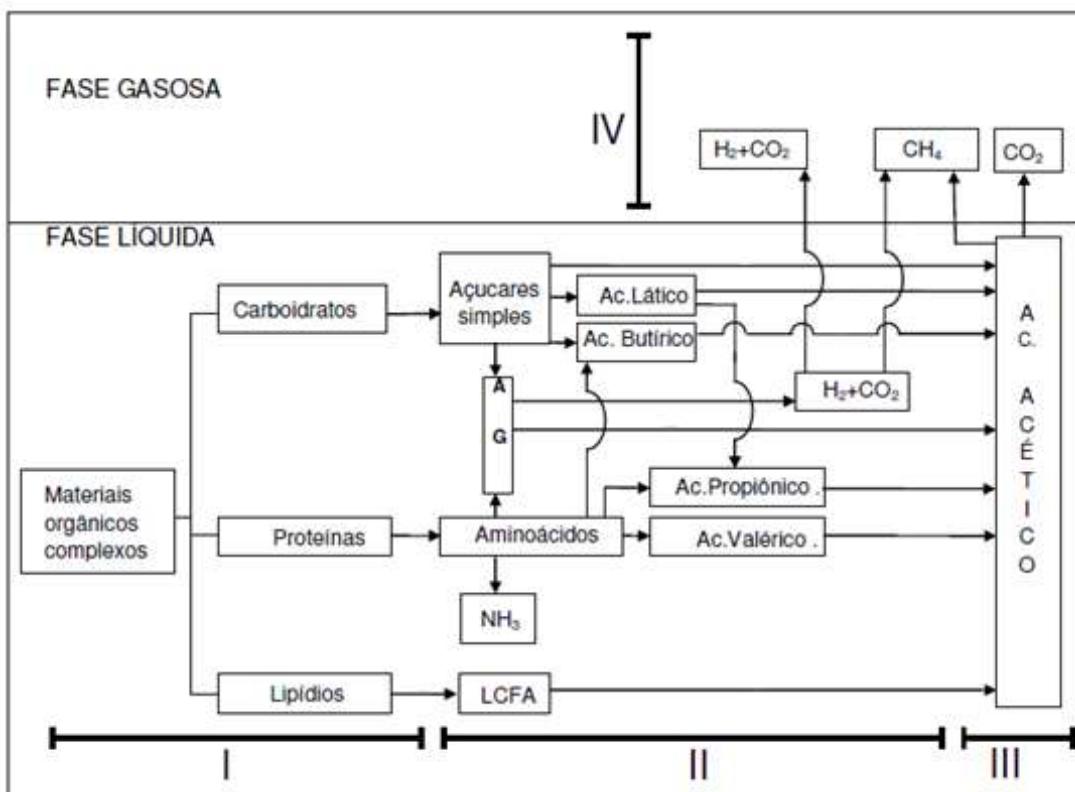
Os microrganismos responsáveis pelo processo de decomposição nos Biodigestores são bactérias anaeróbicas, que atuam na ausência de oxigênio atacando a estrutura de materiais orgânicos complexos, quebrando-os em compostos simples como o metano (CH_4) e o dióxido de carbono (CO_2) (Sanchez, 2005).

A decomposição da matéria depende da interação de três grupos de bactérias: fermentativas, ou acidogênicas, que hidrolisam compostos complexos em componentes simples; acetogênicas, que produzem acetato e hidrogênio; e metanogênicas, que produzem metano e dióxido de carbono (Gunnerson & Stuckey, 1986).

Conforme apresentado na Figura 6, Wayne (2005) divide a biodigestão anaeróbica em quatro etapas:

- Hidrolise (I), onde os polímeros, que são compostos de cadeia mais complexas, como amido e proteína, são transformados em monômeros, que possuem cadeia mais simples como açucares e aminoácidos.
- Acidogênese (II), onde os monômeros são transformados em ácidos graxos voláteis (AGV).
- Acetogênese (III), onde os AGV são convertidos em ácido acético, gás carbônico e hidrogênio.
- Metanogênese (IV), onde, por fim, o ácido acético é transformado em metano e gás carbônico.

Figura 6 - Etapas da biodigestão anaeróbica



Fonte: Balmant (2009)

2.2 Efeitos dos Fatores Ambientais

As bactérias responsáveis pela degradação da matéria e produção do biogás são extremamente sensíveis a alterações no processo produtivo. Seixas e Marchetti (1981) afirmam que o ambiente favorável ao crescimento desses microrganismos é imprescindível para que ocorra a fermentação da matéria orgânica, e, se houverem alterações em fatores como temperatura e presença de matéria orgânica, a produção de biogás sofrerá uma redução.

Gunnerson & Stuckey (1986) descrevem os principais fatores que influenciam o processo produtivo e são passíveis de controle:

- Ph: Os microrganismos necessitam de ph neutro, e outros valores podem afetar seu metabolismo. O processo é severamente inibido se o ph cair abaixo de 6 ou subir acima de 8,3.

- Temperatura: As bactérias metanogênicas são as mais sensíveis a variações de temperatura. Entretanto, todas as bactérias são resistentes a mudanças rápidas de temperatura de até duas horas, sendo capazes de reestabelecer a produção de gás quando a temperatura se normaliza. Tem-se definidas duas regiões ótimas da Biodigestão, a 35°C na faixa mesofílica, que varia de 20 a 40°C, e 55°C na faixa termofílica, que varia de 40 a 60°C.
- Nutrientes: A quantidade mínima de nutrientes deve ser pelo menos acima da quantidade ótima necessária às bactérias metanogênicas, que são as mais severamente inibidas pela falta destes. Porém, o excesso de nutrientes também pode tornar o ambiente tóxico.

O controle de outros fatores como tamanho das partículas, idade do resíduo, presença de agentes inibidores e ausência de oxigênio também são importantes para manter as condições ótimas para o desenvolvimento das bactérias (Zohorovic, et. al., 2016).

Certos cuidados podem ser tomados com a finalidade de aumentar a produção de biogás, como a redução do tamanho das partículas de resíduo inseridas no sistema. Partículas menores possuem uma área de contato com os microrganismos maior. A constante mistura do substrato também contribui para o aumento do contato das bactérias com a matéria.

Alguns autores sugerem realizar um pré tratamento no resíduo com a finalidade de aumentar a biodegradabilidade do substrato. Gunnerson & Stuckey (1986) afirmam que a maioria dos substratos é apenas de 40 a 60% biodegradável, e que métodos de pré tratamento podem elevar esse valor, fazendo com que a produção de gás aumente consideravelmente. Para substratos com uma grande quantidade de lignocelulose refratária, como resíduos de agricultura, o aumento da biodegradabilidade pode chegar a 100%.

Métodos físico-químicos envolvem tratamentos com ácidos ou bases em ambientes de elevadas temperaturas. Apesar desse procedimento apresentar custo elevado, seus resultados podem apresentar um aumento da biodegradabilidade de 100% em resíduos como talos de milho, bagaço de cana e resíduos sólidos municipais (Gunnerson & Stuckey, 1986). Gosset, et.al (1982) demonstraram que o aquecimento do

substrato em condições alcalinas aumentou a produção de metano em 50% quando comparado à produção obtida sem o tratamento termoquímico. Eles afirmam que o efeito do tratamento é dependente da temperatura, da concentração alcalina e da concentração de sólidos utilizada.

Tratamentos físicos, conforme mencionado anteriormente, envolvem o corte ou Trituração do resíduo para aumentar a área de contato com as bactérias digestivas.

Existem ainda pré tratamentos biológicos, que envolvem métodos de compostagem aeróbica. Apesar de reduzir a formação de espuma e aumentar a produção de gás, esse tipo de tratamento também consome parte do substrato orgânico que normalmente é inserido no processo anaeróbico.

2.3 Dependência da Temperatura

O carbono orgânico degradável (COD) é o carbono orgânico que está de fato acessível à decomposição bioquímica (C_0). O COD é um dos parâmetros que pode ser analisado para estimar a produção de biogás em condições anaeróbicas.

O COD pode ser dividido em uma parte C_{0e} , que pode ser dissimilado, e o restante $C_0 - C_{0e}$, que é assimilado ao material celular microbiano. O aumento da temperatura faz com que a taxa de dissimilação cresça mais rápido que a taxa de assimilação. Tabasaran (1982) aproxima essa taxa de dissimilação por:

$$\frac{C_{0e}}{C_0} = 0,014T + 0,28 \quad (2.1)$$

onde T é a temperatura na zona anaeróbica, em graus Celsius.

A 35°C, quase 80% do COD pode ser dissimilado e convertido em biogás, contendo aproximadamente 50% de seu volume de Metano (Bingmer & Crutzen, 1987).

Hashimoto (1981) define um parâmetro cinético K, que é um indicador de estabilidade da fermentação, cujo aumento indica inibição da fermentação. A inibição, conforme mencionado anteriormente, pode ser causada por excesso de substrato ou substâncias tóxicas como a amônia.

De acordo com Hashimoto (1978), o parâmetro K pode ser calculado através da equação:

$$K = (\mu_m \theta - 1)(B_0 - B)/B \quad (2.2)$$

onde μ_m é a taxa máxima de crescimento dos microrganismos, θ é o tempo de retenção hidráulica (TRH), B_0 é o rendimento final do metano, com θ no infinito, e B é o rendimento do metano a um TRH específico. Os valores de μ_m podem ser calculados através da equação:

$$\mu_m = 0,013(T) - 0,129 \quad (2.3)$$

onde T é a temperatura, entre 20 e 60°C, que engloba as faixas mesofílica e termofílica. Estas equações têm sido utilizadas por outros autores como Hill, 1982; e Hashimoto, 1983; para desenvolver relações entre K e a concentração de Sólidos Voláteis (SV) influente.

As equações apresentadas neste tópico têm a intenção de demonstrar a influência da temperatura no processo de biodigestão anaeróbica e, consequentemente, no rendimento da produção do biogás. Sua relação com o processo de Biodigestão Anaeróbica será apresentada no próximo capítulo com mais detalhes.

2.4 Comportamento Térmico do Solo

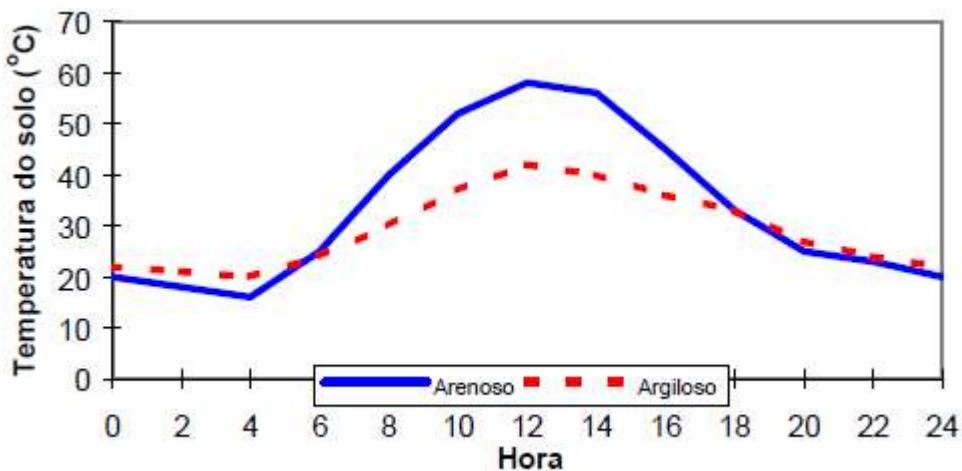
O comportamento térmico de um solo é determinado pela capacidade de absorção da radiação solar que atinge a superfície terrestre, e pela capacidade de condução em seu interior.

As variações de temperatura no solo são dependentes de sua condutividade térmica, calor específico e emissividade, e também de sua textura, densidade, umidade e a cobertura do relevo. Além disso, fatores climáticos como irradiância solar global e temperatura do ar são capazes de interferir na temperatura do solo.

O fluxo de calor, durante o dia, se manifesta em direção ao solo profundo, e a noite, quando há queda de temperatura, se manifesta no sentido contrário, dissipando calor por emissão de radiação (Pereira, 2000).

A Figura 7 ilustra o comportamento térmico de um solo tipo arenoso e um argiloso, sem cobertura, ao longo de um dia. Pode-se observar que esses dois tipos de solo do exemplo da Figura 7 sofrem a influência das variações de temperatura do ambiente, sendo que solos mais úmidos como o argiloso apresentam amplitude térmica menor.

Figura 7 - Variação de temperatura de um solo arenoso e um argiloso, sem cobertura, ao longo de um dia.



Fonte: Pereira (2000)

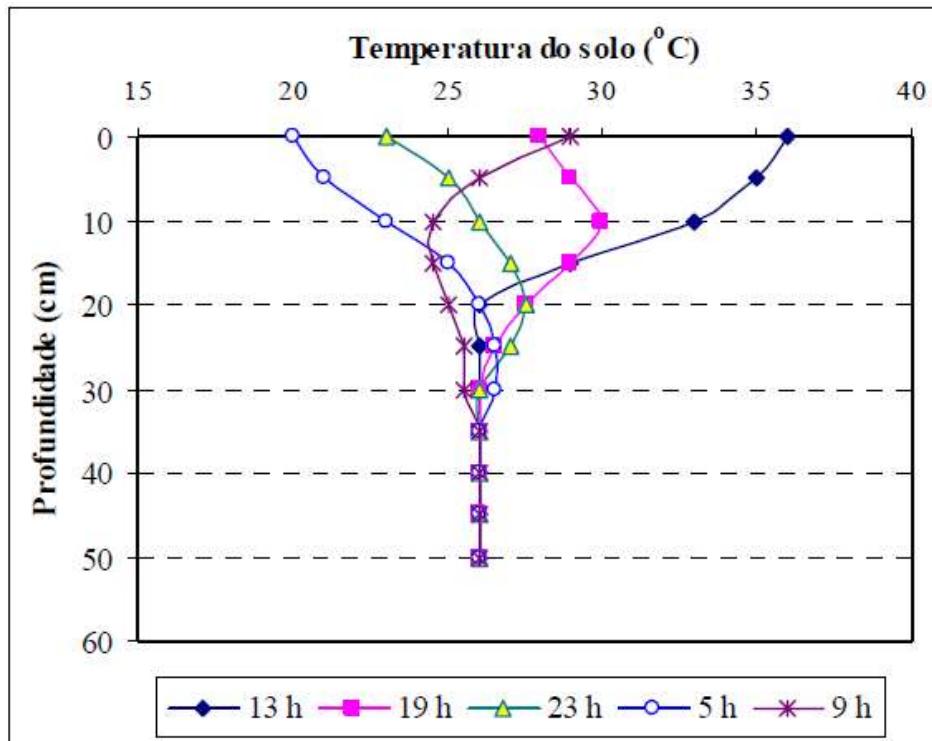
Durante a etapa de projeto do biodigestor, deve-se atentar ao tipo de solo onde o sistema será implantado, principalmente em projetos cujo sistema de isolamento do digestor não seja tão eficiente. A adição de uma camada de solo mais resistente a mudanças de temperatura ao entorno do sistema, pode fazer com que a produção de gás seja maior.

As reações anaeróbicas são exotérmicas, e, portanto, naturalmente produzem calor. A temperatura na zona anaeróbica depende principalmente da atividade microbiana, do formato do sistema e da profundidade (Bingmer & Crutzen, 1987).

Para aterros sanitários, cujos resíduos são enterrados a maiores profundidades, Roovers (1997) afirma, a partir de observações em campo, que o sistema não sofre influência das variações de temperatura externa, mesmo em invernos rigorosos. Rettenberger & Tabasaran (1980) reportam, para grandes aterros sanitários, temperaturas da zona anaeróbica se regulam na região mesofílica da digestão, entre 30 e 40°C.

Entretanto, como a maioria dos sistemas de biodigestores não está enterrada a grandes profundidades, as variações de temperatura do meio possuem maior influência na produção do biogás. Observa-se na Figura 8 a diminuição da sensibilidade da temperatura do solo a medida que as medições são feitas em regiões mais profundas. Para um solo de composição predominantemente mineral e sem cobertura vegetal, observa-se grandes variações de temperatura em sua superfície ao longo do dia.

Figura 8 - Perfil de temperatura de um latossolo desnudo.



Fonte: Pereira (2000)

Assim, sabendo da importância da temperatura no processo de biodigestão anaeróbica, torna-se imprescindível o estudo da influência que o sistema sofrerá com as variações de temperatura ao longo do ano, para que seja então possível prever a quantidade de gás que será produzido, e dimensionar as cargas que este sistema poderá alimentar.

No próximo capítulo serão apresentados os modelos que regem a cinética da fermentação anaeróbica, o modelo escolhido e a justificativa para o seu uso. Também serão apresentadas as adaptações que serão necessárias para a simulação proposta neste trabalho.

CAPÍTULO 3

Cinética da Fermentação

3.1 Biodegradabilidade do Substrato

A qualidade do biogás é medida pela quantidade de metano obtida em um dado substrato, e a estimativa de metano a ser obtido pode ser feita se a composição química da matéria orgânica é conhecida.

De acordo com Gunnerson & Stuckey (1986), essa estimativa pode ser feita pelo balanço da Demanda Química de Oxigênio (DQO), que, em um processo completamente anaeróbico, é um parâmetro conservativo, ou seja $\sum DQO_{entrad}a = \sum DQO_{saída}$.

A demanda química de oxigênio pode ser relacionada aos sólidos voláteis (*Volatile Solids*), que também podem ser utilizados para medir a produção de gás. Ainda de acordo com Gunnerson & Stuckey (1986), a biodegradabilidade geralmente é medida ou com o percentual de DQO removido ou com a porcentagem de sólidos voláteis destruído. Deve-se tomar cuidado, entretanto, pois a relação entre DQO e SV é empírica, variando consideravelmente nas amostras.

Hashimoto (1978) afirma que a produção de metano está diretamente relacionada à redução de DQO, uma vez que nenhum agente oxidante é adicionado ao processo, a redução de DQO ocorre unicamente pela remoção de matéria orgânica do resíduo. A redução de 1g de DQO é equivalente à produção de 0,35 litros de metano em condições normais de temperatura e pressão (CNTP), de modo que:

$$V = 0,35 * (Si - So) * Q \quad (\text{L/dia}) \quad (3.1)$$

onde V é a taxa de produção de metano, na CNTP, S_i é a DQO influente, em g/litro, S_o é a DQO efluente, em g/litro, e Q é a taxa de fluxo influente, em litros/dia.

É importante distinguir o DQO total de entrada do processo do que realmente está disponível à degradação (substrato), pois uma fração considerável do total pode não ser anaerobicamente biodegradável (Gossett & Belser, 1982).

As equações bioquímicas são o núcleo de qualquer modelo de cinética da fermentação e através delas pode-se representar um sistema anaeróbico (Batstone, et. al., 2002).

3.2 Modelos Cinéticos de Fermentação

3.2.1 Modelo de Monod

A velocidade de crescimento bacteriana é função da concentração de nutrientes disponíveis para reação. Monod (1949) descreve a taxa de crescimento das bactérias, para uma cultura em condições em que os nutrientes estejam em quantidades limitadas, através da função:

$$\mu = \mu_m * \frac{S}{K_s + S} \quad (3.2)$$

onde S é a concentração dos nutrientes essenciais, em massa/volume, μ é a taxa de crescimento específica, em 1/tempo, μ_m é a taxa máxima de crescimento específico, em 1/tempo, e K_s é a constante de saturação, que é igual a S quando $\mu = 0,5\mu_m$.

Assumindo que fração biodegradável do resíduo é o fator limitante da reação, Gunnerson & Stuckey (1986), afirmam que as relações que serão apresentadas a seguir, descrevem parâmetros chave de performance, ou seja, as taxas de degradação dos

substrato e produção de gás em termos dos coeficientes cinéticos e de parâmetros de projeto do sistema.

A taxa de utilização do substrato (r_{su}), definida em unidades de massa/volume*tempo, pode ser definida como:

$$r_{su} = -\frac{dS_d}{dt} = -\frac{kS_d X}{Ks + S_d} = \frac{S_d^0 - S_d}{\theta_c} \quad (3.3)$$

onde S_d é a concentração de substrato biodegradável efluente, em massa/volume, S_d^0 é a concentração de substrato biodegradável influente, em massa/volume, X é a concentração de microorganismos no reator utilizando o substrato, massa/volume, $k = \mu_m/Y$ que é o coeficiente da taxa de utilização, na unidade de massa de substrato consumido por tempo por massa de microorganismos, Y é o coeficiente de rendimento máximo, em massa de células formadas por massa de substrato consumido, θ_c é o tempo médio de residência celular, em unidade de tempo, e t é o tempo.

A concentração de substrato efluente (S_d) é calculada por:

$$S_d = \frac{Ks(1 + b\theta_c)}{\theta_c(Yk - b) - 1} \quad (3.4)$$

onde b é o coeficiente de decaimento endógeno, em 1/tempo.

O tempo médio de residência celular (θ_c) pode ser calculado através da relação:

$$\frac{1}{\theta_c} = \frac{kYS_d}{Ks + S_d} - b \quad (3.5)$$

A concentração total de substrato efluente (S_T), em massa/volume, e a taxa de produção volumétrica de gás (γ_v), em volume de metano por tempo por volume do reator, podem ser calculados através das equações (3.6) e (3.7).

$$S_T = S_r^0 + \frac{Ks(1 + b\theta_c)}{\theta_c(Yk - b) - 1} + \frac{1,42Y(S_d^0 - S_d)(1 + 0,2b\theta_c)}{1 + b\theta_c} \quad (3.6)$$

$$\gamma_v = \frac{0,35(S_d^0 - S_T)}{\theta} \quad (3.7)$$

onde S_r^0 é a concentração de substrato refratário no influente, em massa/volume, θ é o tempo de retenção hidráulico. As concentrações do substrato são normalmente expressas em termos da Demanda Química de Oxigênio (DQO), em grama por litro.

O modelo de Monod pode ser utilizado para minimizar a concentração de efluente ou maximizar a taxa de produção de gás, determinado um valor ótimo do tempo médio de residência celular (θ_c).

3.2.2 Modelo de Primeira Ordem

Outro modelo utilizado para descrever a taxa de utilização do substrato é o modelo de primeira ordem, que descreve a taxa de utilização do substrato por uma expressão de taxa de primeira ordem:

$$\frac{dS_d}{dt} = -k_1 S_d \quad (3.8)$$

onde k_1 é o coeficiente de primeira ordem, em 1/tempo, que é função da temperatura.

Integrando a equação e aplicando a um sistema digestor completamente misto, sem reciclagem de sólidos, tem-se:

$$S_d = \frac{S_d^0}{k_1 \theta + 1} \quad (3.9)$$

3.2.3 Modelo de Contois

Contois (1959) propôs uma modificação no modelo de Monod, considerando os efeitos do aumento da concentração de substrato que faz com que a taxa de crescimento bacteriano decresça, devido a limitações de transferência de massa. A modificação transforma a equação da taxa de crescimento bacteriano em:

$$\mu = \frac{\mu_m S_d}{B S_d^0 + S_d} \quad (3.10)$$

onde B é um coeficiente cinético.

Hashimoto (1978) aplicou o modelo de Contois para um reator completamente misto, sem reciclagem de sólidos, alimentado por resíduos da pecuária de bovinos, obtendo a concentração de substrato efluente e a taxa de produção volumétrica de gás:

$$S_d = \frac{K S_d^0}{\theta \mu_m - 1 + K} \quad (3.11)$$

$$\gamma_v = \frac{B_0 S_T^0}{\theta} \left[1 - \frac{K}{\theta \mu_m - 1 + K} \right] \quad (3.12)$$

onde K é um coeficiente cinético adimensional e θ é o tempo de residência hidráulico, igual à θc , neste caso, e B_0 é o coeficiente de rendimento final do metano, para θ no infinito, em volume de metano produzido por massa de substrato.

3.2.4 Modelo de Hashimoto

O modelo de Hashimoto (1978) leva em consideração os efeitos da temperatura sobre as constantes cinéticas que regem o processo de biodigestão anaeróbica, e por este motivo, o modelo foi escolhido para ser utilizado neste trabalho e será apresentado com maior riqueza de detalhes.

Os autores afirmam que um sistema misto de fluxo contínuo sem recirculação de sólidos é regido por equações diferenciais que representam as taxas de mudança celular bacteriana e a concentração de substrato biodegradável, assim:

$$\frac{dM}{dt} = \mu M - \frac{M}{\theta} \quad (3.13)$$

$$\frac{dS}{dt} = -\dot{F} + \frac{S_0 - S}{\theta} \quad (3.14)$$

Onde M é a concentração de massa celular, em massa por volume, μ é a taxa de crescimento específico dos microorganismos, em tempo^{-1} , \dot{F} é a taxa de utilização volumétrica do substrato, em massa por volume por tempo, S e S_0 são as concentrações de substrato efluente e influente, respectivamente, em massa por volume, θ é o tempo de retenção hidráulica, e t é o tempo. Para um sistema completamente misto, a média de tempo de retenção de sólidos é igual ao tempo de retenção hidráulica.

A relação entre \dot{F} e μ é dada por:

$$\mu = Yq = \left(\frac{Y}{M}\right)\dot{F} \quad (3.15)$$

onde q é a taxa específica de utilização do substrato e Y é a constante de rendimento do crescimento.

Em regime permanente temos:

$$\mu = 1/\theta \quad (3.16)$$

$$\dot{F} = \left(\frac{S_0 - S}{\theta}\right) \quad (3.17)$$

$$M = Y(S_0 - S) \quad (3.18)$$

Hashimoto em seu estudo derivaram um modelo cinético de utilização do substrato para relacionar a taxa de crescimento específica, que está diretamente relacionada à temperatura do sistema, conforme mencionado no capítulo anterior, à concentração de substrato. A equação cinética é dada por:

$$\frac{\mu}{\mu_m} = \frac{S/S_0}{K + (1 - K)S/S_0} \quad (3.19)$$

onde μ_m é a taxa máxima de crescimento específico dos microrganismos e K é a constante cinética.

O tempo de retenção mínimo é numericamente igual ao recíproco de μ_m .

$$\theta_m = 1/\mu_m \quad (3.20)$$

Para um sistema completamente misto, de fluxo contínuo, em regime permanente, as equações 3.16 e 3.19 resultam em:

$$\theta = \frac{1}{\mu_m} + \left(\frac{K}{\mu_m}\right)(S_0 - S)/S \quad (3.21)$$

Quando μ_m e K são determinados para um substrato em particular, S pode ser predito através da equação a seguir.

$$\frac{S}{S_0} = \frac{K}{\frac{\theta}{\theta_m} - 1 + K} \quad (3.22)$$

Os autores afirmam que a produção de metano está diretamente relacionada com a redução da Demanda Química de Oxigênio, pois uma vez que nenhum agente oxidante é adicionado ao processo, a única maneira de ocorrer a redução é através da remoção de matéria orgânica.

Então, sabendo-se a quantidade de DQO inserida no sistema e o volume de gás produzido, é possível calcular a quantidade de DQO que ainda resta no biodigestor.

Sendo B o volume de metano produzido na CNTP por grama de DQO adicionada ao biodigestor e B_0 o volume de metano produzido na CNTP por grama de DQO produzido no tempo de retenção infinito, o restante da DQO biodegradável no sistema é diretamente proporcional a DQO biodegradável inserida no biodigestor. Assim, a partir da Equação 3.22

$$\frac{B_0 - B}{B_0} = \frac{K}{\frac{\theta}{\theta_m} - 1 + K} \quad (3.23)$$

Rearranjando, temos:

$$B = B_0 \left(1 - \frac{K}{\frac{\theta}{\theta_m} - 1 + K} \right) \quad (3.24)$$

Como B é a produção de metano por grama de DQO adicionada, a taxa de produção volumétrica é igual a B vezes a taxa de carregamento do sistema:

$$\gamma_V = \frac{BS_{T0}}{\theta} = \frac{B_0S_{T0}}{\theta} \left(1 - \frac{K}{\frac{\theta}{\theta_m} - 1 + K} \right) \quad (3.25)$$

onde γ_V é dado em volume de metano por volume do digestor por tempo, e S_{T0} é a concentração total de DQO influente.

Para obter a taxa máxima de produção volumétrica de metano, deriva-se a taxa de produção volumétrica (γ_V) em relação ao tempo de retenção (θ) e igualando-a a zero. Feito isso, temos:

$$\gamma_{Vmax} = \frac{B_0S_{T0}}{\theta_m} \left(\frac{1 - K/(K + K^{\frac{1}{2}})}{1 + K^{\frac{1}{2}}} \right) \quad (3.26)$$

que ocorre em:

$$\theta = \theta_m \left(1 + K^{\frac{1}{2}} \right) \quad (3.27)$$

A taxa de DQO/SV em um dado resíduo geralmente é constante. Como a quantidade de Sólidos Voláteis em substratos complexos concentrados pode ser determinada mais fácil e precisamente que a Demanda Química de Oxigênio, pode-se expressar as equações descritas neste tópico em termos de SV, substituindo conforme descrito a seguir.

- B' = volume de metano na CNTP por grama de SV adicionado;
- B_0' = volume de metano na CNTP por grama de SV adicionado, com tempo de retenção infinito;
- S_{T0}' = concentração total de SV influente, em grama por litro.

Apresentados as teorias que modelam a cinética da fermentação, escolhida a mais adequada para ser utilizada nas simulações deste trabalho, as adaptações que se fizeram necessárias serão apresentadas no próximo capítulo, assim como a metodologia de cálculo e apresentará o software que foi desenvolvido para automatizar os cálculos.

CAPÍTULO 4

Metodologia

4.1 Origem dos Dados Analisados

Os dados que serão utilizados para mostrar a influência da temperatura na taxa de crescimento dos microrganismos foram retirados da Table 1: Kinetic Constants for Methane Fermentation of Complex Wastes, do artigo Kinetics of Methane Fermentation, de Hashimoto (1978), onde estão resumidos os dados experimentais de diversos pesquisadores.

A Tabela 1 é uma adaptação traduzida livremente da tabela encontrada no artigo acima mencionado.

As simulações com os dados da tabela foram feitas considerando as temperaturas para as cidades de Uberlândia – MG, Santa Maria – RS e Sobral - CE, no ano de 2016. As duas últimas cidades se localizam em estados que apresentam, respectivamente, maiores e menores variações de temperatura ao longo do ano. Os dados de registro de temperatura foram obtidos na página do *Accuweather* [<https://www.accuweather.com.br/pt/br/brazil-weather>, acesso em novembro de 2017].

Os locais foram escolhidos por apresentarem diferentes comportamentos térmicos ao longo do ano, para que além da análise dos efeitos da temperatura na produção de biogás, permite-se uma reflexão a respeito das melhores localidades para instalação de sistemas biodigestores.

Tabela 1 - Constantes cinéticas para a fermentação de substratos complexos.

Resíduo e Fonte	Concentração VS Influentes (g/L)	Temperatura (°C)	Bo (L CH ₄ / g COD)	Bo' (L CH ₄ / g VS)	μ _m (dia ⁻¹)	K	γvmax (L CH ₄ /L/dia)
Lodo de Esgoto O'Rourke (1968)	18,4	35	0,227	0,35	0,33	0,26	0,93
	18,4	25	0,247	0,375	0,13	0,34	0,39
	18,4	20	0,263	0,406	0,114	1,03	0,21
Resíduo Municipal Pfeffar (1974)	-	35		0,182	0,33	0,3	0,75
	-	40		0,299	0,74	1,13	1,2
	-	45		0,202	0,77	1,26	1,03
	-	50		0,256	0,5	0,71	1,13
	-	60		0,290	0,63	0,68	1,62
Resíduo Lácteo Morris (1976)	34,9	32,5	0,215	0,271	0,28	0,96	0,68
	52,3	32,5	0,199	0,251	0,28	1,07	0,89
	69,8	32,5	0,187	0,236	0,33	1,56	1,08
	87,2	32,5	0,176	0,222	0,33	1,39	1,35
Resíduo Lácteo Bryant et al. (1976)	60	60		0,169	0,79	0,75	2,3
	80	60		0,169	0,79	1,08	2,57
	100	60		0,169	0,79	1,62	2,58
	120	60		0,169	0,79	3,57	1,92
	140	60		0,169	0,79	9,04	1,16
Resíduo Bovino Varel et al. (1977)	59	60		0,28	0,77	0,87	3,41
	78	60		0,28	0,77	0,93	4,36
	97	60		0,28	0,77	1,86	3,74
	117	60		0,28	0,77	2,9	3,45

Fonte: Hashimoto & Chen (1978)

4.2 Considerações

Para avaliar os efeitos da temperatura no processo de biodigestão anaeróbica, a partir da Tabela 1, apresentada no tópico anterior, foram utilizados os dados da concentração influente; do volume de metano produzido; da constante cinética, escolhida com base na temperatura média do ano; e a taxa máxima de produção volumétrica de gás; desconsiderando-se assim os valores fornecidos da taxa de crescimento dos microrganismos.

Os cálculos e a análise foram automatizados em um software desenvolvido pelo autor, em OCTAVE, com uma simples interface gráfica utilizada para inserção dos parâmetros de entrada dos experimentos.

O resultado do volume de gás produzido é retornado em forma de gráfico para simplificar o entendimento das informações obtidas, e também são apresentadas as taxas máxima e mínima de produção volumétrica que acompanham as temperaturas máxima e mínima registradas no local.

O experimento de Pfeffar (1974) não será utilizado como dado de entrada para o sistema, visto que faltam informações a respeito da Concentração Influente de Sólidos Voláteis.

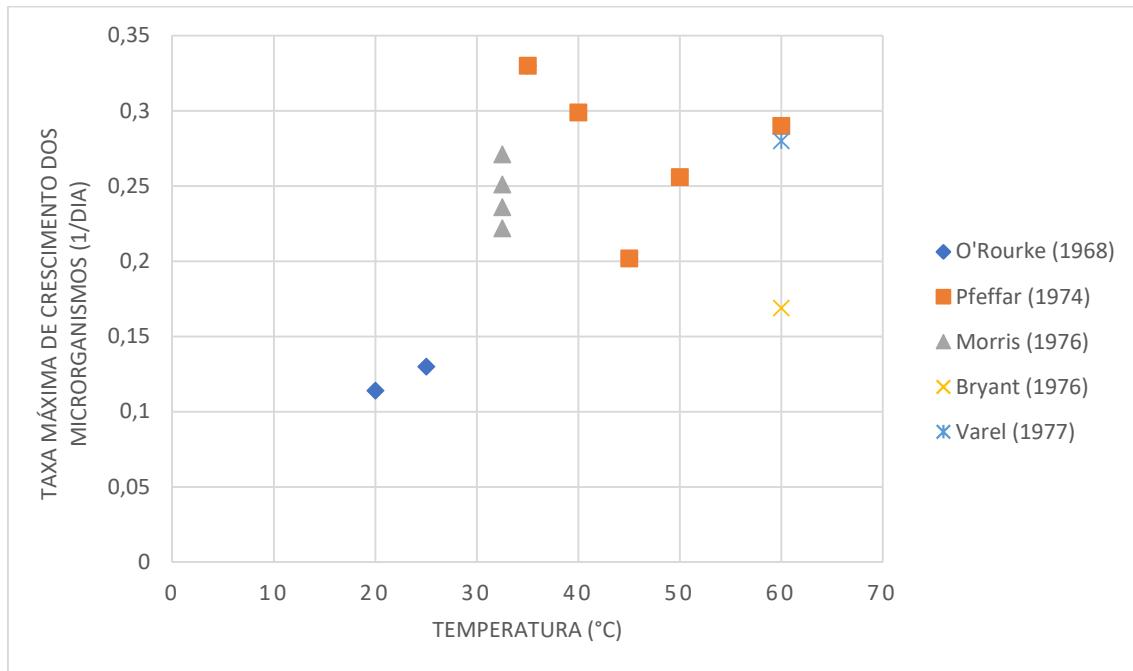
4.3 Metodologia de Cálculo

A equação de Hashimoto (1978) para o cálculo da taxa de crescimento dos microrganismos é uma aproximação calculada por regressão linear, que utiliza todos os dados apresentados na Tabela 1. A equação abrange a faixa de temperatura de 20 a 60°C.

$$\mu_m = 0,013(T) - 0,129 \quad (4.1)$$

Conforme pode-se observar na Figura 9, os resultados dos experimentos são muito dispersos. A tentativa de Hashimoto (1981) de encontrar uma equação geral é válida, porém o uso de resultados de experimentos utilizando matérias primas e condições de ensaio diferentes, produz um resultado excessivamente genérico.

Figura 9 – Gráfico dos efeitos da temperatura na Taxa Máxima de Crescimento dos Microrganismos.



Fonte: Chen e Hashimoto (1981)

Utilizando a mesma metodologia dos autores mencionados, uma nova equação foi calculada apenas com os dados do experimento de O'Rourke (1968), cujas temperaturas se aproximam das condições climáticas reais dos locais selecionados neste estudo.

A equação obtida para o cálculo da Taxa Máxima de Crescimento dos Microrganismos é:

$$\mu_m = 0,0152(T) - 0,214 \quad (4.2)$$

Os resultados produzidos por esta equação para temperaturas menores que 15°C mostram uma taxa de crescimento negativa e consequentemente um tempo de retenção tendendo ao infinito. Esses resultados são explicados pela cessão da produção de gás para temperaturas inferiores a 15 °C (Seixas, 1981).

Sabe-se que as reações anaeróbicas são exotérmicas, e, naturalmente, a temperatura do sistema não cairá tão drasticamente quanto as temperaturas externas do ambiente.

O experimento de Tietz (2014) mostrou que, para um biodigestor modelo BioKohler, as variações de temperatura se mostraram amenas na parte inferior do sistema, apesar de seguir as tendências da temperatura externa, e mais severas na parte superior, que sofreu influência direta dos fatores externos e das trocas de energia entre as massas. O autor afirma ainda que produção de gás pode ter sofrido influência das variações de temperatura externa e interna do biodigestor. O experimento foi realizado durante 1 ano e 3 meses na região oeste do Paraná.

Então, para calcular a produção de biogás, o primeiro passo é a obtenção das médias diárias de temperatura ao longo do ano nas localidades especificadas anteriormente.

A taxa máxima de crescimento dos microrganismos, conforme mencionado, é então calculada através da equação (4.3), linear em função da temperatura.

$$\mu_m = 0,0152(T) - 0,214 \quad (4.3)$$

Em seguida, calcula-se o tempo de retenção hidráulica mínimo.

$$\theta_m = 1/\mu_m \quad (4.4)$$

Assim, torna-se possível calcular, juntando-se aos dados experimentais apresentados na Tabela 1, o volume de metano produzido.

$$B = B_0 \left(1 - \frac{K}{\frac{\theta}{\theta_m} - 1 + K} \right) \quad (4.5)$$

A taxa de produção volumétrica e seu valor máximo podem ser calculados:

$$\gamma_V = \frac{B_0 S_{T0}}{\theta} \left(1 - \frac{K}{\frac{\theta}{\theta_m} - 1 + K} \right) \quad (4.6)$$

$$\gamma_{V_{max}} = \frac{B_0 S_{T0}}{\theta_m} \left(\frac{1 - K/(K + K^{\frac{1}{2}})}{1 + K^{\frac{1}{2}}} \right) \quad (4.7)$$

$$\text{com } \theta = \theta_m \left(1 + K^{\frac{1}{2}} \right).$$

Os dados de temperatura devem ser organizados em planilhas de Excel, em uma única coluna, sem separação por meses, para serem inseridos no software de cálculo desenvolvido no OCTAVE.

4.4 Funcionamento do Software

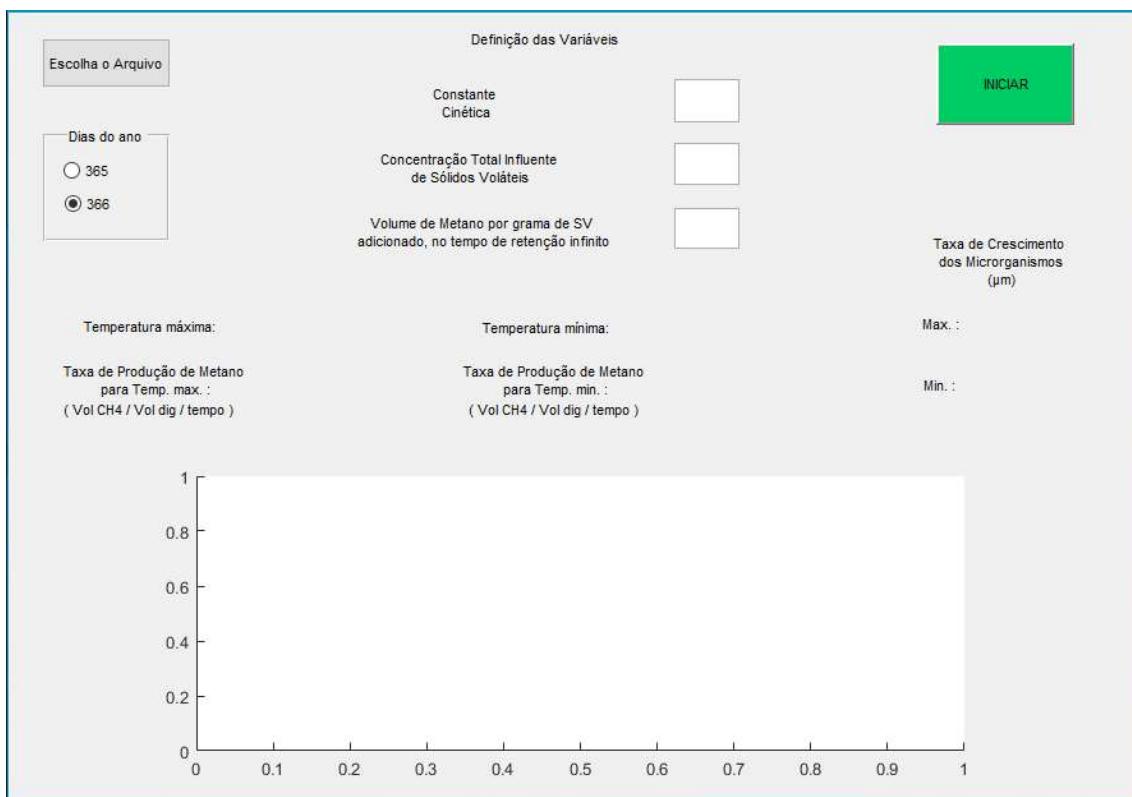
A Interface gráfica que é carregada ao se iniciar o programa é mostrada na Figura 10.

No botão “Escolha o Arquivo” deve ser carregada a planilha de temperaturas, e de acordo com a mesma, deve-se selecionar a quantidade de dias que o ano em questão possui, se é um ano comum ou um ano bissexto.

Em seguida, a partir da Tabela 1 deve-se inserir os valores da Constante Cinética, escolhida a partir da média anual de temperatura da localidade, a Concentração Total Influentes de Sólidos Voláteis, e o Volume de Metano por grama de Sólidos Voláteis adicionado, no tempo de retenção infinito.

Ao clicar no botão “Início”, o software irá realizar os cálculos das taxas de produção, a partir das taxas variantes de crescimento dos microrganismos, que seguem as mudanças de temperatura ao longo do ano, e irá retornar um gráfico da produção volumétrica de gás, bem como as taxas de produção máxima e mínima apresentadas ao longo desse ano.

Figura 10 - Captura de tela do software desenvolvido pelo autor.



Na Tabela 1, no experimento de O’Rourke (1968), os valores fornecidos são para três temperaturas diferentes. Para calcular a produção de gás, as constantes foram divididas de acordo com as temperaturas médias anuais de cada localidade escolhida, de modo que:

- Para Santa Maria – RS, com uma média anual em torno de 20°C:
 - $K = 1,03$
 - $S_{T0} = 18,4 \text{ g/L}$
 - $B'_0 = 0,406 \text{ L}_{CH4}/g_{SV}$
- Para Uberlândia – MG, com uma média anual em torno de 25°C:
 - $K = 0,34$
 - $S_{T0} = 18,4 \text{ g/L}$
 - $B'_0 = 0,375 \text{ L}_{CH4}/g_{SV}$
- Para Sobral – CE, com uma média anual em torno de 30°C:
 - $K = 0,26$
 - $S_{T0} = 18,4 \text{ g/L}$
 - $B'_0 = 0,35 \text{ L}_{CH4}/g_{SV}$

A partir de todo o estudo apresentado anteriormente, pode-se observar que, de acordo com as temperaturas e quantidade de matéria orgânica, as constantes cinéticas sofrem grandes variações.

Considerando a zona mesofílica de operação, com temperaturas variando entre 30 e 40°C, os melhores resultados serão aqueles das regiões cujas temperaturas médias anuais se mantiverem mais próximas a estes valores.

Hashimoto (1981) afirma que este parâmetro cinético é essencial para prever a produção de gás, visto que é um indicador de estabilidade da fermentação. O aumento de K indica inibição da fermentação.

Observa-se ainda que para o experimento de O'Rourke (1968) as Constantes Cinéticas apresentam valores elevados à medida que a temperatura diminui, indicando uma redução no processo de produção de gás.

No experimento de Bryant (1976), também observa-se um aumento significativo na Constante Cinética, que pode ser explicado pelo excesso de matéria orgânica no processo de digestão e pela temperatura de operação no limite da zona termofílica.

Portanto, para melhores resultados, é necessário que a temperatura do sistema permaneça próximo a zona de operação mesofílica ou termofílica. Além disso, deve-se

encontrar o ponto de equilíbrio de matéria orgânica inserida no sistema que não o torne tóxico e de modo que a produção de gás não sofra inibições.

No capítulo seguinte serão apresentados os resultados obtidos, e será feita uma discussão a partir dos resultados obtidos nas simulações.

CAPÍTULO 5

Resultados e Discussão

O primeiro passo a ser seguido então é preencher as planilhas do Excel com os dados de temperatura organizados em uma única coluna, sem divisões por mês.

Após carregá-las no software então deve-se preencher os dados necessários para os cálculos e clicar no botão iniciar.

Os resultados das simulações serão apresentados graficamente, de maneira simplificada, através do software, e no Apêndice I serão apresentados de maneira mais detalhada os valores obtidos.

5.1 Taxa de Crescimento dos Microrganismos (μ_m)

Utilizando a Equação 4.2, o software calcula a Taxa Máxima de Crescimento dos Microrganismos, que será diferente para cada dia do ano, em cada localidade, pois esta é diretamente dependente da temperatura do sistema.

Os resultados para temperaturas menores que 15°C serão apresentados como zeros, uma vez que não há produção de gás para temperaturas inferiores a este valor.

É importante salientar neste momento que a temperatura interna das partes inferiores do sistema poderá ser mais alta que a ambiente, visto que as reações químicas são exotérmicas, e mesmo quando a temperatura ambiente estiver baixa, poderá ocorrer uma pequena produção de gás.

A fim de simplificar a interface com o usuário, o software apresenta apenas os valores de μ_m para as temperaturas máxima e mínima de cada localidade. O restante dos resultados foi exportado do Octave e é apresentado na Tabela 2.

Tabela 2 - Taxa máxima de crescimento dos microrganismos.

Dia	Santa Maria		Uberlândia		Sobral		Dia	Santa Maria		Uberlândia		Sobral	
	T	μm	T	μm	T	μm		T	μm	T	μm	T	μm
1	25	0,166	25	0,166	29,5	0,2344	184	20	0,09	19	0,0748	30	0,242
2	25	0,166	24	0,1508	29,5	0,2344	185	23	0,1356	20	0,09	29	0,2268
3	26	0,1812	23	0,1356	29	0,2268	186	24	0,1508	20	0,09	29	0,2268
4	26	0,1812	23	0,1356	29,5	0,2344	187	24	0,1508	20	0,09	28	0,2116
5	26	0,1812	24	0,1508	29,5	0,2344	188	15	0,014	20	0,09	29	0,2268
6	27	0,1964	24	0,1508	30	0,242	189	14	0	20	0,09	28	0,2116
7	26	0,1812	24	0,1508	29,5	0,2344	190	14	0	22	0,1204	28	0,2116
8	23	0,1356	24	0,1508	28,5	0,2192	191	13	0	22	0,1204	27	0,1964
9	24	0,1508	22	0,1204	29	0,2268	192	12	0	22	0,1204	27	0,1964
10	27	0,1964	23	0,1356	29	0,2268	193	17	0,0444	22	0,1204	28	0,2116
11	28	0,2116	24	0,1508	28	0,2116	194	14	0	23	0,1356	28	0,2116
12	28	0,2116	22	0,1204	29,5	0,2344	195	10	0	22	0,1204	28	0,2116
13	28	0,2116	23	0,1356	29,5	0,2344	196	14	0	22	0,1204	28	0,2116
14	24	0,1508	21	0,1052	29	0,2268	197	14	0	23	0,1356	28	0,2116
15	25	0,166	22	0,1204	30	0,242	198	12	0	24	0,1508	28	0,2116
16	26	0,1812	22	0,1204	29,5	0,2344	199	8	0	16	0,0292	28	0,2116
17	27	0,1964	22	0,1204	29,5	0,2344	200	11	0	16	0,0292	28	0,2116
18	26	0,1812	22	0,1204	30	0,242	201	9	0	20	0,09	28	0,2116
19	26	0,1812	25	0,166	25,5	0,1736	202	7	0	20	0,09	28	0,2116
20	27	0,1964	24	0,1508	27,5	0,204	203	8	0	21	0,1052	28	0,2116
21	27	0,1964	24	0,1508	29	0,2268	204	10	0	21	0,1052	28	0,2116
22	26	0,1812	24	0,1508	29	0,2268	205	15	0,014	20	0,09	28	0,2116
23	28	0,2116	24	0,1508	29	0,2268	206	17	0,0444	22	0,1204	29	0,2268
24	30	0,242	24	0,1508	28	0,2116	207	17	0,0444	21	0,1052	29	0,2268
25	28	0,2116	25	0,166	28,5	0,2192	208	20	0,09	21	0,1052	28	0,2116
26	22	0,1204	26	0,1812	29	0,2268	209	12	0	24	0,1508	28	0,2116
27	23	0,1356	24	0,1508	29	0,2268	210	9	0	24	0,1508	28	0,2116
28	25	0,166	24	0,1508	29	0,2268	211	12	0	22	0,1204	29	0,2268
29	29	0,2268	24	0,1508	29	0,2268	212	16	0,0292	21	0,1052	29	0,2268
30	23	0,1356	24	0,1508	29	0,2268	213	22	0,1204	20	0,09	28	0,2116
31	25	0,166	24	0,1508	29	0,2268	214	20	0,09	20	0,09	30	0,242
32	24	0,1508	25	0,166	28,5	0,2192	215	12	0	20	0,09	28	0,2116
33	33	0,2876	26	0,1812	29	0,2268	216	14	0	21	0,1052	29	0,2268
34	33	0,2876	25	0,166	29,5	0,2344	217	20	0,09	22	0,1204	28	0,2116
35	26	0,1812	24	0,1508	29,5	0,2344	218	21	0,1052	21	0,1052	28	0,2116
36	26	0,1812	26	0,1812	29,5	0,2344	219	20	0,09	21	0,1052	28	0,2116
37	26	0,1812	25	0,166	29,5	0,2344	220	15	0,014	24	0,1508	28	0,2116
38	26	0,1812	24	0,1508	29	0,2268	221	14	0	24	0,1508	28	0,2116

Continuação da Tabela 3

Dia	Santa Maria		Uberlândia		Sobral		Dia	Santa Maria		Uberlândia		Sobral	
	T	μm	T	μm	T	μm		T	μm	T	μm	T	μm
39	29	0,2268	24	0,1508	28,5	0,2192	222	13	0	24	0,1508	28	0,2116
40	26	0,1812	24	0,1508	28	0,2116	223	12	0	22	0,1204	29	0,2268
41	28	0,2116	24	0,1508	28	0,2116	224	12	0	20	0,09	29	0,2268
42	26	0,1812	25	0,166	24,5	0,1584	225	14	0	20	0,09	28	0,2116
43	27	0,1964	24	0,1508	27,5	0,204	226	16	0,0292	22	0,1204	28	0,2116
44	29	0,2268	24	0,1508	27,5	0,204	227	18	0,0596	24	0,1508	28	0,2116
45	27	0,1964	26	0,1812	27	0,1964	228	20	0,09	24	0,1508	28	0,2116
46	26	0,1812	24	0,1508	29	0,2268	229	21	0,1052	20	0,09	28	0,2116
47	27	0,1964	24	0,1508	28,5	0,2192	230	16	0,0292	23	0,1356	28	0,2116
48	28	0,2116	26	0,1812	26,5	0,1888	231	12	0	25	0,166	28	0,2116
49	26	0,1812	24	0,1508	27,5	0,204	232	14	0	26	0,1812	28	0,2116
50	26	0,1812	24	0,1508	26,5	0,1888	233	14	0	26	0,1812	28	0,2116
51	25	0,166	26	0,1812	26,5	0,1888	234	12	0	18	0,0596	28	0,2116
52	26	0,1812	26	0,1812	28,5	0,2192	235	10	0	14	0	29	0,2268
53	26	0,1812	24	0,1508	29	0,2268	236	16	0,0292	20	0,09	28	0,2116
54	28	0,2116	24	0,1508	29,5	0,2344	237	16	0,0292	22	0,1204	29	0,2268
55	28	0,2116	24	0,1508	29	0,2268	238	19	0,0748	22	0,1204	29	0,2268
56	29	0,2268	24	0,1508	28,5	0,2192	239	24	0,1508	22	0,1204	28	0,2116
57	30	0,242	24	0,1508	29	0,2268	240	28	0,2116	22	0,1204	28	0,2116
58	26	0,1812	25	0,166	28,5	0,2192	241	24	0,1508	24	0,1508	28	0,2116
59	24	0,1508	24	0,1508	28	0,2116	242	18	0,0596	24	0,1508	29	0,2268
60	24	0,1508	23	0,1356	28	0,2116	243	13	0	24	0,1508	28	0,2116
61	24	0,1508	22	0,1204	29	0,2268	244	18	0,0596	22	0,1204	28	0,2116
62	23	0,1356	24	0,1508	28,5	0,2192	245	16	0,0292	22	0,1204	28	0,2116
63	20	0,09	22	0,1204	28	0,2116	246	14	0	24	0,1508	30	0,242
64	23	0,1356	24	0,1508	28,5	0,2192	247	13	0	24	0,1508	28	0,2116
65	22	0,1204	24	0,1508	28	0,2116	248	14	0	22	0,1204	29	0,2268
66	23	0,1356	24	0,1508	28,5	0,2192	249	16	0,0292	24	0,1508	28	0,2116
67	21	0,1052	24	0,1508	29	0,2268	250	12	0	22	0,1204	28	0,2116
68	22	0,1204	24	0,1508	29	0,2268	251	14	0	22	0,1204	28	0,2116
69	22	0,1204	24	0,1508	28,5	0,2192	252	16	0,0292	22	0,1204	28	0,2116
70	20	0,09	24	0,1508	29	0,2268	253	15	0,014	24	0,1508	28	0,2116
71	22	0,1204	24	0,1508	28,5	0,2192	254	19	0,0748	24	0,1508	28	0,2116
72	20	0,09	24	0,1508	29	0,2268	255	20	0,09	25	0,166	29	0,2268
73	21	0,1052	23	0,1356	28	0,2116	256	23	0,1356	26	0,1812	28	0,2116
74	23	0,1356	25	0,166	28,5	0,2192	257	24	0,1508	26	0,1812	28	0,2116
75	24	0,1508	24	0,1508	28	0,2116	258	16	0,0292	27	0,1964	28	0,2116
76	24	0,1508	24	0,1508	28	0,2116	259	14	0	24	0,1508	28	0,2116
77	28	0,2116	24	0,1508	27,5	0,204	260	13	0	27	0,1964	28	0,2116
78	30	0,242	24	0,1508	29	0,2268	261	18	0,0596	28	0,2116	28	0,2116

Continuação da Tabela 4

Dia	Santa Maria		Uberlândia		Sobral	
	T	µm	T	µm	T	µm
79	24	0,1508	25	0,166	29	0,2268
80	20	0,09	26	0,1812	28	0,2116
81	23	0,1356	26	0,1812	28	0,2116
82	22	0,1204	26	0,1812	29	0,2268
83	22	0,1204	26	0,1812	28	0,2116
84	21	0,1052	25	0,166	28,5	0,2192
85	20	0,09	22	0,1204	28,5	0,2192
86	20	0,09	23	0,1356	27,5	0,204
87	22	0,1204	24	0,1508	28	0,2116
88	22	0,1204	24	0,1508	29	0,2268
89	22	0,1204	25	0,166	29	0,2268
90	22	0,1204	24	0,1508	28	0,2116
91	22	0,1204	25	0,166	29	0,2268
92	24	0,1508	24	0,1508	28,5	0,2192
93	25	0,166	26	0,1812	29	0,2268
94	22	0,1204	26	0,1812	29	0,2268
95	24	0,1508	26	0,1812	29	0,2268
96	26	0,1812	26	0,1812	28	0,2116
97	29	0,2268	24	0,1508	29	0,2268
98	25	0,166	24	0,1508	29,5	0,2344
99	22	0,1204	26	0,1812	29	0,2268
100	22	0,1204	26	0,1812	29	0,2268
101	24	0,1508	26	0,1812	28	0,2116
102	24	0,1508	24	0,1508	30,5	0,2496
103	22	0,1204	24	0,1508	28,5	0,2192
104	24	0,1508	24	0,1508	29	0,2268
105	24	0,1508	26	0,1812	28,5	0,2192
106	28	0,2116	24	0,1508	28,5	0,2192
107	32	0,2724	24	0,1508	30	0,242
108	30	0,242	24	0,1508	29,5	0,2344
109	27	0,1964	24	0,1508	29	0,2268
110	28	0,2116	24	0,1508	28,5	0,2192
111	23	0,1356	24	0,1508	28	0,2116
112	24	0,1508	24	0,1508	28,5	0,2192
113	20	0,09	24	0,1508	28	0,2116
114	24	0,1508	24	0,1508	28	0,2116
115	24	0,1508	24	0,1508	27,5	0,204
116	20	0,09	24	0,1508	28,5	0,2192
117	14	0	24	0,1508	29	0,2268
118	12	0	17	0,0444	28,5	0,2192
119	10	0	17	0,0444	29	0,2268

Dia	Santa Maria		Uberlândia		Sobral	
	T	µm	T	µm	T	µm
262	20	0,09	26	0,1812	28	0,2116
263	16	0,0292	27	0,1964	28	0,2116
264	14	0	23	0,1356	28	0,2116
265	18	0,0596	22	0,1204	28	0,2116
266	20	0,09	24	0,1508	28	0,2116
267	18	0,0596	26	0,1812	28	0,2116
268	14	0	25	0,166	28	0,2116
269	14	0	24	0,1508	28	0,2116
270	14	0	24	0,1508	28	0,2116
271	16	0,0292	24	0,1508	28	0,2116
272	18	0,0596	25	0,166	29	0,2268
273	16	0,0292	26	0,1812	30	0,242
274	16	0,0292	26	0,1812	30	0,242
275	18	0,0596	26	0,1812	29	0,2268
276	19	0,0748	26	0,1812	29	0,2268
277	20	0,09	24	0,1508	30	0,242
278	20	0,09	22	0,1204	30	0,242
279	18	0,0596	20	0,09	29	0,2268
280	18	0,0596	20	0,09	29	0,2268
281	18	0,0596	18	0,0596	29	0,2268
282	18	0,0596	22	0,1204	29	0,2268
283	14	0	25	0,166	30	0,242
284	16	0,0292	26	0,1812	30	0,242
285	21	0,1052	24	0,1508	30	0,242
286	21	0,1052	24	0,1508	30	0,242
287	22	0,1204	24	0,1508	30	0,242
288	22	0,1204	21	0,1052	30	0,242
289	21	0,1052	24	0,1508	30	0,242
290	24	0,1508	26	0,1812	30	0,242
291	22	0,1204	28	0,2116	30	0,242
292	18	0,0596	28	0,2116	30	0,242
293	20	0,09	28	0,2116	30	0,242
294	20	0,09	22	0,1204	30	0,242
295	19	0,0748	24	0,1508	29	0,2268
296	18	0,0596	24	0,1508	29	0,2268
297	22	0,1204	26	0,1812	30	0,242
298	24	0,1508	27	0,1964	30	0,242
299	23	0,1356	27	0,1964	30	0,242
300	22	0,1204	27	0,1964	30	0,242
301	16	0,0292	23	0,1356	30	0,242
302	16	0,0292	21	0,1052	30	0,242

Continuação da Tabela 5

Dia	Santa Maria		Uberlândia		Sobral		Dia	Santa Maria		Uberlândia		Sobral	
	T	μm	T	μm	T	μm		T	μm	T	μm	T	μm
120	10	0	20	0,09	28,5	0,2192	303	16	0,0292	22	0,1204	30	0,242
121	12	0	18	0,0596	28	0,2116	304	20	0,09	24	0,1508	29	0,2268
122	12	0	20	0,09	27,5	0,204	305	25	0,166	24	0,1508	30	0,242
123	14	0	20	0,09	28	0,2116	306	22	0,1204	20	0,09	30	0,242
124	17	0,0444	21	0,1052	29	0,2268	307	25	0,166	24	0,1508	30	0,242
125	16	0,0292	21	0,1052	28,5	0,2192	308	22	0,1204	22	0,1204	30	0,242
126	12	0	22	0,1204	29,5	0,2344	309	22	0,1204	21	0,1052	30	0,242
127	14	0	22	0,1204	28,5	0,2192	310	23	0,1356	22	0,1204	31	0,2572
128	18	0,0596	22	0,1204	29	0,2268	311	24	0,1508	22	0,1204	30	0,242
129	19	0,0748	24	0,1508	28,5	0,2192	312	26	0,1812	23	0,1356	30	0,242
130	19	0,0748	24	0,1508	28,5	0,2192	313	24	0,1508	23	0,1356	30	0,242
131	20	0,09	23	0,1356	28,5	0,2192	314	22	0,1204	24	0,1508	30	0,242
132	18	0,0596	23	0,1356	29,5	0,2344	315	25	0,166	24	0,1508	30	0,242
133	14	0	24	0,1508	28,5	0,2192	316	27	0,1964	25	0,166	30	0,242
134	12	0	23	0,1356	28,5	0,2192	317	27	0,1964	24	0,1508	30	0,242
135	18	0,0596	23	0,1356	29,5	0,2344	318	26	0,1812	20	0,09	30	0,242
136	19	0,0748	22	0,1204	29	0,2268	319	21	0,1052	20	0,09	30	0,242
137	14	0	20	0,09	29	0,2268	320	19	0,0748	23	0,1356	30	0,242
138	11	0	22	0,1204	29,5	0,2344	321	22	0,1204	24	0,1508	30	0,242
139	10	0	22	0,1204	29	0,2268	322	27	0,1964	24	0,1508	30	0,242
140	10	0	23	0,1356	28,5	0,2192	323	27	0,1964	24	0,1508	30	0,242
141	10	0	23	0,1356	29	0,2268	324	24	0,1508	21	0,1052	30	0,242
142	14	0	22	0,1204	29,5	0,2344	325	25	0,166	22	0,1204	30	0,242
143	14	0	23	0,1356	29	0,2268	326	26	0,1812	22	0,1204	30	0,242
144	12	0	18	0,0596	29	0,2268	327	28	0,2116	22	0,1204	30	0,242
145	11	0	18	0,0596	28,5	0,2192	328	30	0,242	22	0,1204	30	0,242
146	16	0,0292	20	0,09	29,5	0,2344	329	28	0,2116	26	0,1812	30	0,242
147	17	0,0444	22	0,1204	28,5	0,2192	330	29	0,2268	24	0,1508	30	0,242
148	14	0	21	0,1052	28	0,2116	331	20	0,09	24	0,1508	30	0,242
149	14	0	22	0,1204	26,5	0,1888	332	23	0,1356	24	0,1508	30	0,242
150	18	0,0596	18	0,0596	26,5	0,1888	333	24	0,1508	24	0,1508	30	0,242
151	16	0,0292	20	0,09	28	0,2116	334	25	0,166	25	0,166	30	0,242
152	14	0	22	0,1204	28,5	0,2192	335	28	0,2116	24	0,1508	30	0,242
153	14	0	23	0,1356	28,5	0,2192	336	28	0,2116	22	0,1204	30	0,242
154	13	0	22	0,1204	28	0,2116	337	23	0,1356	23	0,1356	30	0,242
155	12	0	20	0,09	29	0,2268	338	25	0,166	25	0,166	30	0,242
156	10	0	22	0,1204	29	0,2268	339	24	0,1508	24	0,1508	30	0,242
157	10	0	24	0,1508	29,5	0,2344	340	22	0,1204	22	0,1204	30	0,242
158	8	0	25	0,166	29	0,2268	341	23	0,1356	23	0,1356	30	0,242
159	10	0	22	0,1204	29,5	0,2344	342	24	0,1508	24	0,1508	30	0,242
160	10	0	18	0,0596	30	0,242	343	22	0,1204	22	0,1204	30	0,242

Continuação da Tabela 6

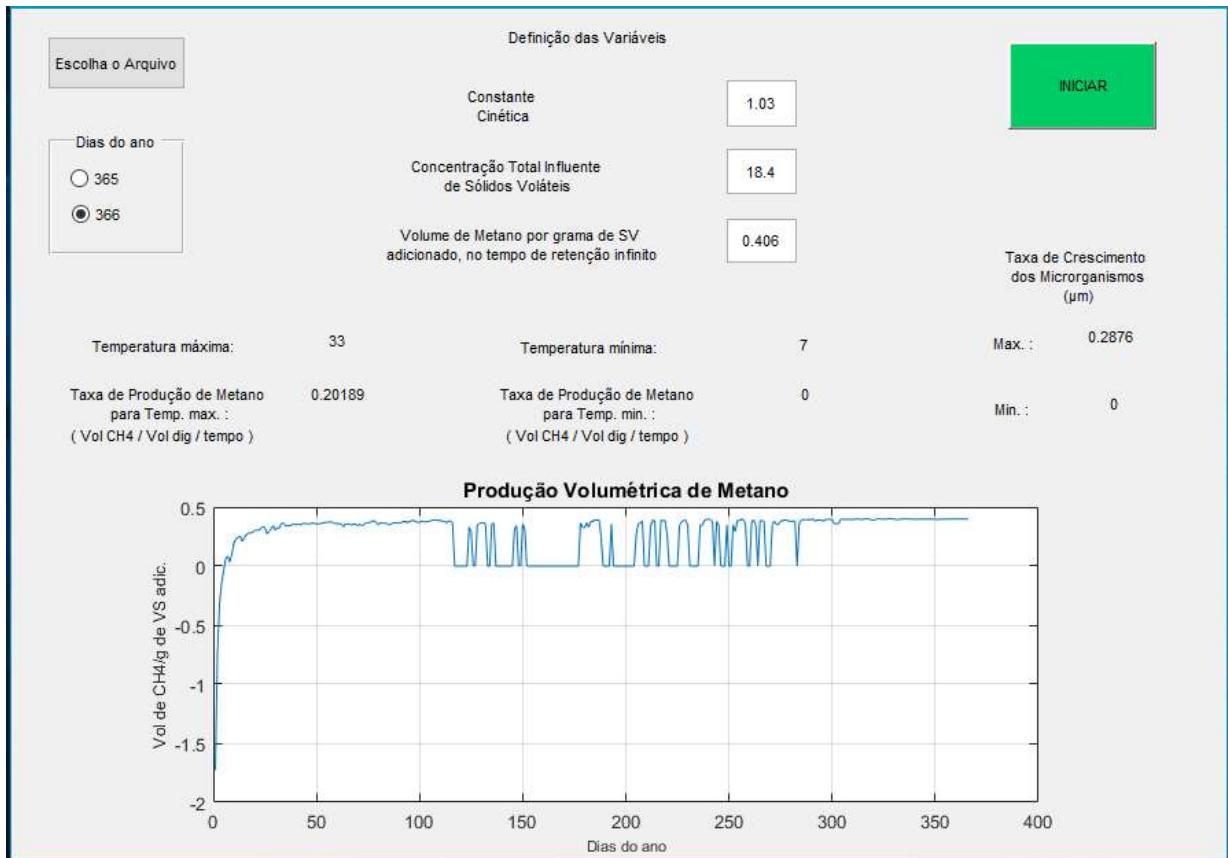
Dia	Santa Maria		Uberlândia		Sobral	
	T	μm	T	μm	T	μm
161	8	0	18	0,0596	29	0,2268
162	8	0	20	0,09	29	0,2268
163	7	0	17	0,0444	28	0,2116
164	9	0	16	0,0292	28	0,2116
165	8	0	16	0,0292	28	0,2116
166	12	0	18	0,0596	28	0,2116
167	14	0	20	0,09	28	0,2116
168	14	0	20	0,09	28	0,2116
169	11	0	19	0,0748	28	0,2116
170	9	0	20	0,09	28	0,2116
171	9	0	20	0,09	29	0,2268
172	8	0	20	0,09	29	0,2268
173	10	0	21	0,1052	29	0,2268
174	14	0	19	0,0748	30	0,242
175	14	0	21	0,1052	28	0,2116
176	10	0	22	0,1204	28	0,2116
177	13	0	20	0,09	29	0,2268
178	18	0,0596	18	0,0596	30	0,242
179	16	0,0292	18	0,0596	28	0,2116
180	16	0,0292	18	0,0596	28	0,2116
181	18	0,0596	19	0,0748	28	0,2116
182	16	0,0292	20	0,09	29	0,2268
183	19	0,0748	20	0,09	28	0,2116
344	24	0,1508	24	0,1508	30	0,242
345	24	0,1508	24	0,1508	30	0,242
346	24	0,1508	24	0,1508	30	0,242
347	25	0,166	25	0,166	30	0,242
348	24	0,1508	24	0,1508	30	0,242
349	24	0,1508	24	0,1508	30	0,242
350	22	0,1204	22	0,1204	30	0,242
351	21	0,1052	21	0,1052	29	0,2268
352	22	0,1204	22	0,1204	30	0,242
353	23	0,1356	23	0,1356	28	0,2116
354	22	0,1204	22	0,1204	28	0,2116
355	24	0,1508	24	0,1508	28	0,2116
356	24	0,1508	24	0,1508	29	0,2268
357	24	0,1508	24	0,1508	29	0,2268
358	24	0,1508	24	0,1508	30	0,242
359	26	0,1812	26	0,1812	30	0,242
360	26	0,1812	26	0,1812	29	0,2268
361	24	0,1508	24	0,1508	30	0,242
362	25	0,166	25	0,166	30	0,242
363	26	0,1812	26	0,1812	30	0,242
364	24	0,1508	24	0,1508	28	0,2116
365	23	0,1356	23	0,1356	29	0,2268
366	24	0,1508	24	0,1508	30	0,242

5.2 Experimento O'Rourke (1968)

A Tabela A, apresentada no Apêndice I, apresenta os resultados obtidos na simulação do Volume de Gás Produzido, e também a Taxa de Produção Volumétrica ao longo do ano com os dados apresentados para o experimento de O'Rourke (1968). Pode-se observar graficamente os resultados e acompanhar as tendências de redução da produção à medida que se reduzem as temperaturas e a oferta de matéria prima.

Distribuindo os dados do experimento conforme mencionado no item 4.4 do capítulo anterior, de acordo com as temperaturas médias da cidade, obtém-se os resultados apresentados nas Figuras 11, 12 e 13.

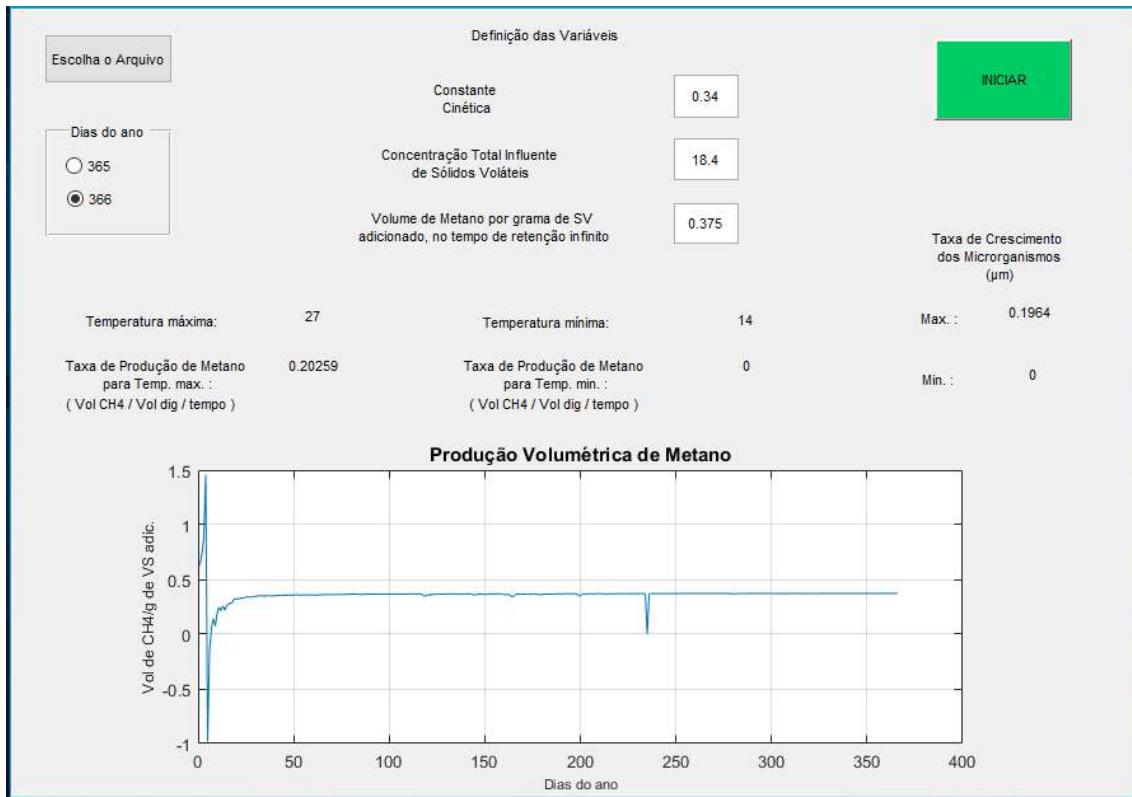
Figura 11 - Captura de tela da simulação com os dados de O'Rourke para Santa Maria – RS.



A Figura 11 apresenta os resultados da simulação realizada com os dados do experimento de O'Rourke (1978), para a temperatura média de 20°C, onde foram inseridas as temperaturas médias diárias da cidade de Santa Maria – RS, que foram coletadas no ano de 2016.

Pode-se observar que entre os dias 110 e 270 a Taxa de Produção Volumétrica de Metano sofre uma forte redução, chegando a encerrar a produção de gás, devido às quedas de temperatura que ocorrem neste período que corresponde ao inverno.

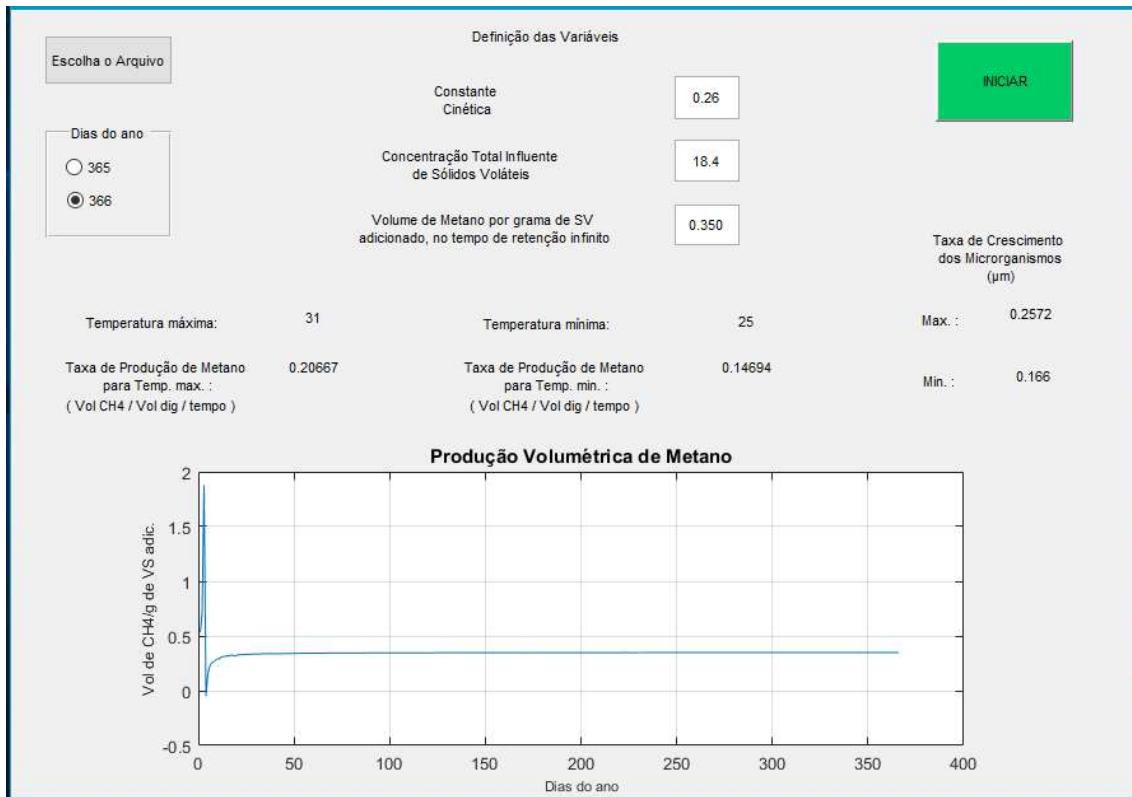
Figura 12 - Captura de tela da simulação com os dados de O'Rourke para Uberlândia - MG.



A Figura 12 apresenta os resultados da simulação realizada com os dados do experimento de O'Rourke (1978), para a temperatura média de 25°C, onde foram inseridas as temperaturas médias da cidade de Uberlândia – MG, que foram coletadas no ano de 2016.

Conforme podemos observar na tabela apresentada no Apêndice I, ocorre uma leve redução na produção de biogás durante o período mais frio do ano, mas a redução não chega a ser perceptível graficamente. O inverno na região sudeste do país não é tão rigoroso quanto na região sul, então a produção de gás se mantém ligeiramente mais estável.

Figura 13 - Captura de tela da simulação com os dados de O'Rourke para Sobral – CE.



A Figura 13 apresenta os resultados da simulação realizada com os dados do experimento de O'Rourke (1978), para a temperatura média de 30°C, onde foram inseridas as temperaturas médias da cidade de Sobral – CE, que foram coletadas no ano de 2016.

Apesar da resposta oscilatória do período de acomodação do sistema apresentar um pico positivo muito alto, e a aparência da curva de produção de metano estar muito próxima do zero, podemos acompanhar os valores na tabela do Apêndice I e observar que ao longo do ano, a cidade de Sobral apresenta o melhor desempenho na produção de biogás.

Quase não há variações de temperatura ao longo do ano, mesmo nos meses do inverno a temperatura se mantém alta, então a produção de gás se mantém estável ao longo de todo o ano, sofrendo reduções naturais apenas pelo esgotamento de matéria orgânica dentro do biodigestor.

É importante salientar, entretanto, que apesar dos valores da taxa de produção volumétrica de Sobral se manterem maiores que a média dos outros locais ao longo do ano, o resultado apresentado pelo software é consideravelmente maior porque a menor temperatura do ano ocorre mais cedo que nos outros locais. A taxa de produção volumétrica, conforme observamos nas equações dos capítulos anteriores, está diretamente relacionada ao tempo de retenção do resíduo no biodigestor.

Ao final do ano, como o sistema é operado com bateladas, e não há inserção de matéria orgânica, é natural que as Taxas de Produção Volumétricas e, consequentemente, o Volume de Gás produzido, em todos os experimentos, sofram redução.

Observa-se no gráfico da Figura 11 as quedas na produção por consequência da diminuição de temperatura durante o inverno rigoroso da cidade de Santa Maria – RS, em oposição ao que é apresentado na Figura 13, onde em Sobral – CE não há variações de temperatura ao longo do ano, e que, portanto, a queda na produção ocorre apenas em consequência da redução de oferta de matéria prima.

Pode-se concluir, assim, que para regiões cujas temperaturas são mais altas e possuem menos variações ao longo do ano, o sistema poderá suportar uma carga maior de matéria orgânica, sem sofrer grandes perdas na produção.

Os resultados obtidos para os 5 primeiros dias apresentam valores incoerentes que podem ser explicados por instabilidade nas reações até que o sistema entre em regime permanente de produção. Chen e Hashimoto (1978) afirmam que a produção de gás em função do tempo de retenção só apresenta comportamento linear quando $\theta \geq 10$ dias.

Por esse motivo, os dados dos experimentos de Bryant (1976) e Varel (1977) não serão utilizados nas simulações deste trabalho, pois os tempos de retenção utilizados para obtenção dos parâmetros são inferiores a 10 dias.

5.3 Discussão

Conforme mencionado anteriormente, muito além da temperatura, outros fatores como a quantidade de matéria orgânica que entra no sistema também interferem drasticamente na quantidade de metano produzido.

O tipo de matéria orgânica associado à temperatura também tem forte influência no processo. Miranda (2006) afirma que dejetos bovinos iniciam sua degradação mais rápido e apresentam melhor desempenho que dejetos suínos.

Gunnerson & Stuckey (1986) afirmam que, para lama de esgoto, as regiões de temperatura onde a biodigestão é otimizada são bem definidas em 35°C na zona mesofílica; e 55°C na zona termofílica, e para resíduos bovinos, esgoto bruto e resíduos da agricultura, essas regiões não são tão bem definidas.

Por esse motivo, recomenda-se que não seja utilizada uma equação de cálculo tão genérica quanto a desenvolvida no modelo de Hashimoto (1981). Diferentes resíduos responderão de maneiras diversas para cada condição de experimento.

Em relação à temperatura, conclui-se observando as simulações que a produção de metano sofre variações em localidades cujos invernos são mais rigorosos, mas não há prejuízo considerável para o restante do ano que possa ser motivo de contraindicação de uso desse tipo de sistema.

Apesar disso, o ideal para que um biodigestor mantenha sua operação constante ao longo de todo o ano é que seja instalado em locais que apesar das variações naturais do clima ao longo do ano, a temperatura interna do sistema se mantenha pelo menos dentro da zona mesofílica.

Biodigestores que operam com temperaturas mais próximas da zona termofílica apresentam melhor desempenho e maior capacidade de processamento de carga do que outros tipos de sistema que operam com temperaturas mais baixas.

Tietz (2014) afirma, a partir de medições de temperatura em biodigestores do tipo BioKohler, que a produção de biogás pode ter sido influenciada pelas variações de temperatura externa, pois as temperaturas das regiões intermediária e inferior seguiram

as tendências de temperatura externa, mesmo se mantendo na faixa mesofílica, enquanto a parte superior do sistema foi influenciada pelas variações de temperatura externa.

Quando não houver opção de escolha do local de instalação do sistema, deve-se escolher então o tipo de biodigestor. Para locais onde há grandes variações de temperatura, indica-se a instalação dos sistemas indiano ou chinês, que possuem a maior parte de seu corpo enterrados. Enquanto locais que apresentem grande incidência de raios solares e pouca variação ao longo do ano, indica-se o modelo de lona.

A produção total de metano neste experimento foi de 97,2672 litros de biogás em Santa Maria – RS, 123,0098 litros em Uberlândia – MG e 129,0437 litros em Sobral – CE, confirmando os resultados esperados de que a região que apresenta temperaturas mais elevadas e mais constantes ao longo do ano apresentaria o melhor desempenho de produção de gás.

As quantidades de matéria orgânica inseridas nos experimentos testados não são suficientemente consideráveis para geração de energia elétrica.

Capítulo 6

Conclusão

Este estudo objetivava demonstrar a influência da temperatura no processo de biodigestão anaeróbica. Conforme apresentado no Capítulo 5, os experimentos demonstravam respostas completamente diferentes para cada região testada, ou seja, apresentava um comportamento melhor ou pior, dependendo das variações de temperatura do meio externo.

Os experimentos mostraram que quanto menores as oscilações de temperatura em uma localidade, melhor será a sua resposta de produção de metano. Regiões mais quentes, e que apresentam invernos com temperaturas amenas, tem potencial de produzir grande quantidade de gás durante todo o ano, enquanto regiões cujos invernos apresentam temperaturas mais rigorosas perdem sua capacidade produtiva nos dias mais frios, conforme observa-se a produção total de gás apresentada no capítulo anterior.

Os sistemas, quando possuírem a capacidade de manter sua temperatura externa constante ao longo de todo o ano, poderão receber uma carga maior de matéria orgânica, sem perder sua capacidade produtiva devido ao excesso de insumo.

Para locais cujos invernos apresentam grandes variações de temperatura, indica-se a utilização de biodigestores que possuem grande parte de sua construção subterrânea, como os modelos chinês e indiano. Locais cujos meses mais frios não possuem grandes variações de temperatura, pode-se optar pela construção de biodigestores do tipo canadense ou de lona.

Conforme mencionado no Capítulo 2, o tipo de solo ao redor do biodigestor, além do revestimento interno que este possui, pode ainda contribuir para a diminuição do impacto gerado no sistema pela variação de temperatura externa. Alguns tipos de solo, a depender de sua composição, umidade e cobertura vegetal, possuem maiores susceptibilidade às variações do meio.

Analisando os resultados dos testes aqui realizados e os experimentos apresentados na Tabela 1, observa-se a veracidade nos estudos de Hashimoto (1978) que a Constante Cinética é um ótimo indicador da estabilidade do sistema. Observa-se nas simulações que para temperaturas abaixo da zona mesofílica a produção de gás sofria oscilações os valores de K crescia, enquanto os experimentos realizados dentro dessa faixa de temperatura, os valores de K se mantinham baixos.

6.1 Sugestões para trabalhos futuros

- Construir modelos de biodigestores em pequena escala e testar os experimentos nos locais mencionados para comparar os resultados.
- Medir, conforme o experimento de Tietz (2014), a temperatura e acompanhar a produção de gás em plantas já existentes, mas em outros modelos de biodigestores diferentes do modelo de BioKohler, e comparar os resultados.
- Realizar experimentos com diferentes tipos de resíduos para encontrar as faixas de temperatura que estes responderão melhor ao processo de decomposição anaeróbica.
- Disponibilizar cálculo do volume de gás produzido, para que se possa prever a quantidade máxima de gás que poderá ser utilizada por dia, e, dessa forma, possa-se evitar o consumo excessivo do mesmo, impedindo a exaustão do sistema.

REFERÊNCIAS

- BATSTONE, D.J.; KELLER, J; et. al. **The IWA Anaerobic Digestion Model No 1 (ADM1)**. *Wat. Sci. Technol.*, v. 45, p. 65-73, 2002.
<https://doi.org/10.2166/wst.2002.0292>
- BINGEMER, H. J., CRUTZEN, P.J. **The Production of Methane from Solid Wastes**. *Journal of Geophysical Research*, vol. 92, no. D2, p. 2181-2187, 1987.
<https://doi.org/10.1029/JD092iD02p02181>
- BRYANT, M. P., VAREL, V. H., et. al., **Biological Potential of Thermophilic Methanogenesis from Cattle Wastes**. In: H. G. Schlegel (ed.). *Seminar on Microbial Energy Conversion*. E. Goltze KG, Gottingen, Alemania. 1976.
- CLASSEN, P.A.M; LIER, J.B.; STAMRS, A.J.M. – **Utilization of biomass for supply of energy**, 1999.
- CONTOIS, D. E. **Kinetics of Bacterial Growth: Relationship Between Population Density and Specific Growth Rate of Continuous Cultures**. *J. Gen. Microbiol.*, no 21, p 40-50, 1959.
<https://doi.org/10.1099/00221287-21-1-40>
- DEGANUTTI, R.; PALHACI, M.C. J. P.; ROSSI, M.; et. al.; **Biogestores rurais: modelo indiano, chinês e Batelada**. Bauru-SP, 2008.
- GOSSETT, J.M., BELSER, R.L. (1982). **Anaerobic digestion of waste activated sludge**. *J. Environ. Eng. ASCE* 108, 1101–1120.
- GUNNERSON, C.G., STUCKEY, D. (1986) **Anaerobic digestion : principles and practices for biogas systems**. Washington, D.C., U.S.A.: World Bank.
- HASHIMOTO, A.G.; CHEN, Y.R.; **Kinetics of Methane Fermentation**. *Biotech. Bioeng. Symp.*, (8). 269-82, 1978.
- HASHIMOTO, A.G.; CHEN, Y.R.; VAREL,V.H. **Theoretical Aspects of Methane Production: state-of-the-art**. *Livestock wastes: A renewable resource*. ASAE, St. Joseph, MI, 1981, p. 86-91.
- HASHIMOTO, A.G; **Thermophilic and Mesophilic Anaerobic Fermentation of Swine Manure**. *Agricultural Wastes* 6, 1983, p. 175-91.
[https://doi.org/10.1016/0141-4607\(83\)90085-9](https://doi.org/10.1016/0141-4607(83)90085-9)

HILL, D. T.. **Desing of Digestion Systems for Maximum Methane Production**, Trans. ASAE, 25, 226-30, 1982.
<https://doi.org/10.13031/2013.33509>

MIRANDA, A. P., AMARAL, L. A., JUNIOR, J. L., **Influência da Temperatura na Biodigestão Anaeróbica de Déjetos de Bovinos e Suínos**. X Encontro Latino Americano de Iniciação Científica e VI Encontro Latino Americano de Pós-Graduação – Universidade do Vale do Paráiba. 2006.

INSTITUTO WINROCK: **Manual de Treinamento em Biodigestão**. Versão 2.0, 2008.
MONOD, J. **The Growth of Bacterial Cultures**. Ann. Rev. of Microbiol., no 3, p 371-394, 1949.

MORRIS, G. R. **Anaerobic Fermentation of Animal Wastes: a Kinetic and Empirical Design Evaluation**. M. S. Thesis. Cornell University, Nova York – EUA. 1976

NOGUEIRA, L.A.H. – **Biodigestão, a alternativa energética**. Editora Nobel, São Paulo, 1986.

O'Rourke, J. R. **Kinetics of Anaerobic Treatment at Reduced Temperatures**. Ph. D. Thesis. Stanford University, California – EUA. 1968.

PEREIRA, A. R.; ANGELOCCI, L. R., SENTELHAS, P. C.. **Meteorologia Agrícola**. LCE 306. 3^a Ed. Universidade de São Paulo, Piracicaba – SP. 2000.

PFEFFAR, J. T. **Temperature Effects on Anaerobic Fermentation of Domestic Refuse**. Biotechnology and Bioengineering 16:771. 1974.

<https://doi.org/10.1002/bit.260160607>

RETTERBERGER, G.; TABASARAN O., **Untersuchungen zur Entstehung, Austbreitung und Ableitung von Zersetzungsgasen in Abfallablagerungen** (Studies on the formation, spreading and dissipation of decomposition gases in waste deposits). Rep. 103 02 207, 249 pp., Umweltbundesamt, Berlin, 1980.

ROVERS, F. A.; TREMBLAY, J. J.; MOOJI, H., **Procedures for landfill gas monitoring and control**, Proceedings of an international seminar, Rep. Eps 4-EC-77-4, Fish. and Environ. Can., Waste Manage. Br., Ottawa, Ontario, 1977.

SANCHEZ, E.; BORJA, R.; TRAVIESO, et. al. **Effect of organic loading rate on the stability, operational parameters and performance of a secondary upflow anaerobic sludge bed reactor treating piggery waste**. Bioresource Technology, v.96, p.335-344, 2005.

SEIXAS, Jorge; MARCHETTI, Delmar A. B.. **Construção e funcionamento de biodigestores**. Brasília: Embrapa Suínos e Aves, 1981. 60 p.

SOARES, R. C.; DA SILVA, S. R. C. M. **Evolução Histórica do Uso de Biogás como Combustível**. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Mato Grosso – IFT: Cuiabá, 2010.

SOUZA, C. F.; CAMPOS, J. A. **Avaliação do Tempo de Retenção Hidráulica, Agitação e Temperatura em Biodigestores Operando com Dejetos Suínos.** Rev. Bras. Agroecologia, v.2, n.1, fev. 2007.

TABASARAN, O., **Abfallbeseitigung und Abfallwirtschaft** (Waste disposal and waste management), 280 pp., VDI Verlag, Düsseldorf, 1982.

TIETZ, C. M., ZENATTI, D. C., FEIDEN, A., et. al. **Influência da Temperatura na Produção de Biogás a Partir de Dejetos da Bovinocultura de Leite.** Revista Brasileira de Energias Renováveis, v. 3, p. 80 – 96, 2014.

<https://doi.org/10.5380/rber.v3i2.37553>

VAREL, V. H., ISAACSON, H. R., BRYANT, M. R., **Thermophilic Methane Production from Cattle Waste.** Appl. Environ. Microbiol. 33:298. 1977

WAYNE, J. P.. **Application of the adm1 model to advanced anaerobic digestion.** Bioresource Technology, v.96, p.1832-1842, 2005.
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2005.01.022>

WEREKO-BROBBY, C. Y., HAGEN, E.B. **Biomass conversion and technology.** New York: Editora John Wiley & Sons. 2000.

ZOHOROVIC, M.; ANDREJAS, F.; et. al. **Defining Key Parameters to Control the Anaerobic Digestion of Organic Matter.** 4th International Symposium on Environmental Management. Croatia, 2016.

APENDICE I

Apresentação Detalhada dos Resultados

A. Experimento O'Rourke (1968)

Tabela A - Resultados obtidos na simulação do experimento de O'Rourke.

Dia	Santa Maria - RS		Uberlândia - MG		Sobral - CE	
	K = 1,03		K = 0,34		K = 0,26	
	B	γv	B	γv	B	γv
1	-1,7275714	-31,787314	0,6330972	11,648988	0,5327309	9,802249
2	-0,7491934	-6,892579	0,7307478	6,7228795	0,7054688	6,4903125
3	-0,3230446	-1,9813404	0,8785545	5,3884676	1,8768456	11,51132
4	-0,1480276	-0,6809268	1,4591837	6,7122449	-0,0491228	-0,2259649
5	-0,0407735	-0,1500465	-0,981383	-3,6114894	0,156383	0,5754894
6	0,0599391	0,1838132	-0,1458333	-0,4472222	0,222191	0,6813858
7	0,0839267	0,2206073	0,0527048	0,1385382	0,2546122	0,6692662
8	0,0308834	0,0710318	0,1416545	0,3258053	0,2653016	0,6101936
9	0,1045438	0,2137341	0,0740085	0,1513063	0,2800646	0,5725764
10	0,1962808	0,3611568	0,1918103	0,352931	0,290445	0,5344188
11	0,2286247	0,3824268	0,2473468	0,4137438	0,2926808	0,4895751
12	0,2432334	0,3729578	0,2125382	0,3258919	0,3079482	0,4721873
13	0,2556188	0,3617989	0,2593852	0,3671298	0,3121779	0,4418518
14	0,2106983	0,2769178	0,2181348	0,2866915	0,3126314	0,410887
15	0,2400556	0,2944681	0,2637435	0,3235253	0,3185121	0,3907082
16	0,2632375	0,3027231	0,2743209	0,315469	0,3209451	0,3690868
17	0,2818668	0,3050793	0,2830617	0,3063727	0,323029	0,3496314
18	0,2789554	0,2851544	0,2904061	0,2968595	0,3248341	0,3320526
19	0,2855842	0,2765657	0,3238773	0,3136496	0,3163312	0,3063418
20	0,3003456	0,276318	0,3208829	0,2952122	0,3239404	0,2980252
21	0,3053405	0,2675364	0,3241383	0,2840069	0,3273789	0,2868463
22	0,3018819	0,252483	0,3270244	0,2735113	0,3285862	0,2748176
23	0,3206014	0,2564811	0,3296005	0,2636804	0,3296712	0,2637369
24	0,3343693	0,2563498	0,331914	0,2544674	0,3290245	0,2522521
25	0,3273947	0,2409625	0,338467	0,2491117	0,3315416	0,2440146

Continuação da Tabela A.

Dia	Santa Maria - RS		Uberlândia - MG		Sobral - CE	
	K = 1,03		K = 0,34		K = 0,26	
	B	γV	B	γV	B	γV
26	0,2736813	0,1936822	0,3435278	0,243112	0,3323534	0,2352039
27	0,2927089	0,1994757	0,3376275	0,2300869	0,3330968	0,2269993
28	0,3166071	0,2080561	0,3392095	0,2229091	0,3337801	0,2193412
29	0,3427084	0,2174426	0,340663	0,2161448	0,3344103	0,2121776
30	0,3039551	0,1864258	0,3454861	0,2118981	0,3369553	0,2066659
31	0,3252079	0,1930266	0,3492798	0,2073145	0,3365424	0,1997542
32	0,3198768	0,1839291	0,3523325	0,2025912	0,3360378	0,1932217
33	0,3620772	0,2018855	0,351032	0,195727	0,3365073	0,1876283
34	0,3633651	0,1966447	0,3494181	0,1890969	0,3378472	0,182835
35	0,3403723	0,1789386	0,3473906	0,1826282	0,3389857	0,1782096
36	0,3421869	0,1748955	0,3532542	0,1805521	0,338585	0,1730546
37	0,3439039	0,1710225	0,3517421	0,1749204	0,3389214	0,1685447
38	0,3455309	0,1673097	0,3498541	0,169403	0,3384494	0,1638808
39	0,3588822	0,1693188	0,3505803	0,165402	0,3387726	0,1598312
40	0,3485419	0,1603293	0,3512658	0,1615823	0,3382185	0,1555805
41	0,3579643	0,1606474	0,3519139	0,1579321	0,3385327	0,1519269
42	0,3512673	0,1538885	0,3548004	0,1554364	0,3353979	0,1469362
43	0,3566584	0,1526166	0,3531093	0,1510979	0,3391133	0,1451089
44	0,3642204	0,1523104	0,3536618	0,1478949	0,3393821	0,1419234
45	0,3588439	0,1467273	0,3579864	0,1463767	0,3387627	0,1385163
46	0,3560096	0,1424038	0,3546871	0,1418748	0,3406116	0,1362446
47	0,3608441	0,1412666	0,3551637	0,1390428	0,3408262	0,1334298
48	0,3649488	0,1398971	0,3591371	0,1376692	0,3395248	0,1301512
49	0,3590599	0,1348307	0,3560527	0,1337014	0,3405488	0,1278795
50	0,3599956	0,1324784	0,356468	0,1311802	0,339978	0,1251119
51	0,3567792	0,1287203	0,3601419	0,1299336	0,3401902	0,1227353
52	0,3617594	0,1280072	0,3604492	0,1275436	0,3417674	0,1209331
53	0,3625915	0,1258808	0,3576114	0,1241519	0,3419329	0,1187088
54	0,3694981	0,1259031	0,3579618	0,1219722	0,3426184	0,1167441
55	0,3701601	0,1238354	0,3582984	0,1198671	0,3422448	0,1144964
56	0,3731521	0,1226071	0,3586219	0,1178329	0,3423918	0,1125002
57	0,3757497	0,1212946	0,3589332	0,1158661	0,3425334	0,1105722
58	0,366323	0,1162128	0,3607828	0,1144552	0,3426698	0,108709
59	0,3591566	0,1120082	0,3595214	0,1121219	0,3422516	0,1067361
60	0,3599348	0,11038	0,3579454	0,1097699	0,3423888	0,1049992
61	0,3606875	0,1087975	0,3559257	0,1073612	0,3430507	0,1034776
62	0,3564362	0,1057811	0,3603273	0,1069358	0,343169	0,1018437

Continuação da Tabela A.

Dia	Santa Maria - RS		Uberlândia - MG		Sobral - CE	
	K = 1,03		K = 0,34		K = 0,26	
	B	γv	B	γv	B	γv
63	0,3326351	0,0971506	0,356589	0,1041466	0,3427725	0,1001113
64	0,3579797	0,1029192	0,3608195	0,1037356	0,3433939	0,0987258
65	0,3527693	0,0998609	0,3610534	0,1022059	0,3430075	0,0970975
66	0,35943	0,1002047	0,3612797	0,1007204	0,3436045	0,0957928
67	0,3469217	0,095274	0,3614988	0,0992773	0,3437049	0,0943906
68	0,3551092	0,0960884	0,361711	0,0978747	0,3438021	0,0930288
69	0,3558441	0,0948918	0,3619166	0,0965111	0,3438964	0,0917057
70	0,3399368	0,0893548	0,362116	0,0951848	0,3439878	0,0904197
71	0,357252	0,0925836	0,3623094	0,0938943	0,3440766	0,0891691
72	0,3417634	0,0873395	0,3624971	0,0926381	0,3441628	0,0879527
73	0,3517585	0,0886624	0,3611995	0,0910421	0,3438124	0,0866596
74	0,3644496	0,0906199	0,3640313	0,0905159	0,3443278	0,0856166
75	0,3691235	0,0905583	0,3630282	0,0890629	0,3439855	0,0843911
76	0,3696074	0,0894839	0,3631953	0,0879315	0,3440684	0,0833008
77	0,3803812	0,0908963	0,3633579	0,0868284	0,3441491	0,0822382
78	0,3838811	0,0905566	0,363516	0,0857525	0,3446314	0,0812977
79	0,3709859	0,0864069	0,3647623	0,0849573	0,3447023	0,0802851
80	0,3481604	0,0800769	0,3657849	0,0841305	0,3443786	0,0792071
81	0,3680306	0,083602	0,365904	0,0831189	0,3444511	0,0782457
82	0,3637715	0,0816268	0,3660201	0,0821313	0,3449041	0,0773931
83	0,3642788	0,0807558	0,3661333	0,0811669	0,3445907	0,0763912
84	0,3588376	0,0786025	0,365402	0,0800404	0,3450304	0,0755781
85	0,3515495	0,0761001	0,3616827	0,0782937	0,3450912	0,0747021
86	0,3521802	0,0753502	0,3634108	0,077753	0,3447874	0,0737685
87	0,3661915	0,0774474	0,3647669	0,0771461	0,3448498	0,0729338
88	0,3666426	0,0766616	0,3648893	0,076295	0,345265	0,0721918
89	0,3670836	0,0758914	0,3659664	0,0756605	0,3453202	0,071392
90	0,3675148	0,0751364	0,3651255	0,0746479	0,3450284	0,0705391
91	0,3679366	0,074396	0,366174	0,0740396	0,3454269	0,0698446
92	0,3759229	0,0751846	0,3653509	0,0730702	0,3454784	0,0690957
93	0,3789648	0,074978	0,3671255	0,0726356	0,3455288	0,0683627
94	0,3691482	0,0722588	0,3672127	0,0718799	0,3455781	0,0676451
95	0,3768707	0,0729939	0,3672979	0,0711398	0,3456263	0,0669424
96	0,3820014	0,0732169	0,3673813	0,0704148	0,3453509	0,0661923
97	0,3870174	0,0734136	0,3658717	0,0694025	0,3457196	0,0655798
98	0,3803416	0,0714111	0,3659692	0,0687126	0,3460393	0,0649707
99	0,3710047	0,0689544	0,367621	0,0683255	0,345809	0,0642716

Continuação da Tabela A.

Dia	Santa Maria - RS		Uberlândia - MG		Sobral - CE	
	K = 1,03		K = 0,34		K = 0,26	
	B	γv	B	γv	B	γv
100	0,3713538	0,0683291	0,3676976	0,0676564	0,3458523	0,0636368
101	0,3785978	0,0689723	0,3677726	0,0670002	0,3455893	0,0629588
102	0,3788659	0,0683444	0,3663393	0,0660847	0,3464306	0,0624934
103	0,3723604	0,0665188	0,3664271	0,0654588	0,3459771	0,0618056
104	0,3793867	0,0671223	0,3665131	0,0648446	0,346017	0,0612184
105	0,3796397	0,0665273	0,3680578	0,0644978	0,3460562	0,0606422
106	0,3873808	0,0672435	0,3666802	0,0636501	0,3460946	0,0600768
107	0,3916674	0,0673521	0,3667612	0,0630692	0,3463823	0,0595648
108	0,3900182	0,0664475	0,3668407	0,0624988	0,3464168	0,0590192
109	0,3864932	0,0652429	0,3669187	0,0619386	0,3462054	0,058442
110	0,388057	0,0649114	0,3669952	0,0613883	0,3462409	0,0579167
111	0,3782722	0,0627046	0,3670703	0,0608477	0,3459996	0,0573549
112	0,3812843	0,0626396	0,367144	0,0603165	0,3463101	0,0568938
113	0,365002	0,0594339	0,3672163	0,0597945	0,3460726	0,0563517
114	0,3817171	0,0616105	0,3672873	0,0592815	0,3461082	0,0558631
115	0,3819279	0,0611085	0,367357	0,0587771	0,3461431	0,0553829
116	0,3660592	0,0580646	0,3674255	0,0582813	0,346441	0,0549527
117	0	0	0,3674928	0,0577937	0,3464723	0,0544879
118	0	0	0,3471567	0,0541329	0,346503	0,054031
119	0	0	0,3474241	0,0537194	0,3465332	0,0535816
120	0	0	0,362426	0,055572	0,3465629	0,0531396
121	0	0	0,3555391	0,0540655	0,34634	0,0526666
122	0	0	0,3626453	0,0546941	0,3463709	0,0522395
123	0	0	0,3627522	0,0542654	0,3464013	0,0518194
124	0,3304562	0,0490354	0,3647051	0,0541175	0,3466768	0,0514424
125	0,2923641	0,043036	0,3647918	0,0536974	0,3467041	0,0510348
126	0	0	0,3662132	0,0534788	0,3469414	0,0506645
127	0	0	0,3662855	0,0530681	0,3467574	0,0502389
128	0,3513988	0,0505136	0,3663566	0,0526638	0,3467834	0,0498501
129	0,362796	0,0517476	0,3682156	0,0525207	0,3468089	0,0494673
130	0,3631273	0,0513965	0,3682696	0,0521243	0,3468341	0,0490904
131	0,370621	0,0520567	0,3675454	0,0516247	0,3468589	0,0487191
132	0,3530471	0,0492126	0,3676041	0,0512418	0,3470837	0,0483814
133	0	0	0,3684266	0,0509703	0,3469073	0,0479932
134	0	0	0,3677186	0,0504927	0,346931	0,0476383
135	0,3542194	0,0482788	0,3677746	0,0501263	0,34715	0,0473153

Continuação da Tabela A.

Dia	Santa Maria - RS		Uberlândia - MG		Sobral - CE	
	K = 1,03		K = 0,34		K = 0,26	
	B	γv	B	γv	B	γv
136	0,3650132	0,0493841	0,3668864	0,0496376	0,3469772	0,046944
137	0	0	0,3640746	0,0488976	0,3469998	0,0466044
138	0	0	0,3670089	0,0489345	0,3472134	0,0462951
139	0	0	0,3670687	0,0485904	0,347044	0,0459396
140	0	0	0,3680419	0,0483712	0,3470657	0,0456143
141	0	0	0,368093	0,0480348	0,347087	0,0452936
142	0	0	0,367243	0,0475864	0,3472936	0,0450014
143	0	0	0,368193	0,0473759	0,3471286	0,0446655
144	0	0	0,3589064	0,0458603	0,3471491	0,0443579
145	0	0	0,3590266	0,0455592	0,3471692	0,0440546
146	0,3085948	0,0388914	0,3647837	0,0459727	0,3473693	0,0437781
147	0,3422219	0,0428359	0,3675171	0,0460021	0,3472086	0,0434601
148	0	0	0,3664485	0,0455585	0,3470239	0,0431435
149	0	0	0,3676214	0,0453975	0,3468097	0,0428275
150	0,3593802	0,044084	0,3596014	0,0441111	0,3468315	0,0425447
151	0,3117983	0,037994	0,3651392	0,0444938	0,3470844	0,0422937
152	0	0	0,3677724	0,0445198	0,3473024	0,0420419
153	0	0	0,3686525	0,0443347	0,3473204	0,0417693
154	0	0	0,3678698	0,0439533	0,3471425	0,0414768
155	0	0	0,3654063	0,0433773	0,3473557	0,0412345
156	0	0	0,3679645	0,0434009	0,347373	0,0409722
157	0	0	0,3694603	0,0432998	0,3475573	0,0407328
158	0	0	0,3700133	0,0430902	0,347407	0,0404575
159	0	0	0,368102	0,042598	0,3475886	0,0402241
160	0	0	0,3606354	0,0414731	0,347604	0,0399745
161	0	0	0,3607312	0,0412264	0,3474563	0,0397093
162	0	0	0,3658405	0,0415523	0,3474723	0,039466
163	0	0	0,3556149	0,040143	0,3473038	0,0392048
164	0	0	0,3441194	0,0386085	0,3473206	0,0389677
165	0	0	0,3443362	0,0383987	0,3473372	0,0387334
166	0	0	0,3611917	0,0400357	0,3473535	0,0385018
167	0	0	0,3661273	0,0403398	0,3473697	0,0382731
168	0	0	0,3661826	0,0401057	0,3473857	0,038047
169	0	0	0,3643583	0,0396698	0,3474015	0,0378236
170	0	0	0,366291	0,0396456	0,3474171	0,0376028

Continuação da Tabela A.

Dia	Santa Maria - RS		Uberlândia - MG		Sobral - CE	
	K = 1,03		K = 0,34		K = 0,26	
	B	γv	B	γv	B	γv
171	0	0	0,3663442	0,0394195	0,347608	0,0374034
172	0	0	0,3663968	0,0391959	0,3476221	0,0371875
173	0	0	0,3677307	0,0391112	0,3476361	0,036974
174	0	0	0,3646805	0,0385639	0,3478002	0,0367789
175	0	0	0,3678169	0,0386733	0,3474924	0,0365363
176	0	0	0,3687897	0,0385553	0,347507	0,0363303
177	0	0	0,3666503	0,0381151	0,3476906	0,0361441
178	0,3666929	0,0379053	0,3621844	0,0374393	0,3478505	0,0359576
179	0,3264497	0,0335568	0,3622607	0,037238	0,3475496	0,0357258
180	0,3268891	0,0334153	0,3623361	0,0370388	0,3475635	0,0355287
181	0,3673426	0,0373431	0,3651	0,0371151	0,3475772	0,0353338
182	0,3277536	0,0331355	0,3668893	0,0370921	0,3477552	0,0351577
183	0,3755169	0,0377569	0,3669355	0,0368941	0,3476042	0,0349504
184	0,3807932	0,0380793	0,3652696	0,036527	0,3479218	0,0347922
185	0,3893501	0,0387245	0,3670263	0,0365042	0,3477922	0,0345912
186	0,3911069	0,0386901	0,3670709	0,0363124	0,3478043	0,0344064
187	0,3911865	0,0384911	0,367115	0,0361225	0,3476564	0,0342079
188	0,2489076	0,0243612	0,3671587	0,0359347	0,3478281	0,0340427
189	0	0	0,3672018	0,0357488	0,3476817	0,0338484
190	0	0	0,3692609	0,03576	0,3476941	0,0336714
191	0	0	0,3692918	0,0355758	0,3475253	0,0334789
192	0	0	0,3693224	0,0353934	0,3475385	0,0333058
193	0,3573699	0,0340705	0,3693527	0,0352129	0,3477306	0,0331515
194	0	0	0,3700285	0,0350955	0,3477425	0,0329818
195	0	0	0,3694123	0,0348574	0,3477543	0,0328137
196	0	0	0,3694416	0,0346823	0,347766	0,0326474
197	0	0	0,3701062	0,0345683	0,3477775	0,0324828
198	0	0	0,3706333	0,0344427	0,3477889	0,0323198
199	0	0	0,3502466	0,0323846	0,3478003	0,0321584
200	0	0	0,3503861	0,0322355	0,3478114	0,0319987
201	0	0	0,367685	0,0336587	0,3478225	0,0318405
202	0	0	0,3677226	0,0334955	0,3478335	0,0316838
203	0	0	0,3688393	0,0334317	0,3478444	0,0315288
204	0	0	0,3688704	0,0332707	0,3478551	0,0313752
205	0,2618	0,0234981	0,3678331	0,0330153	0,3478658	0,0312231

Continuação da Tabela A.

Dia	Santa Maria - RS		Uberlândia - MG		Sobral - CE	
	K = 1,03		K = 0,34		K = 0,26	
	B	γv	B	γv	B	γv
206	0,3604288	0,0321936	0,3697188	0,0330234	0,3480209	0,0310854
207	0,3606482	0,0320576	0,368962	0,0327966	0,3480306	0,0309361
208	0,3836971	0,0339424	0,368992	0,0326416	0,3478971	0,0307755
209	0	0	0,3708681	0,0326506	0,3479073	0,0306292
210	0	0	0,3708882	0,0324969	0,3479174	0,0304842
211	0	0	0,3698473	0,0322521	0,3480685	0,0303529
212	0,3387728	0,0294029	0,3691088	0,0320359	0,3480778	0,0302105
213	0,3897127	0,0336653	0,3681118	0,0317993	0,3479473	0,0300574
214	0,3843214	0,0330445	0,3681452	0,0316536	0,3482174	0,0299402
215	0	0	0,3681782	0,0315092	0,3479667	0,0297795
216	0	0	0,3692211	0,0314522	0,3481139	0,0296542
217	0,3846207	0,032613	0,3699935	0,0313727	0,3479857	0,0295066
218	0,3877894	0,0327309	0,3692757	0,0311682	0,3479951	0,0293721
219	0,3848156	0,0323315	0,3693026	0,0310282	0,3480044	0,0292387
220	0,271537	0,0227104	0,3710789	0,0310357	0,3480136	0,0291066
221	0	0	0,371097	0,0308968	0,3480228	0,0289757
222	0	0	0,3711149	0,0307591	0,3480318	0,0288459
223	0	0	0,3701316	0,03054	0,348174	0,0287283
224	0	0	0,3684615	0,0302665	0,3481823	0,0286007
225	0	0	0,3684916	0,0301344	0,3480585	0,0284634
226	0,3429185	0,027919	0,3701978	0,03014	0,3480672	0,0283382
227	0,3751589	0,0304094	0,3712021	0,0300886	0,3480758	0,0282141
228	0,3856506	0,0311227	0,3712191	0,029958	0,3480844	0,028091
229	0,3886631	0,0312288	0,368609	0,0296175	0,3480929	0,027969
230	0,3440107	0,0275209	0,3708235	0,0296659	0,3481013	0,0278481
231	0	0	0,3716168	0,0296006	0,3481097	0,0277282
232	0	0	0,3719187	0,029497	0,3481179	0,0276094
233	0	0	0,3719321	0,0293715	0,3481261	0,0274915
234	0	0	0,3654037	0,0287326	0,3481343	0,0273747
235	0	0	0	0	0,3482686	0,0272687
236	0,3455798	0,0269435	0,3688047	0,0287543	0,3481503	0,0271439
237	0,3458337	0,0268495	0,370426	0,0287588	0,3482834	0,0270397
238	0,3825494	0,0295753	0,3704456	0,0286395	0,3482907	0,0269267
239	0,3944068	0,0303644	0,3704652	0,0285212	0,3481739	0,026805
240	0,3977704	0,0304957	0,3704845	0,0284038	0,3481816	0,0266939

Continuação da Tabela A.

Dia	Santa Maria - RS		Uberlândia - MG		Sobral - CE	
	K = 1,03		K = 0,34		K = 0,26	
	B	γv	B	γv	B	γv
241	0,3945029	0,0301197	0,3714269	0,0283579	0,3481893	0,0265837
242	0,3770666	0,0286695	0,3714419	0,0282419	0,3483193	0,0264838
243	0	0	0,3714568	0,0281268	0,3482044	0,0263661
244	0,3773033	0,0284524	0,3705602	0,0279439	0,3482118	0,0262586
245	0,3477901	0,0261197	0,3705788	0,0278312	0,3482192	0,026152
246	0	0	0,3715008	0,0277871	0,3484522	0,0260631
247	0	0	0,3715152	0,0276756	0,3482339	0,0259413
248	0	0	0,3706334	0,0274986	0,3483605	0,0258461
249	0,3487213	0,025769	0,3715437	0,0274554	0,3482483	0,025734
250	0	0	0,3706692	0,0272813	0,3482554	0,0256316
251	0	0	0,3706868	0,0271739	0,3482624	0,02553
252	0,3494005	0,0255118	0,3707043	0,0270673	0,3482694	0,0254292
253	0,2889283	0,021013	0,3715993	0,0270254	0,3482763	0,0253292
254	0,3840243	0,0278191	0,3716129	0,02692	0,3482832	0,02523
255	0,3878024	0,0279826	0,3719402	0,026838	0,3484061	0,0251399
256	0,3939638	0,0283162	0,3722117	0,0267527	0,3482968	0,0250338
257	0,3952182	0,0282958	0,3722227	0,0266494	0,3483035	0,0249369
258	0,3507115	0,025012	0,3719764	0,0265285	0,3483102	0,0248407
259	0	0	0,3716794	0,026405	0,3483168	0,0247453
260	0	0	0,3722552	0,0263442	0,3483234	0,0246506
261	0,3791688	0,0267307	0,3722659	0,026244	0,3483299	0,0245566
262	0,388288	0,0272691	0,3722765	0,0261446	0,3483364	0,0244633
263	0,3517585	0,0246097	0,3720347	0,0260283	0,3483428	0,0243707
264	0	0	0,3713715	0,0258835	0,3483491	0,0242789
265	0,3795731	0,0263553	0,3709195	0,0257544	0,3483554	0,0241877
266	0,388554	0,0268774	0,3717683	0,0257163	0,3483617	0,0240972
267	0,3797706	0,0261715	0,3723282	0,0256586	0,3483679	0,0240074
268	0	0	0,3720909	0,0255465	0,3483741	0,0239182
269	0	0	0,3718049	0,025432	0,3483802	0,0238297
270	0	0	0,371817	0,0253386	0,3483863	0,0237419
271	0,3533537	0,0239915	0,3718289	0,0252459	0,3483923	0,0236547
272	0,3802519	0,0257229	0,3721343	0,0251738	0,348507	0,0235755
273	0,353738	0,0238417	0,3723877	0,0250987	0,348607	0,0234959
274	0,353928	0,0237674	0,3723974	0,0250077	0,3486121	0,0234104
275	0,3805323	0,0254611	0,372407	0,0249174	0,3485234	0,0233194
276	0,3857734	0,0257182	0,3724165	0,0248278	0,3485289	0,0232353
277	0,389246	0,0258561	0,3718987	0,0247037	0,3486273	0,0231579

Continuação da Tabela A.

Dia	Santa Maria - RS		Uberlândia - MG		Sobral - CE	
	K = 1,03		K = 0,34		K = 0,26	
	B	γv	B	γv	B	γv
278	0,3893062	0,025767	0,3711141	0,024563	0,3486323	0,0230749
279	0,3808967	0,0251201	0,3697853	0,0243873	0,3485449	0,0229865
280	0,3809862	0,0250362	0,3698044	0,0243014	0,3485501	0,0229047
281	0,3810751	0,024953	0,3670746	0,0240362	0,3485553	0,0228236
282	0,3811633	0,0248702	0,3711703	0,0242182	0,3485605	0,022743
283	0	0	0,3722473	0,0242027	0,3486567	0,0226688
284	0,3557549	0,0230489	0,3724902	0,0241332	0,3486615	0,0225893
285	0,3920662	0,0253123	0,3719871	0,024016	0,3486663	0,0225104
286	0,3921149	0,025227	0,3719978	0,0239327	0,348671	0,022432
287	0,3939086	0,0252541	0,3720084	0,02385	0,3486757	0,0223541
288	0,3939505	0,0251691	0,370698	0,0236835	0,3486803	0,0222768
289	0,3922589	0,0249743	0,3720294	0,0236863	0,3486849	0,0222
290	0,3964442	0,0251537	0,3725428	0,0236372	0,3486895	0,0221237
291	0,3940746	0,0249174	0,3727431	0,0235686	0,3486941	0,022048
292	0,3820124	0,024072	0,3727509	0,0234884	0,3486986	0,0219728
293	0,3901598	0,0245015	0,3727586	0,0234087	0,3487031	0,0218981
294	0,3902137	0,0244215	0,3713296	0,0232397	0,3487075	0,0218239
295	0,3870744	0,0241429	0,3720908	0,0232084	0,3486247	0,0217447
296	0,382336	0,0237668	0,3721007	0,0231306	0,3486294	0,0216716
297	0,3943153	0,024429	0,3726014	0,0230837	0,3487207	0,0216042
298	0,3967006	0,0244943	0,3727967	0,0230183	0,3487251	0,021532
299	0,3956935	0,0243504	0,3728041	0,0229418	0,3487294	0,0214603
300	0,3944321	0,0241918	0,3728115	0,0228658	0,3487336	0,021389
301	0,358583	0,02192	0,3718249	0,0227295	0,3487379	0,0213182
302	0,3587395	0,021857	0,3709017	0,022598	0,3487421	0,0212479
303	0,3588949	0,0217943	0,3714407	0,0225561	0,3487463	0,021178
304	0,3907324	0,0236496	0,3721782	0,0225266	0,3486658	0,0211035
305	0,3977454	0,0239951	0,3721875	0,0224533	0,3487546	0,0210396
306	0,3946587	0,0237311	0,3702567	0,0222638	0,3487587	0,0209711
307	0,3977991	0,023842	0,3722061	0,0223081	0,3487628	0,020903
308	0,3947323	0,0235814	0,3714995	0,0221935	0,3487669	0,0208354
309	0,3947687	0,0235073	0,3709965	0,0220917	0,3487709	0,0207682
310	0,396059	0,023508	0,3715225	0,0220517	0,348848	0,0207058
311	0,3970891	0,0234934	0,3715339	0,0219814	0,3487789	0,0206351
312	0,398607	0,0235076	0,3719386	0,0219348	0,3487828	0,0205692
313	0,397146	0,0233466	0,3719485	0,0218653	0,3487868	0,0205038

Continuação da Tabela A.

Dia	Santa Maria - RS		Uberlândia - MG		Sobral - CE	
	K = 1,03		K = 0,34		K = 0,26	
	B	γv	B	γv	B	γv
314	0,3949474	0,0231434	0,3722693	0,0218145	0,3487907	0,0204387
315	0,3980073	0,0232487	0,3722781	0,0217458	0,3487945	0,020374
316	0,3992652	0,0232484	0,3725384	0,0216921	0,3487984	0,0203098
317	0,3992864	0,0231762	0,3722955	0,0216096	0,3488022	0,0202459
318	0,3987464	0,0230721	0,3704399	0,0214343	0,348806	0,0201825
319	0,39355	0,0227001	0,3704545	0,0213679	0,3488098	0,0201194
320	0,3885511	0,0223417	0,3720163	0,0213909	0,3488136	0,0200568
321	0,3951883	0,0226525	0,3723297	0,0213423	0,3488173	0,0199945
322	0,3993906	0,0228223	0,3723381	0,0212765	0,348821	0,0199326
323	0,3994111	0,0227528	0,3723464	0,0212111	0,3488247	0,0198711
324	0,3974464	0,022571	0,3711855	0,0210797	0,3488283	0,01981
325	0,3982531	0,0225473	0,3716857	0,0210431	0,348832	0,0197493
326	0,3989243	0,022516	0,3716961	0,0209792	0,3488356	0,0196889
327	0,399959	0,0225053	0,3717063	0,0209156	0,3488392	0,0196289
328	0,4007336	0,0224802	0,3717166	0,0208524	0,3488428	0,0195692
329	0,3999957	0,0223706	0,3728373	0,0208517	0,3488463	0,0195099
330	0,4004149	0,0223262	0,3724035	0,0207643	0,3488498	0,019451
331	0,3919765	0,0217896	0,3724114	0,020702	0,3488534	0,0193925
332	0,3967173	0,0219867	0,3724193	0,0206401	0,3488568	0,0193342
333	0,3976774	0,0219738	0,3724272	0,0205786	0,3488603	0,0192764
334	0,3984617	0,0219512	0,3726727	0,0205305	0,3488638	0,0192188
335	0,4001032	0,0219758	0,3724427	0,0204566	0,3488672	0,0191617
336	0,4001207	0,0219114	0,371796	0,0203603	0,3488706	0,0191048
337	0,3968549	0,021668	0,372169	0,0203202	0,348874	0,0190483
338	0,3985509	0,0216963	0,3727005	0,020289	0,3488773	0,0189921
339	0,3978246	0,0215928	0,3724733	0,0202168	0,3488807	0,0189363
340	0,395792	0,0214193	0,3718343	0,0201228	0,348884	0,0188808
341	0,3969621	0,0214197	0,3722027	0,0200837	0,3488873	0,0188256
342	0,3978963	0,0214073	0,3724958	0,0200407	0,3488906	0,0187707
343	0,3958812	0,0212368	0,3718625	0,0199483	0,3488938	0,0187162
344	0,3979434	0,0212853	0,3725105	0,019925	0,3488971	0,0186619
345	0,3979667	0,0212249	0,3725178	0,0198676	0,3489003	0,018608
346	0,3979899	0,0211648	0,3725251	0,0198106	0,3489035	0,0185544
347	0,398744	0,0211438	0,3727609	0,019766	0,3489067	0,0185011
348	0,3980359	0,0210456	0,3725395	0,0196975	0,3489099	0,0184481
349	0,3980587	0,0209865	0,3725466	0,0196414	0,348913	0,0183954
350	0,3960835	0,0208227	0,3719262	0,0195527	0,3489162	0,018343

Continuação da Tabela A.

Dia	Santa Maria - RS		Uberlândia - MG		Sobral - CE	
	K = 1,03		K = 0,34		K = 0,26	
	B	γv	B	γv	B	γv
351	0,3946841	0,02069	0,3714842	0,0194738	0,3488462	0,0182871
352	0,3961398	0,0207073	0,371944	0,0194425	0,3489224	0,0182391
353	0,3972691	0,0207075	0,3722991	0,019406	0,3487695	0,0181795
354	0,3961954	0,0205932	0,3719615	0,0193336	0,348773	0,0181283
355	0,3981929	0,0206387	0,3725886	0,0193116	0,3487765	0,0180774
356	0,3982148	0,0205819	0,3725955	0,0192577	0,3488625	0,0180311
357	0,3982366	0,0205254	0,3726023	0,0192042	0,3488657	0,0179808
358	0,3982583	0,0204691	0,3726091	0,0191509	0,3489406	0,0179344
359	0,3995744	0,0204796	0,3730199	0,0191186	0,3489436	0,0178846
360	0,3995923	0,0204236	0,3730255	0,0190657	0,3488753	0,0178314
361	0,3983226	0,0203023	0,3726292	0,0189927	0,3489495	0,0177858
362	0,3990445	0,0202829	0,3728547	0,0189517	0,3489524	0,0177368
363	0,3996452	0,0202575	0,3730419	0,018909	0,3489553	0,0176881
364	0,3983858	0,0201382	0,372649	0,0188372	0,3488071	0,017632
365	0,397556	0,0200412	0,3723891	0,0187725	0,3488908	0,0175879
366	0,3984274	0,0200302	0,372662	0,0187349	0,3489639	0,0175435