



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO
UNIDADE ACADÊMICA DE GARANHUNS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS



ISABELLE CRISTINE PROHMANN TSCHOEKE

**MODELAGEM CINÉTICA E SIMULAÇÃO PARA PRODUÇÃO DE
BIOGÁS DO RESÍDUO DO MALTE**

GARANHUNS-PE
2020

ISABELLE CRISTINE PROHMANN TSCHOEKE

MODELAGEM CINÉTICA E SIMULAÇÃO PARA PRODUÇÃO DE
BIOGÁS DO RESÍDUO DO MALTE

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Ciências Ambientais da Universidade Federal Rural de Pernambuco para obtenção do título de mestre (a) em Ciências Ambientais.

Área de Concentração: Meio Ambiente e Tecnologias

Linha de Pesquisa: Modelagem Socioambiental e Tecnologias

Orientador (a): Prof.^a Dra. Gerla Castello Branco Chinelate

Coorientador: Prof. Dr. Thibério Pinho Costa Souza

GARANHUNS-PE

2020

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema Integrado de Bibliotecas da UFRPE
Biblioteca Ariano Suassuna, Garanhuns - PE, Brasil

T879m Tschoeke, Isabelle Cristine Prohmann
Modelagem cinética e simulação para produção de biogás
do resíduo do malte / Isabelle Cristine Prohmann Tschoeke.
- 2020.
101 f.; il.

Orientadora: Gerla Castello Branco Chinelate.
Coorientador: Thibério Pinho Costa Souza.
Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais –
Universidade Federal Rural de Pernambuco, Programa de
Pós-Graduação em Ciências Ambientais, Garanhuns, BR -
PE, 2020.

Inclui referências e anexo(s).

1. Ciências ambientais 2. Biogás 3. Cerveja – Indústria
4. Bebidas fermentadas I. Chinelate, Gerla Castello Branco,
orient.II. Souza, Thibério Pinho Costa, coorient. III. Título

CDD 363.7003

ISABELLE CRISTINE PROHMANN TSCHOEKE

MODELAGEM CINÉTICA E SIMULAÇÃO PARA PRODUÇÃO DE
BIOGÁS DO RESÍDUO DO MALTE

Data de Aprovação:

BANCA EXAMINADORA

Prof.(a) Dr.(a) Gerla Castello Branco Chinelate (Orientador(a))
UFAPE

Prof. Dr. Thibério Pinho Costa Souza (Coorientador)
UFAPE

Prof. Dr. Marteson Cristiano dos Santos Camelo
UFAPE

Prof. Dr. Josivan Pedro da Silva
Uninassau

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à Deus, por ter me dado forças, sabedoria e ter guiado meu caminho durante essa etapa.

Aos meus pais, por terem acreditado em mim e sempre me incentivado a estudar e ir em busca dos meus sonhos. Por me apoiarem e por sempre estarem do meu lado.

Aos meus irmãos por todo carinho, apoio e troca de conhecimentos.

Aos meus avós, tios, tias, primos e primas que mesmo distantes sempre torceram por mim.

Ao meu namorado, pela dedicação, por sempre estar ao meu lado, me apoiar, me fazer sentir uma pessoa especial e me ajudar em tudo.

Aos meus orientadores pela paciência, atenção e carinho durante a elaboração do trabalho.

Aos meus professores, por todo ensinamento passado.

Ao meu chefe por todo apoio, empatia e flexibilidade, principalmente no período de disciplinas.

A minha turma da faculdade, por toda troca de conhecimento e momentos de descontração.

A todos que direta e indiretamente me ajudaram e torceram por mim.

RESUMO

As cervejas artesanais estão ganhando a cada dia mais espaço no mercado. O seu processo produtivo é dividido em várias etapas. A primeira fase é o processo de brassagem. Nessa etapa ocorre a maior geração de resíduos na forma de bagaço de malte. Uma das formas de aproveitamento desse resíduo pode ser na utilização do mesmo para a produção de biogás. Diante desse contexto, o objetivo desse trabalho foi o de realizar um estudo utilizando o resíduo de malte oriundo do processo de produção de cervejas artesanais a fim de se produzir biogás, além de propor um modelo cinético para o processo e realizar uma simulação levando em consideração um planejamento fatorial. Para o experimento foi utilizado um biodigestor de bancada de 2L construído em vidro, dotado de dreno e de três *inserts* laterais para coleta de amostras e instrumentado com sensores de pressão, temperatura e de concentração de metano. Como inóculo, foi utilizado um lodo granular anaeróbio e como substrato o resíduo de malte. Cada monitoramento (*in-line*) ocorreu entre 7 e 15 dias com os dados sendo coletados automaticamente pelo software. O ajuste do modelo cinético aos resultados foi feito com o auxílio do software MathLab®. Os dados foram ajustados a um modelo de pseudo primeira ordem para a formação do gás metano utilizando como base a equação de Arrhenius. Já para as simulações do processo de produção de biogás, foi utilizado o software ASPEN PLUS®. Foi adotado no simulador (no bloco de reação) um reator do tipo batelada e que fez uso de uma reação química de formação do metano baseada no modelo cinético estudado experimentalmente. Uma análise estatística através do programa Statistica® foi realizada para os resultados onde foi avaliado a significância das variáveis. As análises laboratoriais dos resultados preliminares mostraram que o equipamento é eficiente e que o resíduo apresenta um bom potencial energético para geração de biogás. Os valores dos parâmetros cinéticos encontrados para produção de metano (reação de formação de CH₄) foram de $3,25 \times 10^{-5}$ [1/min] para a constante cinética e de $8,2484 \times 10^3$ [J/mol] para Energia de ativação. O estudo mostrou que o biogás obtido poderá ser utilizado para a geração de energia elétrica.

Palavras Chave: Biogás; Cerveja artesanal; Simulação; Modelos cinéticos.

ABSTRACT

Craft beers are gaining more space in the market every day. Its production process is divided into several stages. The first stage is the mashing process. In this stage, the greatest generation of residues occurs in the form of malt bagasse. One of the ways to use this waste can be to use it for the production of biogas. Given this context, the objective of this work was to conduct a study using the malt residue from the craft beer production process in order to produce biogas, in addition to proposing a kinetic model for the process and performing a simulation taking into account factorial planning. For the experiment, a 2L bench-top biodigester built in glass, equipped with a drain and three lateral inserts for collecting samples and instrumented with pressure, temperature and methane concentration sensors. As an inoculum, an anaerobic granular sludge was used and the malt residue was used as a substrate. Each monitoring (in-line) occurred between 7 and 15 days with the data being collected automatically by the software. The adjustment of the kinetic model to the results was done with the aid of the MathLab® software. The data were fitted to a pseudo first order model for the formation of methane gas using the Arrhenius equation as a basis. For the simulations of the biogas production process, the ASPEN PLUS® software was used. A batch type reactor was used in the simulator (in the reaction block), which made use of a chemical reaction of methane formation based on the kinetic model studied experimentally. A statistical analysis using the Statistica® program was performed for the results where the significance of the variables was evaluated. Laboratory analyzes of the preliminary results showed that the equipment is efficient and that the waste has a good energy potential for generating biogas. The values of the kinetic parameters found for methane production (CH_4 formation reaction) were 3.25×10^{-5} [1/min] for the kinetic constant and 8.2484×10^3 [J / mol] for Activation energy. The study showed that the biogas obtained could be used to generate electricity.

Keywords: Biogas; Craft beer; Simulation; Kinetic models.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Total de cervejarias artesanais por ano no Brasil.....	5
Figura 2: Esquema geral de obtenção do bagaço de malte.....	8
Figura 3: Biodigestor (a), sensores de dados (b) e software de controle (c).	22
Figura 4: Esquema de montagem do biodigestor.	23
Figura 5: Produção de gás ao longo do tempo para a uma temperatura de 20°C.....	31
Figura 6: Produção de gás ao longo do tempo para a uma temperatura de 25°C.....	31
Figura 7: Produção de gás ao longo do tempo para a uma temperatura de 30°C.....	31
Figura 8: Fases de geração de biogás em aterros de resíduos sólidos.	32
Figura 9: Resultado do ajuste cinético aos dados obtidos na produção de gás metano.....	33
Figura 10: <i>Flowsheet</i> da simulação do processo de produção de biogás no Aspen Plus®.	35
Figura 11: Perfil da conversão de substrato em função do tempo para várias temperaturas (20°C, 25°C e 30°C). Relação de substrato de 45g/2L (a), 50g/2L (b) e 55g/2L (c).	36
Figura 12: Gráfico de superfície para a Conversão (variável dependente) em função da Temperatura e Tempo de processo (variáveis independentes).	39
Figura 13: Gráfico de superfície para a Conversão (variável dependente) em função da Relação de biomassa e Tempo de processo (variáveis independentes).	39
Figura 14: Gráfico de superfície para a Conversão (variável dependente) em função da Relação de biomassa e Temperatura (variáveis independentes).	40
Figura 15: Gráfico de Pareto para as variáveis de estudo.....	41
Figura 16: Simulação nas condições de operação 125 min, 30°C, 45g/2L.	42
Figura 17: Perfil da fração de vapor em função da pressão para a mistura de gás produzida pelo reator.	45
Figura 18: Perfil da fração de vapor em função da temperatura para a mistura de gás produzida pelo reator.	45
Figura 19: Perfil da conversão de substrato em função do tempo para várias temperaturas (20°C, 25°C e 30°C). Relação de substrato de 45g/2L (a), 50g/2L (b) e 55g/2L (c).	48
Figura 20: Gráfico de superfície para a Conversão (variável dependente) em função da Temperatura e Tempo de processo (variáveis independentes).	50
Figura 21: Gráfico de superfície para a Conversão (variável dependente) em função da Relação de substrato e Tempo de processo (variáveis independentes).	50
Figura 22: Gráfico de superfície para a Conversão (variável dependente) em função da	

Relação de substrato e Temperatura do processo (variáveis independentes).....	51
Figura 23: Gráfico de Pareto para as variáveis de estudo.....	51

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição média do Biogás.	13
Tabela 2 - Comparação entre Biogás e outros combustíveis.	14
Tabela 3 - Usinas de biogás em operação no Brasil.	15
Tabela 4 – Exemplos de modelos matemáticos de processos.	18
Tabela 5 - Caracterização físico-química dos substratos e inóculos.	20
Tabela 6 - Caracterização físico-química do substrato.	21
Tabela 7 - Planejamento fatorial para a produção de biogás.	26
Tabela 8 - Resultados da caracterização do inóculo e substrato (STF e STV).	28
Tabela 9 - Resultados da caracterização do substrato e inóculo.	28
Tabela 10 - Caracterização do substrato antes e depois da biodigestão.	29
Tabela 11 – Comparação da energia de ativação (E_a) e constante cinética (K_0) com outros autores.	34
Tabela 12: Resultados do planejamento experimental (continua).	37
Tabela 13: Resultados do planejamento experimental (conclusão).	38
Tabela 14: Resultados para a simulação nas condições de operação 125 min, 30°C, 45g/2L (continua).	43
Tabela 15: Resultados para a simulação nas condições de operação 125 min, 30°C, 45g/2L (conclusão).	44
Tabela 16: Planejamento fatorial para otimização do processo.	47
Tabela 17: Resultados do planejamento experimental otimizado.	49
Tabela 18: Comparação dos resultados com a literatura.	52

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
2	OBJETIVOS	3
	2.1 Geral	3
	2.2 Específicos	3
3	HIPÓTESES	4
4	REVISÃO DA LITERATURA	5
	4.1 Mercado da cerveja artesanal	5
	4.2 Resíduos do processo cervejeiro	6
	4.2.1 Características e aplicações do bagaço de malte	7
	4.3 Biodigestão Anaeróbia	9
	4.3.1 Parâmetros que influenciam no processo de biodigestão anaeróbia	10
	4.4 Biogás	13
	4.5 Modelagem cinética e simulação	15
	4.6 Equações diferenciais	16
	4.7 Pacotes Termodinâmicos	17
	4.8 Modelos matemáticos	18
	4.9 Modelos de Atividade	19
5	MATERIAIS E MÉTODOS	20
	5.1 Aquisição e armazenamento do resíduo de malte e inóculo	20
	5.2 Caracterização do resíduo de malte e inóculo	20
	5.3 Montagem do experimento para cinética	21
	5.4 Modelagem cinética	23
	5.5 Simulação do processo	25
	5.6 Planejamento fatorial	26
	5.7 Análise estatística	27

6	RESULTADOS E DISCUSSÃO	28
6.1	Caracterização do resíduo de malte e inóculo.....	28
6.2	Produção de biogás	31
6.3	Modelagem cinética da produção de biogás	32
6.4	Simulação do processo.....	35
6.4.1	Simulação a partir do planejamento baseado no experimento.....	35
6.4.2	Simulação para otimização do processo.....	47
7	CONCLUSÃO	53
8	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	54
9	ANEXOS	62

1 INTRODUÇÃO

Dentro do segmento de bebidas alcoólicas, a cerveja é a mais consumida no mundo. Ela é definida como a bebida obtida pela fermentação alcoólica do mosto cervejeiro, preparado com malte de cevada, água e lúpulo pela ação de levedura (BRASIL, 2009). A sua produção possui uma importante posição estratégica na indústria alimentícia mundial, uma vez que totalizou 200 bilhões de litros produzidos no ano de 2015, com quase 92% sendo produzidos em quarenta principais países produtores (BOUCKLEY, 2015).

Nas últimas décadas o mercado brasileiro de cerveja aumentou gradativamente. No ano de 2017 o Brasil produziu 13,714 milhões de litros dessa bebida e segundo dados do último levantamento o Brasil ocupa o terceiro lugar no ranking de produção mundial, superado apenas pela china e pelos Estados Unidos (IBGE, 2018). No ano de 2018, as companhias produtoras de cerveja foram responsáveis por 1,3% do PIB nacional, com uma previsão de expansão para 2,53% em 2019, o que ressalta a grande importância da indústria cervejeira para a economia brasileira (BCB-FOCUS, 2018).

Em relação ao consumo per capita, o Brasil ainda ocupa a 17ª posição mundial, com consumo de 82 litros por pessoa ao ano, porém o mercado brasileiro possui um grande potencial de crescimento. A tendência do mercado cervejeiro brasileiro é a segmentação, pois os consumidores estão cada vez mais interessados em experimentar produtos diferenciados (ABRABE, 2017). Devido a isso as cervejas artesanais, estão ganhando cada vez mais espaço, conquistando e agradando públicos mais requintados e apreciadores da arte de fabricar cerveja. Segundo dados da Associação Brasileira de Cerveja Artesanal (2018) as microcervejarias nacionais possuem aproximadamente 3% da produção dessa bebida, que se concentram principalmente nas regiões sul e sudeste do Brasil (ABRECERVA, 2018). As cervejas artesanais são caracterizadas pela qualidade superior, atrelada a características sensoriais diferenciadas, e o aumento do seu consumo se deu pelo crescimento da demanda de brasileiros, que passam a consumir produtos com maior valor agregado (CERVBRASIL, 2017).

Devido à grande procura por essa bebida ocorre a produção em grandes escalas para atender essa demanda, o que leva à geração de volumosas quantidades de resíduos sólidos (biomassa). O descarte incorreto de resíduos sólidos, principalmente matéria orgânica, causa problemas sanitários e ambientais, como desenvolvimento de parasitas e vetores, contaminação da água, alterando a capacidade de autodepuração e eutrofização da mesma e emissão de gases e odores.

Durante a produção de cerveja o resíduo gerado em maior escala é o bagaço de malte. Em geral, para cada 100 kg de grãos processados, são gerados 125 a 130 kg de bagaço úmido, com cerca de 80 a 85% de umidade, o que corresponde a cerca de 14 e 20 kg de bagaço para cada hectolitro de cerveja produzido. Normalmente esse resíduo é destinado para alimentação animal, queima ou disposição em aterros (PORTAL BRASIL, 2017). Sabendo da possibilidade de melhores destinações (produção etanol 2G, fermentação anaeróbia para produção de biogás, produção de compostos de valor agregado, etc.) é de fundamental importância o desenvolvimento de técnicas viáveis para o melhor aproveitamento desse resíduo.

Uma das formas de aplicação do resíduo do processo cervejeiro é a produção de biogás. O biogás produzido através do bagaço oriundo da produção da cerveja, pode ser empregado para a geração de energia na própria indústria, sendo possível obter economia nos custos de processo, além de ser uma alternativa para as práticas ambientais de produção mais limpa (P+L). Essa prática se torna interessante uma vez que os combustíveis fósseis (carvão, petróleo e seus derivados e gás natural) que representam 82% da fonte primária de energia, (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2017) apresentam-se como um panorama crítico quando relaciona tais fontes energéticas aos problemas ambientais e sociopolíticos relacionados com as reservas existentes e na longevidade desses recursos. Diante dessas preocupações, os combustíveis renováveis, tais como a biomassa (como exemplo bagaço do malte), têm tido destaque como forma de fuga da dependência dos combustíveis fósseis.

Um dos processos para a produção de biogás é a biodigestão anaeróbia. Essa tecnologia tem grande potencialidade de aplicação para efluentes orgânicos concentrados ou diluídos, principalmente pela baixa produção de lodo (5 a 10 vezes inferior à que ocorre nos processos aeróbios) (PASSOS, 2018). Os biodigestores anaeróbios se destacam como equipamentos de baixo custo econômico e energético, baixa produção de sólidos, tolerância a elevadas cargas orgânicas e possibilidade de operação com elevados tempos de retenção de sólidos. Por ser solúvel e de fácil fermentação o bagaço de malte pode ser bem aplicado aos biodigestores, pois se degradam em ácidos orgânicos voláteis (AGVs) de forma muito rápida, favorecendo o tratamento biológico, em especial os anaeróbios (KHAN et al., 2017).

Atualmente existem várias ferramentas utilizadas para estudar diversos processos, sendo a modelagem cinética bem como a simulação as que apresentam grande contribuição para a previsão dos resultados. Através do uso desses instrumentos é possível entender os fenômenos que ocorrem durante o processo e usá-los para scale-up e otimização das condições de operação.

2 OBJETIVOS

2.1 Geral

Realizar estudos com o resíduo de malte oriundo do processo de produção de cervejas artesanais a fim de se produzir biogás, além de realizar uma simulação e propor um modelo cinético para o processo.

2.2 Específicos

- Realizar uma caracterização do resíduo de malte para ser aplicado na biodigestão;
- Montar um planejamento fatorial de acordo com as variáveis que serão estudadas;
- Realizar experimento de produção de biogás em um biodigestor de bancada;
- Obter parâmetros cinéticos da produção de biogás para ser inserido no modelo que será proposto;
- Realizar simulação do processo utilizando o ASPEN PLUS®.

3 HIPÓTESES

- O processo de produção de biogás pode ser representado por um sistema de primeira ordem e ajustado ao modelo de Arrhenius, os valores de E_a e K_0 podem ser usados como parâmetros cinéticos para as simulações no ASPEN PLUS[®].
- O processo de produção de gás metano no biodigestor será influenciado apenas pelas variáveis (pH, temperatura e quantidade de substrato), que são as que mais afetam a produção de gás no biodigestor;
- O modelo cinético poderá ser usado no ASPEN PLUS[®] com boa representatividade dos resultados experimentais;
- O biodigestor de bancada não será afetado por variações externas ao processo e que alterem o resultado das variáveis resposta;
- As simulações no ASPEN PLUS[®] ocorrerão no estado estacionário, embora que o modelo cinético que será estudado apresente a possibilidade de ser usado no estado dinâmico.

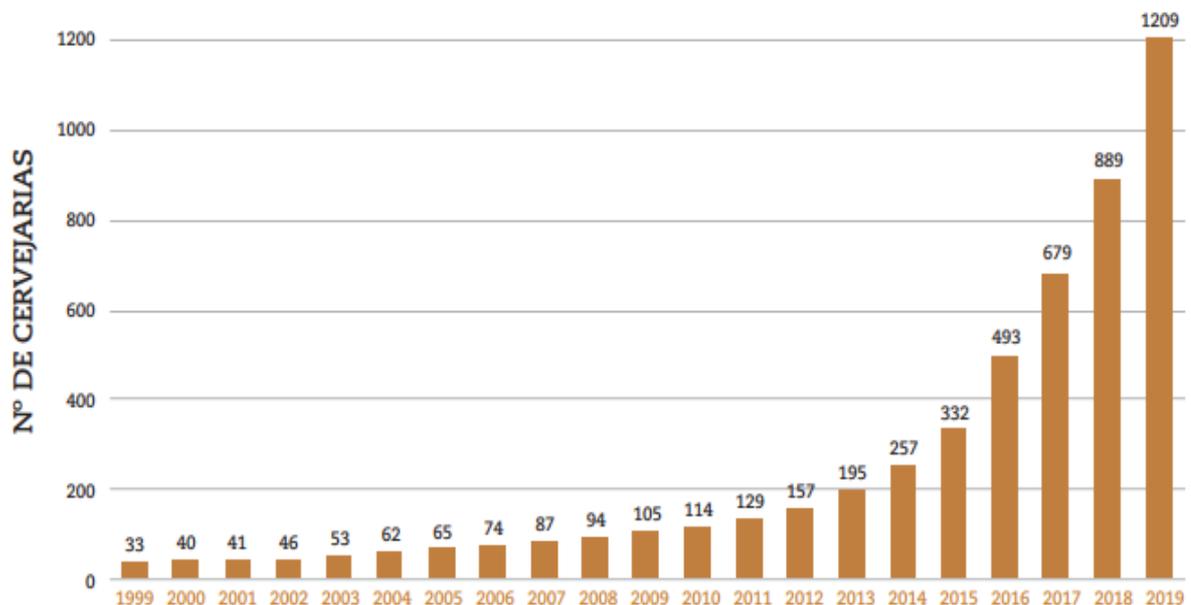
4 REVISÃO DA LITERATURA

4.1 Mercado da cerveja artesanal

As cervejas artesanais são caracterizadas pelo aroma, sabores marcantes e qualidade diferenciados. O reconhecimento da qualidade dessa bebida aumenta a cada dia. É um mercado que está em franca expansão. O setor ainda necessita de dados estatísticos, como o total faturado e produzido, mas calcula-se que entre 1 e 1,5% do mercado cervejeiro nacional esteja concentrado nas artesanais. Os dados do último levantamento feito pelo Ministério da Agricultura, Abastecimento e Pecuário (MAPA), comprovam a tendência de expansão desse setor com a multiplicação de rótulos (ABRACERVA, 2018).

De acordo com o Ministério da Agricultura, Abastecimento e Pecuário (MAPA), o número de cervejarias artesanais registradas cresceu 36% em 2019, totalizando 1.209 estabelecimentos e 27.329 produtos. A Figura 1 evidencia a tendência de crescimento exponencial do número de cervejarias no Brasil, que se iniciou em meados de 2010 e continua com seu ritmo de avanço (MAPA, 2019).

Figura 1: Total de cervejarias artesanais por ano no Brasil.



Fonte: MAPA (2019).

Esse aumento mostra que o mercado está amadurecendo e a demanda do consumidor aumentando. O consumidor, antes acostumado a beber apenas cervejas de rótulos comerciais,

está descobrindo que os sabores da bebida vão além disso. A busca por produtos diferenciados mostra que a exigência do cliente reflete na qualidade dos fabricantes. Isso faz com que se queira investir mais nesse mercado, e o que antes era “*hobby*” para muitos está se tornando um negócio rentável. O que torna cada vez mais interessante, realizar estudos sobre o processo dessa bebida.

A maior parte das produtoras da bebida estão concentradas no Sul e no Sudeste (80%) do país. Porém, todas as regiões do Brasil estão investindo nesse tipo de produção. Entre os estados, o maior número de cervejarias está em São Paulo (241), seguido pelo Rio Grande do Sul (236) e Minas Gerais (163) (MAPA,2019).

Em relação à economia, de acordo com os últimos dados levantados, o setor cervejeiro representou no ano de 2018 1,3% do PIB do país, e as cervejas artesanais formam responsáveis por 3,6 milhões do faturamento. É um dos setores mais empregadores do Brasil, com mais de 2,7 milhões de pessoas empregadas ao longo da cadeia produtiva, as cervejarias se tornam o 12º maior gerador de empregos de acordo com o BNDES (CERVBRASIL, 2019).

4.2 Resíduos do processo cervejeiro

Os resíduos agroindustriais podem ser encontrados nos estados sólidos, semissólidos e líquido, resultantes de atividade de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição, bem como os lodos provenientes dos sistemas de tratamento de água. Nesse grupo, também são incluídos, determinados líquidos cujas características tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgoto ou corpos de água, ou exijam para soluções técnica e economicamente inviável em face a melhor tecnologia disponível (ABNT, 2004).

As cervejarias produzem grandes quantidades de resíduos durante o seu processamento. Os resíduos sólidos são gerados principalmente nas etapas de filtragem, envase e tratamento de água e efluentes líquidos, sendo eles (SANTOS, 2005):

- Bagaço de malte: resíduo gerado na filtração do mosto após a caldeira de mostura, antes da fervura;
- Trub grosso: resíduo tirado do whirlpool (tanque circular no qual as proteínas e outras partículas do mosto são separadas por efeito centrífugo) na clarificação após o cozimento, composto de gordura vegetal e proteínas coaguladas;
- Trub fino: resíduo obtido na segunda filtração, composto de gordura vegetal, que sai misturado à terra diatomácea e parcelas de levedo;

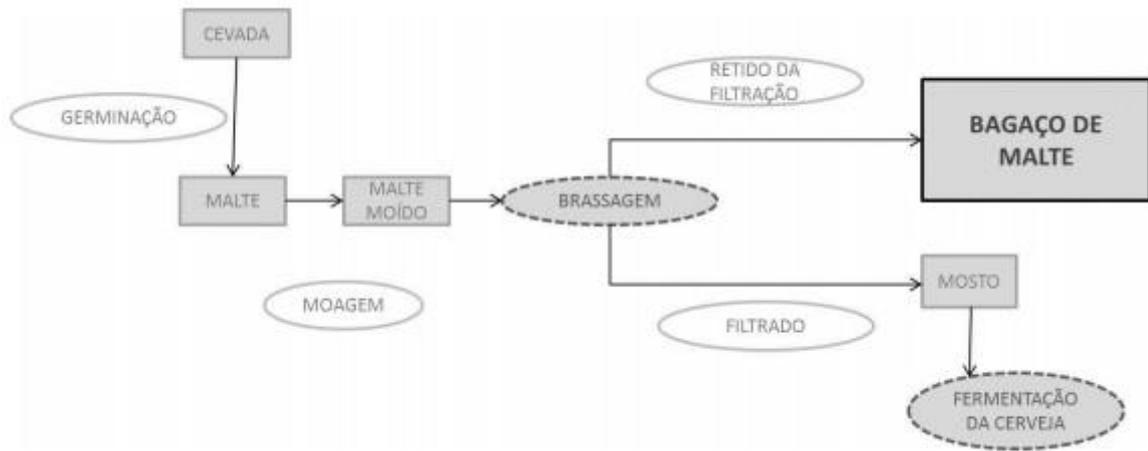
- Excesso de levedura: durante o processo de fermentação as leveduras se reproduzem, obtendo-se ao final do processo mais levedo do que se utilizará na próxima batelada;
- Pasta celulósica: composta dos rótulos removida na lavagem das garrafas retornáveis (resíduo de envase);
- Garrafas quebradas, latas e tampas metálicas amassadas, plástico e papelão originários de embalagens (resíduo de envase);
- Terra Diatomácea: usada na clarificação;
- Lodo: tanto na Estação de Tratamento de Águas (ETA) como na Estação de Tratamento de Efluentes (ETE), geram-se quantidades consideráveis de lodo, que deve ser corretamente gerenciado como resíduo.

Os resíduos gerados no processo de produção de cerveja apresentam qualidades com elevado potencial para serem reaproveitados. Com isto, é de grande importância a avaliação das vantagens e desvantagens do uso destes resíduos, observando custo e benefício dos subprodutos que podem ser obtidos a partir desses elementos. Dentre esses resíduos o que é gerado em maior volume, sendo considerado o principal resíduo da indústria cervejeira, é o bagaço de malte (proveniente do malte da cevada), pois corresponde cerca de 85% do total de resíduos obtidos.

4.2.1 Características e aplicações do bagaço de malte

O processo de produção da cerveja pode ser dividido em três etapas: produção do mosto (brassagem), fermentação e processo de acabamento. O bagaço de malte é gerado após a etapa de brassagem, depois de serem extraídos todos os compostos solúveis que irão contribuir para formação e clarificação do mosto. Nessa etapa o bagaço exerce papel de torta filtrante, colaborando para a melhor filtração do mosto (Figura 2). Ele constitui o resíduo sólido de maior quantidade gerado durante o processo cervejeiro (cerca de 85% do total), sendo produzido em grandes volumes ao longo de todo ano (LIMA, 2010). A constituição do bagaço de malte varia quanto à sua composição, dependendo da mistura de cereais, do pré-tratamento dos grãos, das condições do processo de malteação, do tipo de malte e das variedades de plantas selecionadas. Sendo predominantemente composto por fibra (70% massa seca) e proteína (15 a 25% massa seca), apresentando também em sua composição lipídeos, minerais, vitaminas, aminoácidos e compostos fenólicos (ONOFRE *et al.*, 2017).

Figura 2: Esquema geral de obtenção do bagaço de malte



Fonte: Onofre, 2017.

No Brasil há uma produção anual de 2,6 milhões de toneladas de bagaço de malte. Pela sua composição rica e grau alimentício a destinação usual é a venda para preparação de ração animal. Este destino, porém, exige gastos com distribuição e transporte, além de ser geralmente doado ou vendido a baixo preço, representando um processo custoso para que as empresas destinem corretamente o resíduo. A estocagem do material é inviável devido ao grande volume, além do bagaço de malte exigir a secagem para que seja protegido de ação microbiana. Este uso, também tem apresentado problemas para os produtores rurais, relacionados à dificuldade de armazenamento correto e ao alto teor de umidade. A contaminação deste material por microrganismos, acentuada pelos fatores citados, tem ocasionado enfermidades em bovinos, como intoxicação por fungos e micotoxinas, acidose ruminal e botulismo (BRUST *et al.*, 2015). Além da última aplicação citada, existem diversas outras, tais como: alimentação e nutrição animal e humana; produção de energia por queima direta ou por produção de biogás via fermentação anaeróbia; produção de carvão vegetal; material adsorvente em tratamentos químicos; cultivo de micro-organismos e obtenção de bioprodutos por fermentação; suporte para imobilização celular; dentre outros (COSTA, 2016).

Devido o bagaço de malte apresentar uma rica composição em compostos orgânicos e com significativo poder nutricional, este deve ser tratado antes de descartados ao meio ambiente, de forma a evitar alterações ao equilíbrio ecológico local. O descarte inadequado desses resíduos pode ocasionar danos ao meio ambiente e sua eliminação direta ao solo ou em aterro sanitário tem se mostrado ineficiente visto que os mesmos não são suficientes para drenar a grande quantidade produzida por ano. Dessa forma, há grande incentivo para redução da geração de resíduos ou seu aproveitamento em outros processos. Nesse aspecto, visando à obtenção de

produtos de maior valor agregado e a destinação dos resíduos gerados para fins mais nobres, os bioprocessos industriais apresentam-se como potenciais meios para destinação destes rejeitos (CHERNEY, 2017).

Nos últimos anos houve um aumento da pressão política e social no que diz respeito à redução da carga poluentes provenientes de atividades industriais. Esta preocupação dos órgãos ambientais não somente do Brasil, mas de países do mundo todo, tem motivado e incentivado estudos para desenvolver novas técnicas de tratamento e reaproveitamento de resíduos gerados na indústria como um todo. O reaproveitamento do malte para a produção de biogás, é uma boa opção. A transformação energética de um resíduo permite que o mesmo possa ser reinserido no processo produtivo através da sua conversão e aproveitamento na forma de energia térmica ou elétrica. O biogás como fonte de energia é particularmente interessante devido às suas possibilidades de aplicações, visto que a energia química contida neste combustível pode ser utilizada para gerar energia térmica, elétrica ou veicular. Além de ser ambientalmente sustentável, é um processo que reduz os impactos financeiros com o processo (ARANTES, 2017).

O biogás gerado pela indústria cervejeira possui uma concentração de metano em torno de 60% e apresenta um valor mais conservatório de poder calorífico, o qual é inferior, na ordem de 20MJ/Nm³. O uso do biogás traz inúmeras vantagens, principalmente, no que se trata dos benefícios socioambientais, uma vez que a sua utilização evita o lançamento de metano na atmosfera, e, por ser um gás de origem renovável pode trazer retorno financeiro com a sua utilização e aproveitamento (BLEY JR., 2015).

4.3 Biodigestão Anaeróbia

O processo de biodigestão anaeróbia é um processo fermentativo que tem a finalidade de remover matéria orgânica, formar biogás e produzir biofertilizantes. Ele ocorre na ausência de oxigênio molecular livre no qual diversas espécies de microrganismos interagem para converter compostos orgânicos em metano, compostos inorgânicos como CO₂, N₂, NH₃, H₂S e traços de outros gases e ácidos orgânicos de baixo peso molecular. (ARANTES, 2017). O que caracteriza cada etapa é o grupo de microrganismos que participa do processo de decomposição existente em cada fase, o produto formado por um grupo de microrganismos será utilizado como substrato na próxima etapa e qualquer divergência existente entre elas pode afetar o resultado final do processo da decomposição (ZHAOXIA *et al.*, 2012). Este processo ocorre em basicamente quatro etapas: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese, sendo essa

última a responsável pela produção do biogás.

No processo de hidrólise, as bactérias hidrolíticas convertem a matéria orgânica em moléculas simples pela ação de enzimas extracelulares como as proteases, lipases e amilases. Neste processo os carboidratos complexos são convertidos em poli e monossacarídeos, as proteínas em aminoácidos e peptídeos e as gorduras em ácidos graxos, como pode ser observado na Equação 1 (ZHANG, 2016):



Na acidogênese, o material dissolvido (produtos gerados na primeira fase) é absorvido nas células das bactérias fermentativas e convertidos a ácidos graxos voláteis, alcoóis e compostos minerais (como CO_2 , H_2 , NH_3 e H_2S). Esta fase não é necessariamente realizada por bactérias anaeróbias, sendo vantajoso para o processo, pois assim garante-se um ambiente isento de oxigênio, essencial para as bactérias metanogênicas (KOTHARI, 2016).

Na acetogênese, os produtos obtidos são convertidos em ácido acético (CH_3COOH), dióxido de carbono e hidrogênio (reagentes que produzirão o gás metano) através da ação das bactérias acetogênicas. Estas bactérias são facultativas, podendo atuar tanto em meio aeróbio quanto anaeróbio, sendo assim, o oxigênio que não foi consumido inicialmente na caixa de carga é aproveitado para efetuar estas transformações (MORAIS, 2015).

Finalmente, na metanogênese, há a formação do gás metano. As bactérias metanogênicas atuam no hidrogênio, gás carbônico e ácido acético (CH_3COOH) produzidos no estágio anterior para formar gás Metano e CO_2 , como mostra a Equação 2 (ZANGH, 2016).



Cada fase da digestão anaeróbia tem suas características quanto aos fatores ideais para a ação microbiana. O comportamento de variáveis reguladoras do sistema de digestão anaeróbia varia de acordo com cada fase de degradação.

4.3.1 Parâmetros que influenciam no processo de biodigestão anaeróbia

O processo de digestão anaeróbia pode ser influenciado por vários fatores que são capazes de inibir parcial ou totalmente a produção de metano. Uma vez que a população microbiana no biodigestor é interdependente e simbiótica, e o desequilíbrio em qualquer uma das espécies pode comprometer todo o processo.

Segundo Arruda *et al.* (2002), existem seis parâmetros que influenciam no processo de biodigestão anaeróbia, que são:

Composição da matéria - Quanto maior a quantidade de matéria orgânica no resíduo, maior o potencial de geração de metano. É necessário que haja uma relação entre 20:1 e 30:1, de carbono/nitrogênio para a formação de biogás. O excesso de nitrogênio pode levar a má produção de biogás, com formação de compostos nitrogenados como a amônia (NH₃).

Teor de água - Durante o processo de biodecomposição de matéria orgânica a presença de água favorece a condução de enzimas e de outros metabólitos microbianos e destaca-se, predominantemente, como fator de grande importância na otimização da relação custo/benefício dos processos de tratamento de resíduos sólidos orgânicos. A biomassa deve apresentar uma alta umidade, com teor de água em cerca de 90% do seu conteúdo total, de acordo com a origem desta biomassa. A diluição deve estar em torno de 1:1 e 1:2 de água para substrato. O excesso de água pode atrapalhar a hidrólise, exigindo uma elevada carga de biomassa.

pH - O pH é um fator essencial que afeta a eficiência da produção de metano, as bactérias envolvidas no processo são afetadas por alterações do pH no interior do biodigestor. Em estágio inicial da digestão anaeróbia, os compostos orgânicos solúveis são rapidamente convertidos em ácidos graxos voláteis, resultando em queda drástica de pH e menor produção de biogás, caso não sejam adotados pré-tratamentos eficientes ou medidas de controle. A média de valores está entre 6,0 e 8,0, tendo o pH 7,0 como ponto ótimo. Esses valores são respeitados quando o processo acontece em condições normais. Assim, um valor de pH inicial adequado deve ser escolhido para o processo de digestão para aumentar a taxa de produção de metano e a taxa de redução de sólidos voláteis (ARRUDA *et al.*, 2002).

Temperatura - A temperatura é um dos fatores ambientais importantes na digestão anaeróbia, uma vez que influencia a atividade de enzimas e co-enzimas e, conseqüentemente, a produção de metano. Ele interfere na velocidade do metabolismo das bactérias, no equilíbrio iônico e na solubilidade dos substratos, principalmente de lipídios. Ressalte-se que os micro-organismos anaeróbios não dispõem de meios para o controle de sua temperatura interna, então sua temperatura varia de acordo com a do ambiente (ZANGH, 2016).

Sendo assim, as atividades enzimáticas das bactérias dependem da temperatura, e alterações bruscas causam desequilíbrio nas culturas, principalmente nas bactérias metanogênicas. Bactérias anaeróbias podem crescer sob condições psicrófilas (10-30°C), mesófilas (30-40°C) e termófilas (50-60°C). É necessário procurar manter sempre a temperatura entre 35 e 45 °C, sendo esta a ótima temperatura para o processo de biodigestão. Onde em cerca

de 10°C a atividade é drasticamente reduzida e acima de 65°C as enzimas são destruídas. A temperatura ideal, no entanto, dependerá do tipo de bactéria a ser utilizada, ou seja, se forem termofílicas, mesofílicas ou psicofílicas, além das condições locais (ARRUDA *et al.*, 2002).

Tempo de retenção - O tempo de retenção pode variar de reação para reação, porém normalmente leva de 30 a 45 dias para a formação do biogás. Porém, em algumas situações, na primeira semana de retenção hidráulica, já é possível verificar a existência de biogás em menores proporções, isso vai depender da quantidade de matéria orgânica presente no substrato e das melhores condições do processo.

Concentração de sólidos voláteis - A produção de biogás é diretamente proporcional a concentração de sólidos voláteis da biomassa, uma vez que são os sólidos voláteis que serão fermentados para produzir o biogás. Comastri Filho (1981) recomenda pelo menos 120 g de sólidos voláteis por Kg de matéria seca. Sendo assim, pode-se observar que é possível produzir biogás a partir de qualquer tipo de substrato orgânico, desde que se tenha as condições necessárias para o desenvolvimento das bactérias envolvidas no processo. Contudo, diferentes matérias orgânicas, nos darão diferentes quantidades de biogás.

Rohstoffe (2013) cita mais dois parâmetros que influencia no processo de biodigestão:

Inibidores - Durante o processo de digestão anaeróbia, são originadas várias substâncias que podem inibir o processo de fermentação, porém, vale ressaltar, que dificilmente pode-se considerar limites de concentração tóxicos como absolutos e válidos em qualquer situação, pois as bactérias possuem uma considerável capacidade adaptativa. Sendo assim, o efeito inibitório das substâncias depende de diversos fatores e concentrações (ROHSTOFFE, 2013).

Inóculo - Algumas observações devem ser levadas em consideração na hora de escolher um inóculo, como menor tempo de estabilização e maior produção de biogás. Geralmente são utilizados como inóculos lodo de estação de tratamento de esgotos e dejetos de animais, como esterco bovino e outros. Devem conter comunidades microbianas ativas, que são necessárias para a digestão anaeróbia. Ela varia de acordo com o substrato, devido à sua quantidade de ácidos graxos voláteis e amônio, que converte a NH_3 rapidamente, produzido durante a hidrólise de carboidratos e proteínas, respectivamente, para tamponar o meio (DHAMODHARAN; KUMAR; KALAMDHAD, 2015).

Em relação aos lodos anaeróbios, os lodos podem estar com sua matéria orgânica agregada em flocos (lodo floculento) ou em grânulos (lodo granular). Os lodos granulares geralmente são necessários em menor volume que os lodos floculentos para obter bons

resultados na biodegradação. O ideal é que o inóculo utilizado possua o menor número de materiais grandes particulados, que podem ser filtrados antes de sua utilização (ROHSTOFFE, 2013).

4.4 Biogás

O biogás é uma mistura gasosa produzida a partir da decomposição anaeróbia de materiais orgânicos, composto basicamente de concentrações médias de 55-70% de metano (CH_4) e 30-45% dióxido de carbono (CO_2), com pequenas quantidades de ácido sulfídrico (H_2S) e amônia (NH_3), traços de hidrogênio (H_2), nitrogênio (N_2), monóxido de carbono (CO), carboidratos e oxigênio (O_2) (DEUBLEIN; STEINNHAUSER, 2008). A composição média do biogás defendida por Rohstoffe (2013), está expressa na Tabela 1:

Tabela 1 - Composição média do Biogás.

Componente	Concentração
Metano (CH_4)	50% - 75% em vol.
Dióxido de carbono (CO_2)	25% - 45% em vol.
Água (H_2O)	2% - 7% em vol. (20 - 40°C)
Sulfeto de hidrogênio (H_2S)	20 - 20.000 ppm
Nitrogênio (N_2)	< 2% em vol.
Oxigênio (O_2)	< 2% em vol.
Hidrogênio (H_2)	< 1% em vol.

Fonte: Rohstoffe, 2013.

O biogás é composto, em sua maior parte, por gás metano, e este tem como principal característica a alta combustão que durante a queima apresenta coloração azul-lilás, não produz fuligem, possui índice de poluição atmosférica menor que o butano (presente no gás de cozinha), e é incolor e inodoro. E devido a este alto teor de metano na composição da mistura gasosa do biogás o seu potencial calorífico varia de 5.000 a 7.000 kcal por metro cúbico, podendo chegar a 12.000 kcal/m³ quando eliminado todo o gás carbônico existente na composição, sendo considerado um excelente gerador de energia térmica (DEGANUTTI, 2002). Ele é um gás combustível com a queima de forma limpa, e renovável, sendo usado como combustível e fonte de energia alternativa. Com suas propriedades físicas e químicas

semelhantes às de gás natural, embora com um menor teor de metano, o biogás pode ser utilizado como fonte de energia para diversas finalidades, tais como o calor (através da queima em caldeiras), vapor, eletricidade, hidrogênio, etanol, metanol, biodiesel e metano, para aquecimento, refrigeração, iluminação, cozimento, geradores de energia elétrica, misturadores de ração, entre outras utilidades. A Tabela 2 mostra a equivalência energética entre 1 m³ de biogás comparado a outros combustíveis.

Tabela 2 - Comparação entre Biogás e outros combustíveis.

Combustível	Quantidade equivalente
Gasolina	0,61 L
Querosene	0,57 L
Óleo Diesel	0,55 L
Gás Liquefeito	0,45 kg
Etanol	0,79 L
Lenha	1,54 kg
Energia Elétrica	1,43 kWh

Fonte: Deganutti *et al.*, 2002.

O Brasil intensificou o interesse pelo biogás nas décadas de 70 e 80, onde programas oficiais do governo estimularam a implantação de biodigestores para a geração de energia, produção de biofertilizantes e redução do impacto ambiental, visando assim diminuir a dependência de pequenas propriedades rurais na aquisição de adubos químicos, fontes de energia e redução da poluição, gerando, ainda, um aumento de renda para os produtores rurais (ZILOTTI, 2012). Há, no Brasil, algumas poucas usinas que utilizam biogás para geração de energia, estas estão expostas na Tabela 3.

Tabela 3 - Usinas de biogás em operação no Brasil.

Usina	Potência (kW)	Proprietário	Estado
Bandeirante	20.000	70% Energia S/A e 30% União de Bancos Brasileiros S.A.	SP
São João Biogás	21.560	São João Energia Ambiental S.A	SP
Energ-Biog	30	Biomass Users Network do Brasil	SP
Unidade Industrial de Aves	160	Cooperativa Agroindustrial Lar	PR
Unidade Industrial de Vegetais	40	Cooperativa Agroindustrial Lar	PR
ETE Ouro Verde	20	Companhia de Saneamento do Paraná Sanepar	PR
Granja Colombari	32	José Carlos Colombari	PR
Asja BH	430	Consórcio Horizontal Asja	MG
Arrudas	2.400	Companhia de Saneamento de Minas Gerais	MG
Total: 9 usinas	Potência total: 44.672 kW		

Fonte: Companhia Energética de Minas Gerais, 2012.

4.5 Modelagem cinética e simulação

Modelos cinéticos são importantes ferramentas para avaliar determinadas condições de um processo e elaborar estratégias para elevar ao máximo a formação do produto de interesse. Realizar o ajuste dos dados experimentais e a modelagem cinética proporciona interpretações coerentes dos resultados experimentais e podem ser úteis para analisar novos aspectos do processo evitando assim, gastos desnecessários e perda de tempo de produção dentro de uma empresa (ANDADRE, 2012).

A abordagem de modelagem cinética se caracteriza pelo uso de equações de conservação e de equações constitutivas para descrição da cinética das principais reações químicas e dos processos de transferência de calor e massa envolvidos. Leis de taxas de reação e parâmetros cinéticos associados são importantes componentes desta categoria de modelos (BEHESHTI, 2015).

A simulação consiste no processo de construção de um modelo que replica o funcionamento de um sistema real ou idealizado (ainda a ser construído) e na condução de

experimentos computacionais com este modelo, e tem por objetivo de entender melhor o problema ou processo em estudo, além de testar diferentes alternativas para sua operação e assim propor melhores formas de operá-lo. Uma das ferramentas utilizadas para essa finalidade é o software Aspen Plus®.

O software de uso comercial Aspen Plus® da Aspen Tech® é uma ferramenta de simulação de processos apropriada para o projeto conceitual, otimização e monitoramento do desempenho para a indústria. O software Aspen Plus® pode ser utilizado em um número grande de processos críticos de engenharia, tais como no desenvolvimento de projetos de novos processos, na pesquisa de defeitos de uma unidade de processo ou na otimização das operações de um processo completo. As potencialidades deste simulador permitem aos engenheiros prever o comportamento de um processo usando relações básicas de engenharia tais como balanços de massa e energia, equilíbrio de fase e químico e cinética das reações.

4.6 Equações diferenciais

Equações diferenciais são equações que contém as derivadas ou diferenciais de uma ou mais variáveis dependentes, em relação a uma ou mais variáveis independentes. Elas podem ser classificadas em relação ao tipo, ordem ou linearidade. No que diz respeito ao tipo, elas se dividem em dois: equações diferenciais ordinárias (EDO) e as equações diferenciais parciais (EDP). As EDOs são equações que contém somente derivadas ordinárias de uma ou mais variáveis dependentes, em relação a uma única variável independente (Equação 3), e as EDPs envolvem as derivadas parciais de uma ou mais variáveis dependentes e duas ou mais variáveis independentes (Equação 4) (BOYCE, 2006).

$$\frac{du}{dx} - \frac{dv}{dx} = x, \text{ temos duas variáveis dependentes } u \text{ e } v, \text{ e uma variável independente } x. \quad (3)$$

$$\frac{du}{dx} - \frac{dv}{dy} = x, \text{ temos duas variáveis dependentes } u \text{ e } v, \text{ e duas variáveis independente } y \text{ e } x. \quad (4)$$

A classificação pela ordem é dada pela ordem da mais alta derivada da função incógnita que ocorre na equação, podendo representar a EDO geral de n-ésima ordem (Equação 5):

$$F\left(x, y, \frac{dy}{dx}, \dots, \frac{d^n y}{dx^n}\right) = 0 \quad (5)$$

Em relação a linearidade as equações diferenciais se classificam como lineares e não-lineares. A equação linear se dá quando os lados, direito e esquerdo, são funções lineares, sendo a potência de cada termo que envolve y de grau 1, em relação a incógnita e suas derivadas (Equação 6). Essa classificação possui duas propriedades: a variável dependente y e todas as suas derivadas são do primeiro grau e cada coeficiente depende apenas de uma variável independente. Sendo equações não-lineares aquelas que não seguem as propriedades das equações lineares (DIACU, 2004).

$$a_n(x) \frac{d^n y}{dx^n} + a_{n-1}(x) \frac{d^{n-1} y}{dx^{n-1}} + \dots + a_1(x) \frac{dy}{dx} + a_0(x)y = g(x) \quad (6)$$

4.7 Pacotes Termodinâmicos

Pacotes termodinâmicos são muito utilizados em simulações de processo por serem definidos como uma coletânea de equações matemáticas os quais recebem entradas de dados termodinâmicos gerando saídas (resultados) do processo. Quase todos os sistemas baseados na simulação de processo têm um extenso pacote de propriedades físico-químicas associados a eles. Na maioria dos casos, serão utilizadas correlações simples, porém em outros casos pode-se recorrer ao cálculo da propriedade através de um pacote de propriedades físicas. Existem vários pacotes termodinâmicos disponíveis para uso. A escolha incorreta de um pacote termodinâmico pode levar a uma diferença significativa nos resultados de uma simulação. Por outro lado, qualquer pacote escolhido dentre os pacotes corretos não gera resultados com diferenças significativas entre si (SOUZA, 2015).

Pode-se classificar os pacotes termodinâmicos da seguinte forma:

- Equações de estado;
- Modelos de atividade de líquidos;
- Modelos Seader e Grayson (para hidrocarbonetos);
- Modelos de Pressão de Vapor;
- Miscelânea.

4.8 Modelos matemáticos

Um modelo matemático é uma representação da natureza real e de seu comportamento através de equações matemáticas. Pode ser uma interpretação de um processo ou de um sistema no qual são conhecidos os parâmetros e valores de entrada para se ter um resultado resposta (saída). Normalmente os modelos representam apenas uma parte do todo, pois a representação integral do processo acarretaria em maior capacidade de processamento. Desta forma, para estudar um determinado fenômeno mais completo e/ou complexo, faz-se necessário o uso de vários modelos que podem ou não trabalharem em conjunto. Os modelos matemáticos são utilizados praticamente em todas as áreas científicas, como, por exemplo, na biologia, química, física, economia, engenharia e na própria matemática pura.

Existem várias aplicações de modelos para diversos tipos de processos (Tabela 4).

Tabela 4 – Exemplos de modelos matemáticos de processos.

Modelo	Equação	Descrição
Langmuir	$q_c = \frac{q_m K_1 C_c}{1 + K_1 C_c}$	Absorção
Freundlich	$q_c = K_f C_c^{\frac{1}{m}}$	Absorção
Arrhenius	$\ln\left(\frac{k_1}{k_2}\right) = \left(-\frac{E_A}{R}\right)\left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}\right)$	Reação
Temkin	$q_c = \frac{RT}{b} K_f C_c$	Absorção
Elovich	$\frac{q_c}{q_m} = K_c C_c \exp\left(-\frac{q_c}{q_m}\right)$	Absorção
Fourier	$q = \frac{Q}{A} = -k \frac{\partial T}{\partial n}$	Calor
Fick	$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial C}{\partial x} \right)$	Massa

Fonte: Incropera, 2003; Fogler, 1999.

4.9 Modelos de Atividade

Embora os Modelos de Estado sejam muito seguros para predição das propriedades da maioria dos hidrocarbonetos, a aplicação deles é limitada para componentes não-polares ou ligeiramente polares. Neste caso, os modelos aconselhados, para sistemas altamente não-ideais, são os Modelos de Atividade.

Existem vários modelos de atividade como por exemplo o modelo *General NRTL* que permite modificar os parâmetros da equação aplicado a sistemas quando os pontos de ebulição dos componentes são matematicamente distantes. E o modelo de *Van Laar* que pode ser ajustado para muitos sistemas onde possuem divergências positivas ou negativas da Lei de Raoult e que não pode prever máximos ou mínimos no coeficiente de atividade (FOGLER, 1999).

5 MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia utilizada foi dividida em tópicos que serão descritos a seguir.

5.1 Aquisição e armazenamento do resíduo de malte e inóculo

O resíduo de malte foi obtido de cervejarias artesanais localizadas na cidade de Garanhuns a exemplo da cervejaria **Grunhs Bier**®. O inóculo utilizado foi o lodo industrial (lodo anaeróbico granulado), obtido de um reator UASB em escala real (1000 m³) instalado numa unidade de Bioenergia da Cetrel Bioenergia Ltda., localizada em Vitória de Santo Antão, Estado de Pernambuco. Tanto o resíduo do malte como o lodo foram coletados e armazenados em recipientes vedados e mantidos sob refrigeração a uma temperatura de 19°C.

5.2 Caracterização do resíduo de malte e inóculo

As amostras utilizadas nos experimentos, resíduo de malte (substrato) e o lodo anaeróbico (inóculo), foram caracterizadas através das análises de teor de sólidos voláteis (SV), potencial hidrogeniônico (pH), condutividade elétrica e análise elementar (Carbono, nitrogênio, enxofre e hidrogênio). De acordo com as metodologias da Tabela 5. As análises foram realizadas no Laboratório do Grupo de Resíduos Sólidos da UFPE e nos laboratórios do prédio Laboratórios de Ciência e Tecnologia de Alimentos (LACTAL) da Universidade Federal Rural de Pernambuco – Unidade Acadêmica de Garanhuns (UFRPE-UAG).

Tabela 5 - Caracterização físico-química dos substratos e inóculos.

Parâmetro	Amostra	Metodologia	Equipamento
pH	Substratos e inóculos	Potenciométrico	pHmetro Digimed DM23
Condutividade	Substratos e inóculos	Conduítmétrico	Digimed DM32
STF, STV	Substratos e inóculos	WHO (1979)	Mufla EDG 3000
Análise elementar	Substratos e inóculos	-	Carlo-Erba – Instruments modelo EA 1110

Fonte: O autor, 2019.

Para o substrato foram realizadas análises de acidez volátil, alcalinidade, DQO e DBO, com o intuito de observar e avaliar a conversão de matéria orgânica em biogás (Tabela 6).

Tabela 6 - Caracterização físico-química do substrato.

Parâmetro	Amostra	Metodologia
Acidez volátil	Substratos	Volumétrico (Silva, 1977)
Alcalinidade	Substratos	Volumétrico (Silva, 1977)
DQO	Substratos	Colorimétrico (5220-D / APHA, 2005)
DBO	Substratos	-

Fonte: O autor, 2019.

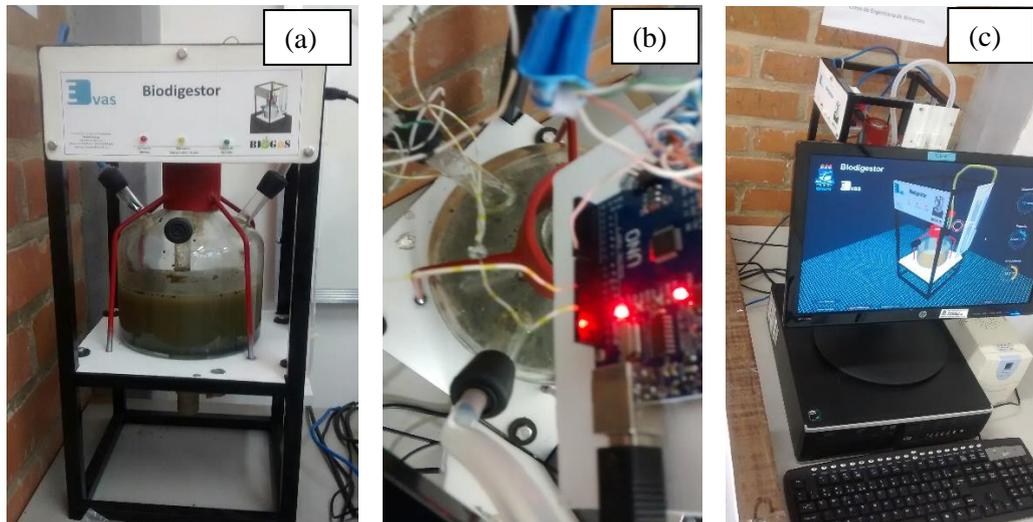
Foram realizadas três análises, sendo uma para o lodo utilizado no biodigestor, uma para o bagaço de malte antes da biodigestão e outra para bagaço de malte após o experimento do processo de biodigestão.

5.3 Montagem do experimento para cinética

Para o experimento foi utilizado um biodigestor de bancada de 2L construído em vidro, dotado de dreno e de três inserts laterais (Figura 3-a) e instrumentado com sensores de pressão, temperatura e metano (Figura 3-b), além de um supervisor de controle de dados (Figura 3-c).

Além do design do biodigestor o projeto conta com um software específico que é capaz de registrar os dados em intervalos pré-determinados de tempo de forma instantânea (*in-line*), possuindo interface gráfica para facilitar a compreensão do comportamento do experimento.

Figura 3: Biodigestor (a), sensores de dados (b) e software de controle (c).



Fonte: O autor, 2019.

Como inóculo, foi utilizado um lodo granular anaeróbio e como substrato o resíduo de malte. O biodigestor foi inoculado com cerca de 50 mL de lodo granular e 5 gramas do substrato, sendo os dois previamente caracterizados. O pH inicial foi de 7,0 para todos os tratamentos, esse valor está dentro da faixa favorável à geração de biogás. As temperaturas utilizadas foram de 20°C, 25°C e 30°C, que correspondem as temperaturas de trabalho do equipamento. Cada monitoramento (*in-line*) ocorreu entre o período de 7 a 15 dias com os dados sendo coletados automaticamente pelo software e as análises realizadas semanalmente.

O experimento levou em consideração as variáveis Temperatura, pH e Quantidade de substrato. A identificação do teor de metano (CH₄) foi realizada por meio de um sensor específico de gás, o sensor também identifica a formação de CO₂, o *datasheet* do sensor se encontra em anexo. Por fim, foi realizado um estudo cinético com os dados coletados a fim de se obter parâmetros para o modelo cinético.

A Figura 4 mostra o esquema de funcionamento do biodigestor.

Figura 4: Esquema de montagem do biodigestor.



Fonte: O autor, 2019.

5.4 Modelagem cinética

Para a elaboração do modelo cinético levou-se em consideração a evolução da produção de biogás em função do tempo. O ajuste do modelo cinético aos resultados foram realizados com o auxílio do software MathLab®, sendo criada uma programação específica para o modelo proposto.

Vários tipos de equações podem ser utilizadas para representar um devido processo, que vão desde equações simples de sistemas lineares, passando por equações polinomiais até mesmo equações mais complexas como diferenciais ordinárias de ordem superior. Para este trabalho, foi sugerido um ajuste para um modelo cinético de pseudo primeira ordem, pois se formos considerar o perfil de formação apenas com CH₄ desconsiderando a fase de produção de CO₂, teremos um perfil que se assemelha a um sistema de primeira ordem. Como para a etapa mais adiante do trabalho pretende-se utilizar o software Aspen Plus para rodar as simulações, este tem em seu banco de pacote reacional a utilização de um modelo cinético de primeira ordem. Devido a isto, e para atender a uma necessidade do simulador, é que será dada a preferência de se ajustar os dados experimentais a um modelo cinético de primeira ordem.

Será estudado apenas a etapa de formação do componente metano (CH₄) no processo de produção de biogás, desconsiderando as demais etapas de formação dos outros gases. O modelo proposto neste trabalho é semi-empírico, considerando analogia com a cinética química e

dependência linear dos fatores do processo. A elaboração de um modelo cinético foi possível utilizando uma solução de equação diferencial de primeira ordem, adaptada do modelo de Arrhenius (FOGLER, 1999; LEVENSPIEL, 1999) considerando uma reação de pseudo primeira ordem e elas são apresentadas pelas Equações (7–11).

$$\frac{dC_A}{dt} = -kC_A \quad (7)$$

$$\frac{dC_A}{C_A} = -kdt \quad (8)$$

$$\int \frac{dC_A}{C_A} = \int -kdt \quad (9)$$

$$\ln(C_A) = -kt + c \quad (10)$$

$$C_A = C_{A0}e^{-kt} \quad (11)$$

Onde:

- C_A = Concentração de substrato
- C_{A0} = Concentração inicial de substrato
- k = Constante cinética
- t = tempo
- c = Constante de integração

A concentração do produto é dada por (Equações 12 – 15)

$$C_g \alpha (C_{A0} - C_A) \quad (12)$$

$$C_g = q (C_{A0} - C_A) \quad (13)$$

$$C_g = q (C_{A0} - C_{A0}e^{-kt}) \quad (14)$$

$$C_g = q C_{A0}(1 - e^{-kt}) \quad (15)$$

Onde:

- C_g = Concentração do gás metano;
- q = Coeficiente estequiométrico;
- α = termo de proporcionalidade;

A constante de Arrhenius define que k depende da temperatura de acordo com a Equação 16.

$$k = k_0 e^{-\left(\frac{E_a}{RT}\right)} \quad (16)$$

Onde:

- K_0 = termo pré-exponencial;
- E_a = Energia de ativação;
- R = constante universal dos gases ideais;
- T = Temperatura.

Com base nas duas equações anteriores e definindo empiricamente que qC_{A0} é linearmente dependente da Temperatura, temos a Equação 17.

$$C_g = q C_{A0} (1 - e^{-(k_0 e^{-\frac{E_a}{RT}})t}) \quad (17)$$

Onde:

Variáveis manipuladas são:

- T = Temperatura [K];
- t = tempo [min];

Parâmetros cinéticos são:

- K_0 = constante cinética [/min];
- E_a = Energia de ativação [J/mol];

Constates cinéticas:

- R = constante universal [8,3144 J/K.mol];

5.5 Simulação do processo

As simulações do processo de produção de gás metano foram realizadas no software ASPEN PLUS®, onde foi colocado para rodar as simulações conforme as condições do planejamento experimental apresentado na Tabela 7. Para isso, foi utilizado como pacote termodinâmico o NRTL para os cálculos de equilíbrio e foi adotado o reator tipo batelada no bloco de reação para representar o biodigestor, onde foi inserido neste reator a reação química desenvolvida no bloco de reações químicas. A reação química criada fez uso do mecanismo apresentado na Equação 2 (modelo cinético do tipo Arrhenius), utilizando os parâmetros cinéticos obtidos pelos resultados experimentais para a reação de formação do metano a partir do substrato (bagaço de malte). Este modelo de reação foi inserido no bloco do reator onde foi utilizado os dados das correntes de alimentação e das condições de operação do reator. Cada reação ocorrida no reator foi feita em estado estacionário. Foram realizadas 12 simulações para

cada condição de temperatura, onde estas simulações foram feitas no instante de tempo a cada 25 minutos. No final de todas as 12 simulações, foi integrado os resultados em um único gráfico mostrando o comportamento em função do tempo (análise de sensibilidade). Montou-se um *flowsheet* com uma unidade de armazenamento de produtos gerados da biodigestão (Acumulador) e uma unidade de queima dos gases para a geração de energia (caldeira). O critério de parada para as simulações foi o tempo de residência de 5 horas (300 minutos), porém as simulações respeitaram o planejamento da Tabela 7.

5.6 Planejamento fatorial

O planejamento fatorial adotado para este trabalho está descrito na Tabela 7 abaixo, em que estão representadas as variáveis escolhidas para o estudo (tempo de processo, temperatura e quantidade de substrato). O planejamento levou em conta o ponto central, sendo assim um planejamento 3³. Esse planejamento foi utilizado para realizar as simulações, levando em consideração a energia de ativação e a constante cinética obtidas a partir do modelo cinético.

Tabela 7 - Planejamento fatorial para a produção de biogás.

Variável	Nível mínimo (-)	Ponto central (0)	Nível máximo (+)
Tempo de processo	25min	75min	125min
Temperatura	20°C	25°C	30°C
Quantidade de substrato	45g/2L	50g/2L	55g/2L

Fonte: O autor, 2019.

A variável resposta foi a quantidade de metano produzida. Os níveis de cada parâmetro foram definidos de acordo com as condições que melhor se apliquem as atividades das bactérias presentes no lodo, seguindo a literatura e procurou seguir condições próximas das utilizadas pelo experimento em bancada para a obtenção dos parâmetros cinéticos.

As quantidades de substrato e água foram calculadas seguindo a metodologia adaptada de Hansen *et al.* (2004) e Alves (2008), em que consideram 5g de substrato para 50 mL de inóculo (lodo).

5.7 Análise estatística

O planejamento fatorial de experimentos é uma ferramenta estatística importante, pois permite avaliar simultaneamente o efeito de um grande número de variáveis, a partir de um número reduzido de ensaios experimentais, quando comparados aos processos univariados (BARROS *et al.*, 2010).

Os tratamentos do planejamento foram avaliados ao nível de significância de 5% no *Software* Statistica ME. Para a obtenção do ajuste de curva, foi adotado o método dos Mínimos Quadrados.

Dentre os programas utilizados para se analisar os resultados do planejamento fatorial se tem o Statistica®, produzido pela STATSOFT®. O Statistica® fornece o mais abrangente conjunto de ferramentas para análise, gestão e visualização de bases de dados e *Data Mining*. As suas técnicas incluem as mais vastas seleções de modelagem preditiva, agrupamentos (*clustering*) e ferramentas exploratórias. O Statistica® é uma plataforma verdadeiramente analítica e testada, com mais de duas décadas de experiência no fornecimento de resultados confiáveis, com uma comunidade mundial superior a 1 milhão de usuários, segundo dados da própria STATSOFT® (CUNICO *et al.*, 2008). A análise estatística será realizada para os resultados da simulação.

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados da caracterização do inóculo e substrato bem como, da funcionalidade do biodigestor e do bagaço do malte como substrato para produção de biogás estão descritos abaixo.

6.1 Caracterização do resíduo de malte e inóculo

Na Tabela 8 estão apresentados os teores médios de sólidos totais fixos e voláteis, em porcentagem para o inóculo e substrato avaliado.

Tabela 8 - Resultados da caracterização do inóculo e substrato (STF e STV).

Parâmetros	Substrato	Inóculo
<i>STF (%)</i>	21,37	20,32
<i>STV (%)</i>	78,63	79,68

Fonte: O autor, 2019.

Xu (2018), afirma que a quantidade de sólidos voláteis está diretamente relacionada com o nível de carga orgânica, responsáveis diretos na produção de biogás. Quanto maior esse valor melhor será o processo de biodigestão.

Os resultados da análise elementar do inóculo, em termos de carbono, hidrogênio, nitrogênio e enxofre e da Condutividade elétrica estão apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 - Resultados da caracterização do substrato e inóculo.

Parâmetros	Inóculo	Substrato
N (%)	6,75	3,14
C (%)	37,14	40,44
S (%)	2,45	-
H (%)	2,27	7,38
Relação (C/N)	5,50	12,87
Condutividade inicial ($\mu\text{S}/\text{CM}$)	437,27	-
Condutividade final ($\mu\text{S}/\text{CM}$)	3245,33	-

Fonte: O autor, 2019.

Karlsson (2014) afirma que um fator de extrema importância na produção de biogás, que deve ser levado em conta, é a relação carbono/nitrogênio (C/N). O autor ressalta ainda que é importante que essa relação não esteja muito baixa e que a proporção de nitrogênio seja inferior à de carbono, pois o processo pode ser facilmente afetado em razão da inibição das bactérias causada pela liberação de amônia, causando deficiência de nitrogênio no processo. Os valores observados na Tabela 9 demonstram que tanto o substrato como o inóculo possuem características que beneficiam a produção do biogás.

Observa-se na Tabela 9 que a condutividade elétrica aumentou da condição inicial para a final. Konrad *et al.* (2016), afirmam que o aumento da condutividade elétrica demonstra que a matéria orgânica estava sendo degradada de forma anaeróbica pelas bactérias.

Na Tabela 10 estão expressos os valores iniciais e finais de Acidez volátil, Alcalinidade total, DQO e DBO do substrato.

Tabela 10 - Caracterização do substrato antes e depois da biodigestão.

Parâmetros	Amostra antes	Amostra depois
Acidez volátil (mg/L)	532	126
Alcalinidade total (mg/L)	138	741
DQO (mg/L)	2234	410
DBO (mg/L)	1340	160
pH	6,9	7,6

Fonte: O autor, 2019.

Alcalinidade é a capacidade que a amostra possui de neutralizar ácidos enquanto que acidez é a capacidade quantitativa de um ácido reagir com uma base forte num determinado pH (ZHOU, 2017). Os resultados obtidos de alcalinidade das amostras antes e depois da biodigestão mostram que o substrato final apresenta maior valor de alcalinidade do que o inicial, indicando que o processo de biodigestão anaeróbia é responsável pela produção de substâncias alcalinizantes, principalmente bicarbonatos que são responsáveis por neutralizar os ácidos produzidos, elevar a resistência a queda de pH e manter os níveis apropriados para um melhor desempenho do sistema.

Segundo Moraes (2015) os ácidos voláteis podem ser utilizados como substratos pelas bactérias, porém podem atuar como inibidores, uma vez que para valores de pH baixo formam

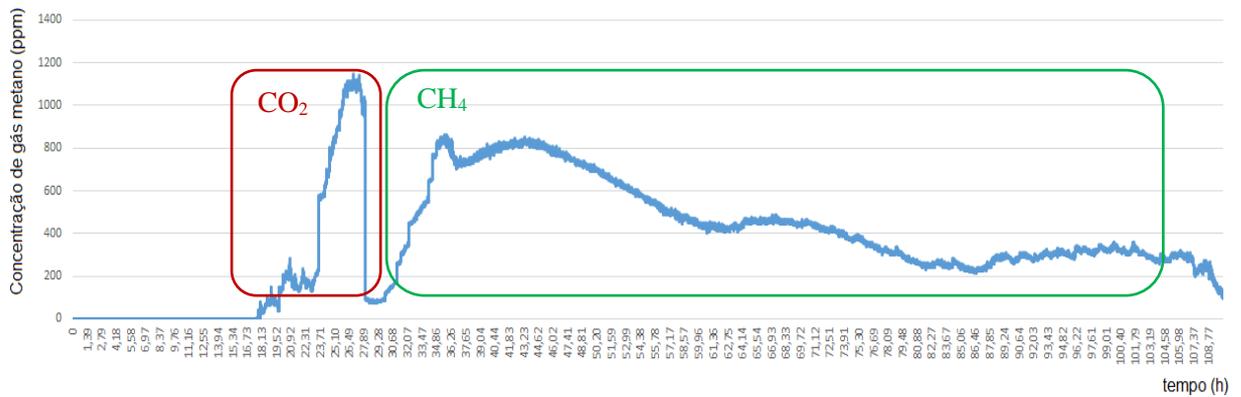
preferencialmente os ácidos em formas não ionizadas, que podem penetrar na membrana celular e inibir as bactérias. Os resultados da Tabela 10 mostram uma redução na Acidez Volátil, o que corrobora com o estudo de Moraes.

A DQO diz respeito a quantidade de oxigênio consumido por materiais e por substâncias orgânicas e minerais, que oxidam sob condição definidas (CAVINATO, 2017). Um parâmetro importante a ser monitorado durante a digestão anaeróbia, pois indica a estabilização da matéria orgânica. Conhecendo-se os valores de DQO iniciais do resíduo e a concentração de DQO após tratamento, é possível calcular a eficiência de remoção de DQO, e, quanto maior a eficiência, mais biodegradado e bioestabilizado encontra-se o resíduo final. Os resultados da Tabela 6 mostram uma queda na DQO, com eficiência de remoção de 81,64%. Schirmer *et al.* (2014) analisaram a geração de metano a partir da fração orgânica de resíduos de aterro sanitário inoculados com lodo de ETE, observando uma redução média na DQO de 90% (considerando todos os ensaios). Segundo Zhang *et al.* (2008), a DQO solúvel do meio representa a matéria orgânica solúvel, substrato da etapa de metanogênese. Assim, os 81,64% observados na redução da DQO no presente estudo podem ser atribuídos à conversão da matéria orgânica em biogás. Cortez *et al.* (2008) definem Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) como a quantidade de oxigênio requerida para se estabilizar bioquimicamente um composto orgânico pela ação de microrganismos em condições anaeróbias. A eficiência de remoção do biodigestor de DBO foi de 88,06%. No entanto, estes valores foram abaixo da taxa indicada por Bertoncini (2011), representada por 90% na remoção da DBO.

6.2 Produção de biogás

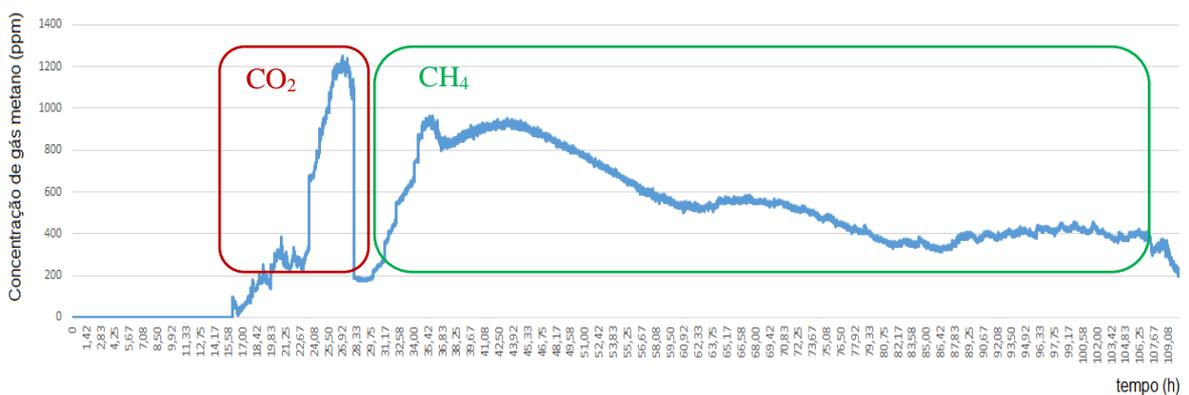
As Figuras abaixo mostram os resultados da produção de biogás dos experimentos realizados.

Figura 5: Produção de gás ao longo do tempo para a uma temperatura de 20°C.



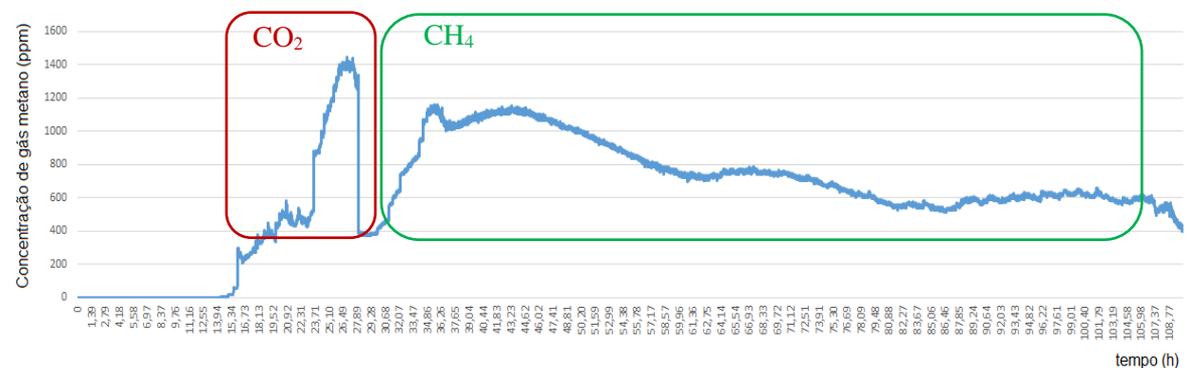
Fonte: O autor, 2019.

Figura 6: Produção de gás ao longo do tempo para a uma temperatura de 25°C.



Fonte: O autor, 2019.

Figura 7: Produção de gás ao longo do tempo para a uma temperatura de 30°C.



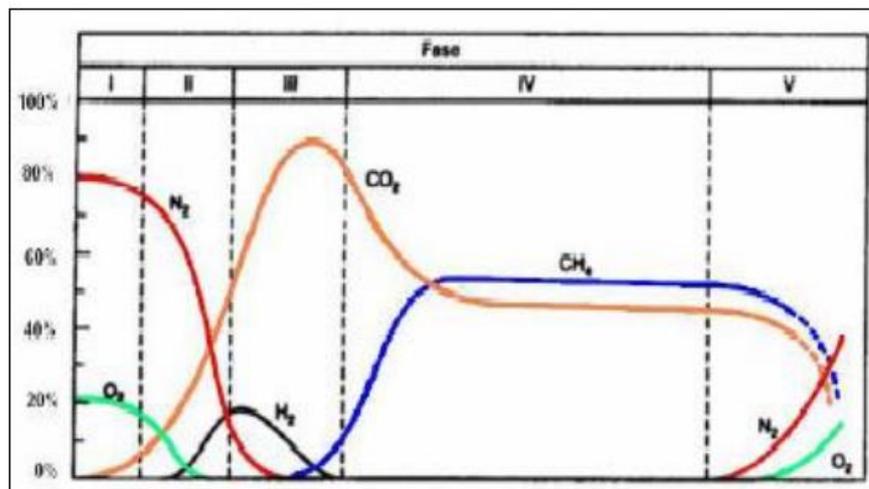
Fonte: O autor, 2019.

Observa-se nas Figuras 5, 6 e 7, que o comportamento da produção de biogás é semelhante. Mas com o aumento da temperatura a produção de metano é maior. Isto é corroborado quando se faz um paralelo com a faixa de temperatura ótima para a ação das bactérias. Temperaturas mais altas estimulam o crescimento de bactérias mesofílicas responsáveis pela formação do metano, resultando em processos de eficiência elevada e menor tempo de retenção. Castillo *et al.* (2006) avaliando as condições operacionais da digestão de resíduos sólidos urbanos, descobriram que a melhor temperatura para estabilização do processo é de 30°C, temperatura que apresentou melhor desempenho no presente trabalho.

No início do processo o sensor identificou a produção de CO₂, isso é o resultado da fase acetogênese em que ocorre a transformação de ácidos graxos em ácido, liberando hidrogênio e CO₂, processo este que antecede a metanogênese (produção de metano).

Resultados semelhantes foram encontrados por Borba (2006), que avaliou a geração de gases em aterros de resíduos sólidos e separou a fase da biodigestão em 5 etapas, como mostra a Figura 8.

Figura 8: Fases de geração de biogás em aterros de resíduos sólidos.



Fonte: Borba, 2006.

6.3 Modelagem cinética da produção de biogás

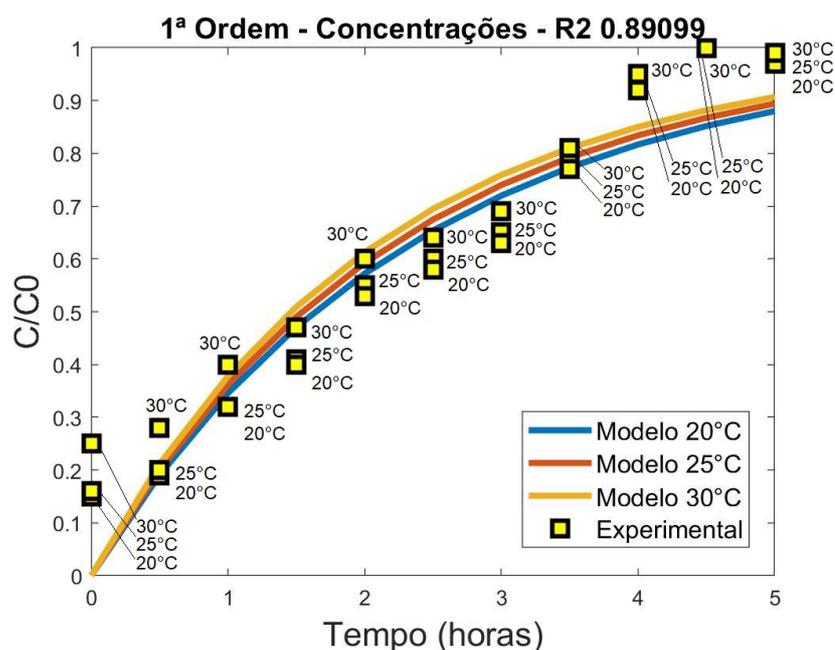
Os resultados obtidos pelo experimento com o reator de bancada serviram para encontrar os parâmetros cinético do modelo para a formação de metano (CH₄). Foi selecionado o intervalo dos dados em que apresentava a formação de gás metano. Para tanto, foi realizado um ajuste utilizando a regressão não linear múltipla no Software *Matlab*®. A função utilizada

no *Matlab*® foi *FIT*. Com a ajuda desta função, foi possível encontrar o valor da constante global sem a necessidade de linearização. Os pontos obtidos pela etapa de formação do metano foram ajustados ao modelo que por sua vez foi obtido o valor da constante cinética e da Energia de ativação.

Foi adotado para o processo de formação de metano um modelo cinético de uma reação de pseudo primeira ordem conforme apresentado pelo mecanismo mostrado na seção 5.4.

A Figura adiante (Figura 9) mostra os resultados da produção de biogás realizados no reator de bancada para as condições de temperatura estudadas junto com as curvas ajustadas ao modelo cinético proposto. O ajuste global obteve um R^2 de 0,89 e valores para a constante cinética de $3,25 \times 10^{-5}$ [1/min] e Energia de ativação de $8,25 \times 10^3$ [J/mol]. É possível observar pela Figura 9 que a temperatura apresenta uma influência na formação do gás metano no processo. A curva de temperatura de 20°C apresentou a menor taxa de formação de gás metano enquanto que a curva de temperatura de 30°C foi a que apresentou a maior taxa de formação de gás metano. Na faixa de temperatura entre 20°C e 25°C, a velocidade de utilização do substrato pode reduzir-se, pois nessa faixa ocorre mais a ação das bactérias psicrotóficas. Sob condições psicrófilas, as bactérias envolvidas no processo de digestão anaeróbia têm seu crescimento comprometido e reduzidas as taxas de utilização do substrato e o rendimento de biogás (TRZCINSKI; STUCKEY, 2010). Essa velocidade pode estar relacionada também com a concentração de microorganismos ativos no processo.

Figura 9: Resultado do ajuste cinético aos dados obtidos na produção de gás metano.



Fonte: O autor, 2020.

Nota-se pelas curvas que a Temperatura apresenta influência no processo e que apesar de estarem próximas, percebe-se que quanto maior a temperatura, maior a conversão.

A relação C/C_0 apresentada no gráfico da Figura 9 foi utilizada como forma de adimensionalizar a variável de concentração, deixando-a sem a necessidade de fixar as unidades. Dessa forma, a unidade medida pelo sensor (ppm) mostrada nas Figuras 5, 6 e 7 não será obrigatório, deixando livre para ser adotado qualquer unidade desde que respeite o intervalo do gráfico. Isto é de fundamental importância, pois os parâmetros cinéticos levarão em consideração as unidades no sistema internacional (SI). C é o valor da concentração no instante de medição para a devida temperatura, e C_0 é a concentração máxima medida pelo sensor para cada experimento (900 ppm (20°C), 1.000 ppm (25°C) e 1.200 ppm (30°C)).

Os parâmetros cinéticos encontrados por este trabalho podem se comparados com outros trabalhos vistos na literatura conforme mostrado na Tabela 11.

Tabela 11 – Comparação da energia de ativação (E_a) e constante cinética (K_0) com outros autores.

Modelo cinético	K_0 [/min]	E_a [J/mol]	Temperatura (°C)
O autor (2020)	$3,25 \times 10^{-5}$	$8,2484 \times 10^3$	(20 – 30)
D.Trommer (2004)	$(64,2 - 452,4) \times 10^6$	$(147 - 162) \times 10^3$	(326 - 1226)
Vadim <i>et al.</i> (1996)	$(1,02 - 2,20) \times 10^{-21}$	---	(20 – 30)
Ch.Pichas (2010)	---	41×10^3	(359 – 439)

Fonte: O autor, 2020.

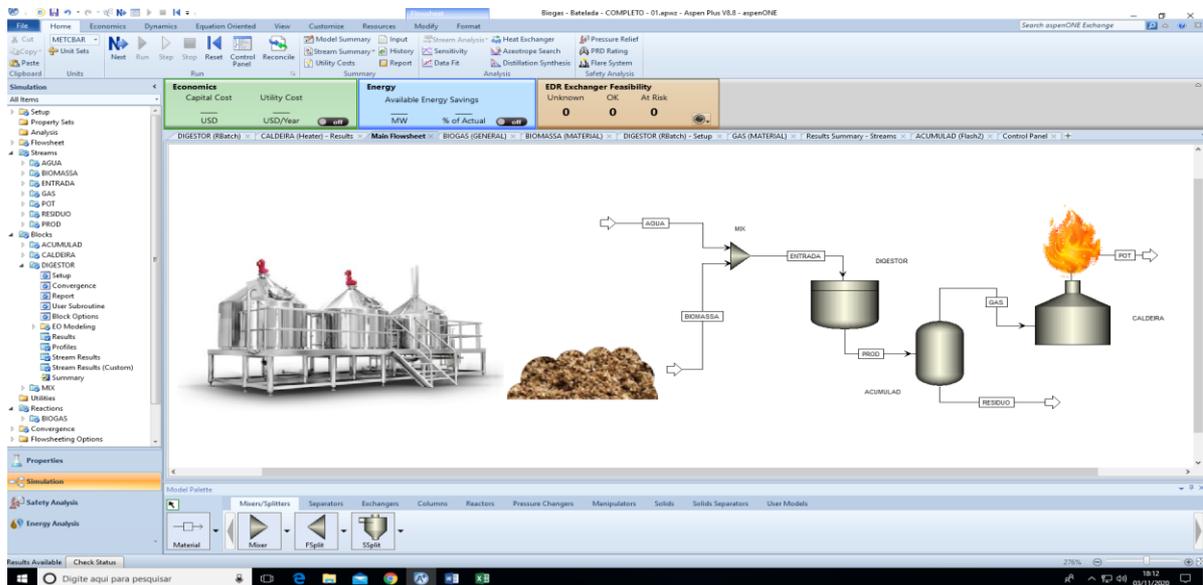
D.Trommer e colaboradores (2004) trabalharam com estudo cinético da decomposição do CH_4 para produzir H_2 e negro em um reator de vórtice de fluxo. Os autores encontraram valores para os parâmetros cinéticos de Arrhenius trabalhados na faixa de temperatura de 326°C - 1.226°C. Embora essas condições estejam distantes das utilizadas neste trabalho, pode-se comparar a ordem de grandeza desses parâmetros para condições de temperatura extrema. Vadim D. Knyazev e colaboradores (1996) realizaram estudos das reações de $C_2H_3 + H_2 \rightleftharpoons H + C_2H_4$ e $CH_3 + H_2 \rightleftharpoons H + CH_4$ fazendo uso de análises de espectrometria de massa. As constantes de velocidade foram determinadas em experimentos resolvidos no tempo em função da temperatura. Os autores determinaram apenas a constante cinética sem levar em consideração a energia de ativação. Ch.Pichas e colaboradores (2010) estudaram a reforma a seco do metano por dióxido de carbono. Os autores trabalharam com a faixa de temperatura de 359°C até 439°C. Embora as condições de estudo sejam diferentes das estudadas neste trabalho, pode-se ter uma ideia da ordem de grandeza da energia de ativação para estudos com CH_4 em

condições diferentes de processo.

6.4 Simulação do processo

A Figura 10 a seguir mostra o *flowsheet* do processo simulado.

Figura 10: *Flowsheet* da simulação do processo de produção de biogás no Aspen Plus®.



Fonte: O autor, 2020.

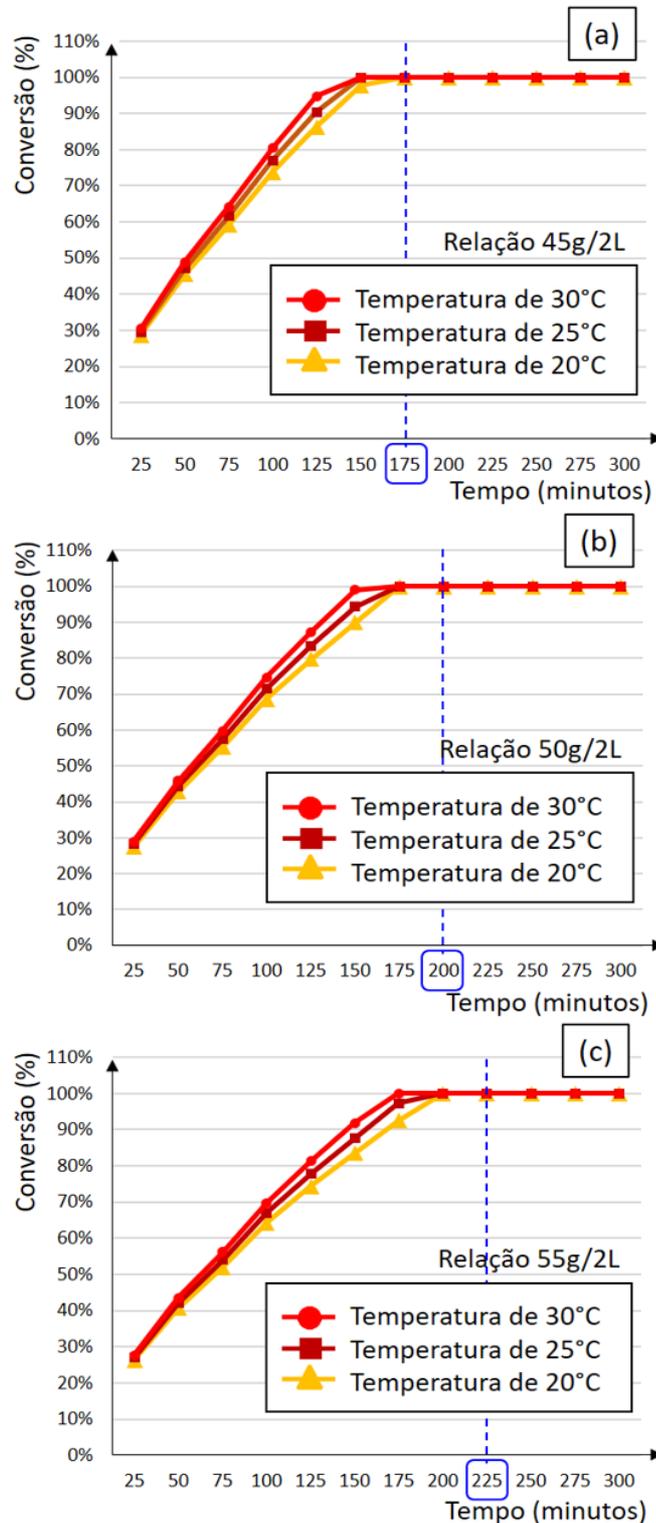
O *flowsheet* é composto por um fluxo de água e um fluxo de bagaço. Em cada fluxo foi inserido as respectivas quantidades de material de acordo com o que foi apresentado no planejamento experimental. Esses fluxos foram misturados no bloco mix respeitando as respectivas frações de massa de cada componente. Em seguida a mistura foi inserida no bloco de reação formado por um reator tipo batelada representando o biodigestor. Neste bloco foi inserido um mecanismo de reação com os parâmetros cinéticos encontrados no experimento anterior. O produto do biodigestor foi armazenado em uma etapa onde foi separado a fração de gás para a queima em uma caldeira, na qual foi simulada a quantidade de energia gerada pela combustão.

6.4.1 Simulação a partir do planejamento baseado no experimento

A partir dos dados obtidos na simulação foi realizado uma análise de sensibilidade com simulações feitas para a conversão de substrato para gás metano em função do tempo de batelada. As condições de operação respeitaram o planejamento experimental mostrado na

Tabela 7. A Figura 11 apresenta os perfis de conversão em gás para as condições de temperatura e relação de substrato.

Figura 11: Perfil da conversão de substrato em função do tempo para várias temperaturas (20°C, 25°C e 30°C). Relação de substrato de 45g/2L (a), 50g/2L (b) e 55g/2L (c).



Fonte: O autor, 2020.

Os resultados apresentados pela Figura 11 mostram como o perfil de conversão de substrato se comporta ao longo do tempo de cada batelada. É possível verificar que a temperatura (em todas as condições de operação) teve um fator importante para a formação de gás no final do processo. Nota-se que quanto maior a temperatura, mais rápido a reação ocorre independentemente da quantidade de substrato utilizado. Esta condição também foi encontrada nos resultados experimentais para a obtenção dos parâmetros cinéticos e está de acordo com os princípios da reação química. Já para a relação de substrato em meio aquoso, nota-se uma situação inversa a da temperatura. Quanto maior a relação substrato/água (meio aquoso), menor será a velocidade de formação de produtos. A Figura 11-a apresenta uma condição de relação de substrato em meio aquoso de 45g/2L onde o volume utilizado em bancada foi de 2 litros. É possível verificar que a velocidade de formação diminui quando comparado com a Figura 11-b (50g/2L) e a Figura 11-c (55g/2L). Isto pode ser explicado devido a quantidade de água presente no substrato. Segundo Fagbohunge *et al.* (2015), a água favorece a difusão de AGV (ácidos graxos voláteis), particularmente o ácido acético, para as células microbianas, o que resulta em produção de metano. Além disso, no processo de biodigestão da matéria orgânica a presença de água favorece a condução de enzimas e de outros metabólitos microbianos, otimizando assim o processo. Logo, quanto maior a quantidade de água presente no substrato, melhor será a produção de metano. As Tabelas 12 e 13 apresentam os resultados do planejamento experimental apresentado na Tabela 7. Os dados obtidos foram inseridos no software Statistica® onde foram realizadas análises estatísticas.

Tabela 12: Resultados do planejamento experimental (continua).

Exp.	Tempo de processo	Temperatura	Relação de Substrato	Conversão
1	(-1) 25	(-1) 20°C	(-1) 45g / 2l	29%
2	(-1) 25	(-1) 20°C	(0) 50g / 2l	27%
3	(-1) 25	(-1) 20°C	(+1) 55g / 2l	26%
4	(-1) 25	(0) 25°C	(-1) 45g / 2l	30%
5	(-1) 25	(0) 25°C	(0) 50g / 2l	28%
6	(-1) 25	(0) 25°C	(+1) 55g / 2l	27%
7	(-1) 25	(+1) 30°C	(-1) 45g / 2l	30%
8	(-1) 25	(+1) 30°C	(0) 50g / 2l	29%
9	(-1) 25	(+1) 30°C	(+1) 55g / 2l	28%
10	(0) 75	(-1) 20°C	(-1) 45g / 2l	59%

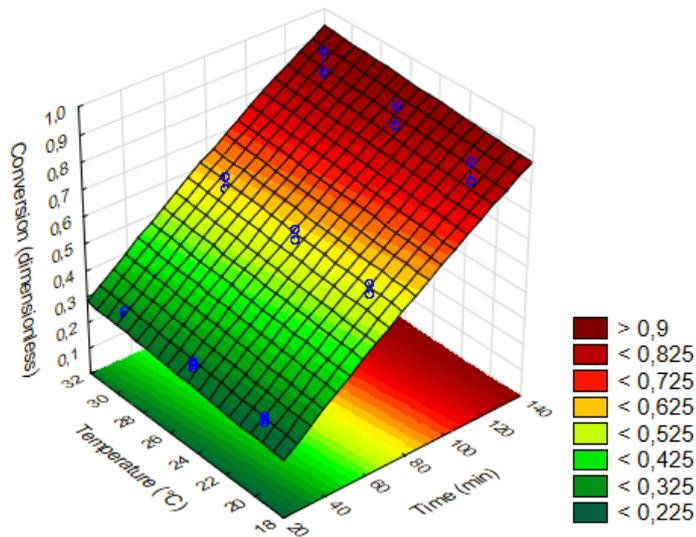
Tabela 13: Resultados do planejamento experimental (conclusão).

11	(0) 75	(-1) 20°C	(0) 50g / 2l	55%
12	(0) 75	(-1) 20°C	(+1) 55g / 2l	52%
13	(0) 75	(0) 25°C	(-1) 45g / 2l	62%
14	(0) 75	(0) 25°C	(0) 50g / 2l	57%
15	(0) 75	(0) 25°C	(+1) 55g / 2l	54%
16	(0) 75	(+1) 30°C	(-1) 45g / 2l	64%
17	(0) 75	(+1) 30°C	(0) 50g / 2l	60%
18	(0) 75	(+1) 30°C	(+1) 55g / 2l	56%
19	(+1) 125	(-1) 20°C	(-1) 45g / 2l	86%
20	(+1) 125	(-1) 20°C	(0) 50g / 2l	80%
21	(+1) 125	(-1) 20°C	(+1) 55g / 2l	74%
22	(+1) 125	(0) 25°C	(-1) 45g / 2l	90%
23	(+1) 125	(0) 25°C	(0) 50g / 2l	83%
24	(+1) 125	(0) 25°C	(+1) 55g / 2l	78%
25	(+1) 125	(+1) 30°C	(-1) 45g / 2l	95%
26	(+1) 125	(+1) 30°C	(0) 50g / 2l	87%
27	(+1) 125	(+1) 30°C	(+1) 55g / 2l	81%

Fonte: O autor, 2020.

Diante dos resultados, foi possível plotar as curvas de superfície conforme mostrado a seguir. A Figura 12 apresenta a curva de superfície para as variáveis independentes Temperatura (°C) e Tempo (min) e para a variável dependente Conversão.

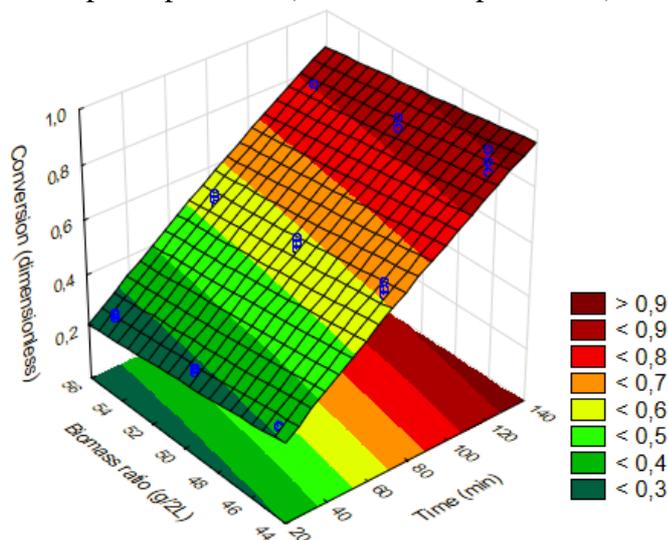
Figura 12: Gráfico de superfície para a Conversão (variável dependente) em função da Temperatura e Tempo de processo (variáveis independentes).



Fonte: O autor, 2020.

É possível notar que quanto maior a temperatura, maior será a conversão. Porém em comparação com o tempo de processo, este se apresenta de forma mais expressiva. Quanto maior o tempo de processo, maior será a conversão do substrato em gás. Amaral *et al.* (2004), Sousa (2010) e Lima; (2018), observaram em seus estudos que quanto maior o tempo de retenção maior foi a produção de biogás. A Figura 13 apresenta a curva de superfície para as variáveis independentes Relação de biomassa (g/2L) e Tempo (min) e para a variável dependente Conversão.

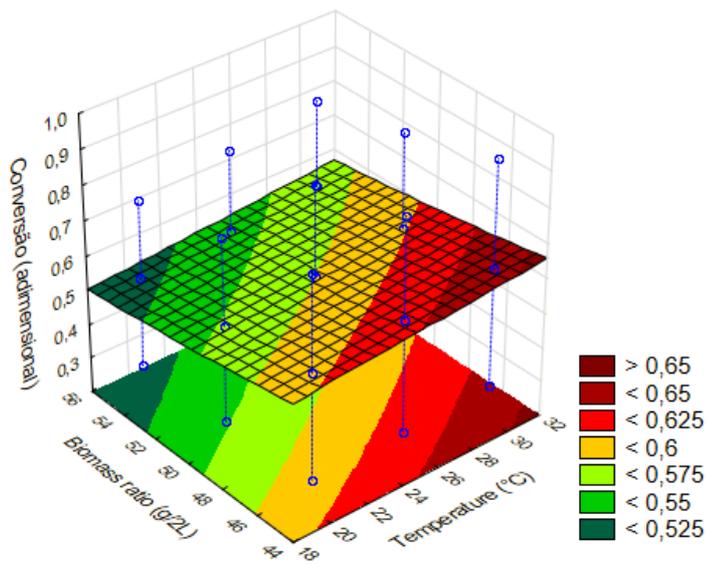
Figura 13: Gráfico de superfície para a Conversão (variável dependente) em função da Relação de biomassa e Tempo de processo (variáveis independentes).



Fonte: O autor, 2020.

É possível notar que quanto maior for a Relação de biomassa, menor será a conversão. Este resultado corrobora com a análise feita pelas simulações e apresentada o gráfico da Figura 11. Em comparação com a variável Tempo de processo, esta apresenta um fator mais influente no processo, onde é possível notar que quanto maior for o tempo de operação, maior será a conversão de substrato em gás na formação de metano. A Figura 14 apresenta a curva de superfície para as variáveis independentes Relação de biomassa (g/2L) e Temperatura (°C) e para a variável dependente Conversão.

Figura 14: Gráfico de superfície para a Conversão (variável dependente) em função da Relação de biomassa e Temperatura (variáveis independentes).

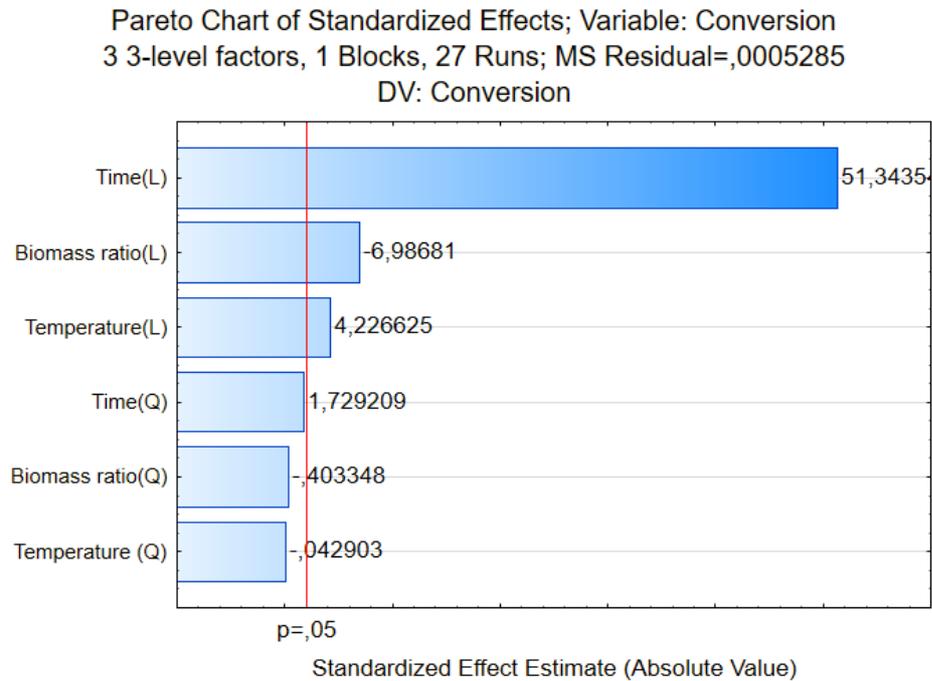


Fonte: O autor, 2020.

Neste caso, nota-se que as variáveis Relação de biomassa e Temperatura possuem influências inversas na formação de gás metano. Enquanto que a conversão diminui com o aumento da Relação de biomassa em meio aquoso, a variável Temperatura favorece a conversão.

Em seguida, foi realizado um estudo do nível de significância das variáveis que pode ser visto no gráfico de Pareto apresentado pela Figura 15.

Figura 15: Gráfico de Pareto para as variáveis de estudo.

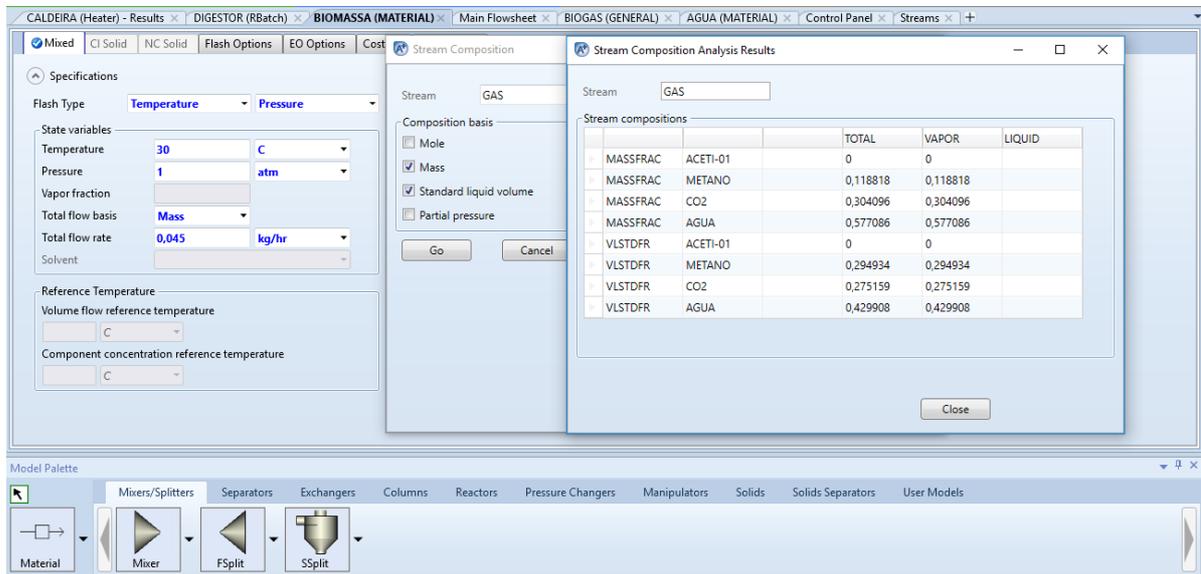


Fonte: O autor, 2020.

Percebe-se que a principal variável que influencia o processo é o tempo, seguido da variável relação de substrato e temperatura. Quanto mais tempo o substrato ficar retido no biodigestor, maior quantidade de gás metano poderá ser formada, pois a atividade dos microrganismos pode ser mantida. A eficiência da degradação é indicada pela percentagem de material orgânico degradado e convertido em biogás durante determinado tempo. Todas essas variáveis sendo analisadas através de modelos lineares. É possível observar que para modelos quadráticos apenas a variável tempo é representativa embora chegando a limite de significância de 95%.

Após a análise dos resultados, foi realizado uma simulação com as melhores condições de operação para o planejamento experimental apresentada na Tabela 12. Foi utilizado 30°C de temperatura com uma relação de substrato em fase aquosa de 45g/2L e um tempo de processo de 125 minutos conforme mostrado na Figura 16, retirada do bloco que alimentação do Aspen plus®.

Figura 16: Simulação nas condições de operação 125 min, 30°C, 45g/2L.



Fonte: O autor, 2020.

Foi possível obter da simulação informações como o fluxo de material (molar, mássico e volumétrico) bem com as suas referidas frações (mola, mássico e volumétrico); temperatura; pressão; fração de vapor; fração de líquido e energia do processo. Essas informações podem ser vistas nas Tabelas 14 e 15 a seguir.

Tabela 14: Resultados para a simulação nas condições de operação 125 min, 30°C, 45g/2L (continua).

Parâmetro	Correntes (linhas de fluxo)			
Substream: MIXED	AGUA	BIOMASSA	GAS	RESIDUO
Mole Flow [kmol/hr]				
ACETI-01	0,00000	0,00075	0,00000	0,00000
METANO	0,00000	0,00000	0,00073	0,00002
CO2	0,00000	0,00000	0,00068	0,00007
AGUA	0,11102	0,00000	0,00314	0,10788
Mole Frac				
ACETI-01	0,00000	1,00000	0,00000	0,00000
METANO	0,00000	0,00000	0,15979	0,00023
CO2	0,00000	0,00000	0,14908	0,00068
AGUA	1,00000	0,00000	0,69113	0,99909
Mass Flow [kg/hr]				
ACETI-01	0,00000	0,04500	0,00000	0,00000
METANO	0,00000	0,00000	0,01163	0,00039
CO2	0,00000	0,00000	0,02977	0,00322
AGUA	2,00000	0,00000	0,05650	1,94350
Mass Frac				
ACETI-01	0,00000	1,00000	0,00000	0,00000
METANO	0,00000	0,00000	0,11882	0,00020
CO2	0,00000	0,00000	0,30410	0,00165
AGUA	1,00000	0,00000	0,57709	0,99814
Liq Vol (60F) [l/min]				
ACETI-01	0,00000	0,00072	0,00000	0,00000
METANO	0,00000	0,00000	0,00065	0,00002
CO2	0,00000	0,00000	0,00060	0,00007
AGUA	0,03340	0,00000	0,00094	0,03245
Liq Vol Frac (60F)				
ACETI-01	0,00000	1,00000	0,00000	0,00000
METANO	0,00000	0,00000	0,29493	0,00067
CO2	0,00000	0,00000	0,27516	0,00201
AGUA	1,00000	0,00000	0,42991	0,99732

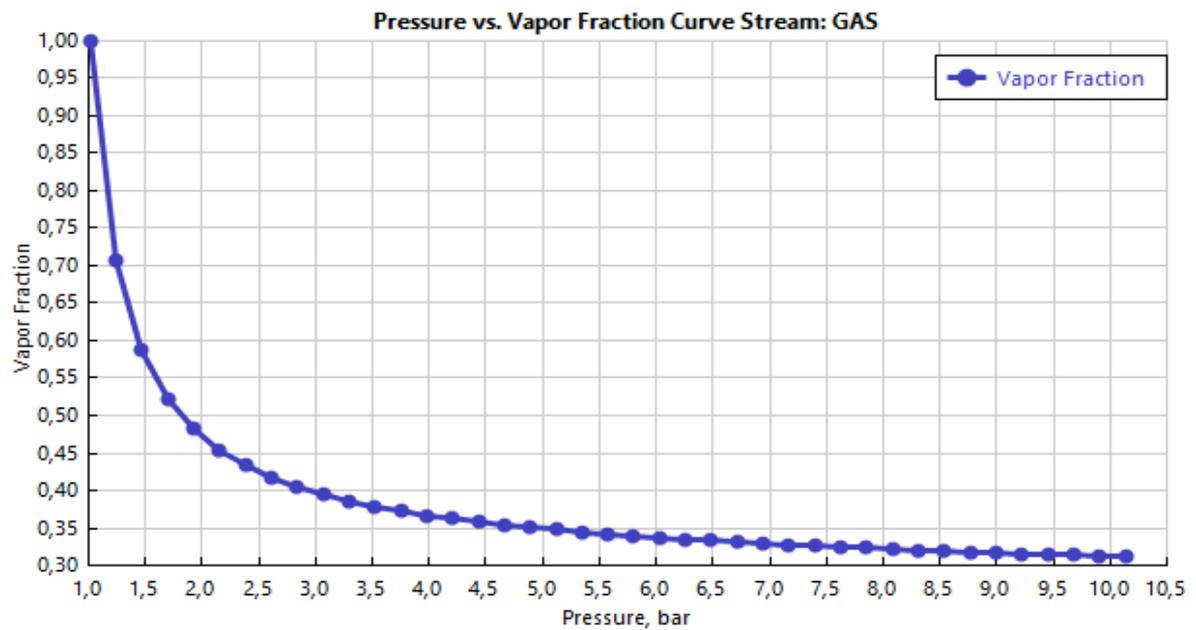
Tabela 15: Resultados para a simulação nas condições de operação 125 min, 30°C, 45g/2L (conclusão).

Substream: MIXED				
Total Flow [kmol/hr]	0,11102	0,00075	0,00454	0,10798
Total Flow [kg/hr]	2,00000	0,04500	0,09790	1,94712
Total Flow [l/min]	0,03337	0,00070	2,25368	0,03494
Temperature [°C]	20,00000	20,00000	90,00000	90,00000
Pressure [bar]	1,01325	1,01325	1,01325	1,01325
Vapor Frac	0,00000	0,00000	1,00000	0,00000
Liquid Frac	1,00000	1,00000	0,00000	1,00000
Solid Frac	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
Enthalpy [cal/mol]	-68350,64	-109280,00	-56229,53	-67072,44
Enthalpy [cal/gm]	-3794,04	-1819,68	-2606,19	-3719,54
Enthalpy [cal/sec]	-2107,80	-22,75	-70,88	-2011,77
Entropy [cal/mol-K]	-39,26	-58,47	-7,01	-35,33
Entropy [cal/gm-K]	-2,18	-0,97	-0,32	-1,96
Density [mol/cc]	0,06	0,02	0,00	0,05
Density [gm/cc]	1,00	1,08	0,00	0,93
Average [MW]	18,02	60,05	21,58	18,03
Liq Vol (60F) [l/min]	0,03	0,00	0,00	0,03

Fonte: O autor, 2020.

Foi possível obter o perfil da fração de vapor em função da pressão para a mistura de gás produzida pelo reator conforme apresentado no gráfico da Figura 17. Pode-se notar que a fração de vapor na fase gasosa diminui conforme o aumento da pressão do meio obtendo 35% de metano na forma de gás para 5 bar de pressão. Isto é característico do comportamento de gases com volatilidade alta como é caso do metano, onde a pressão de vapor é 760 mm Hg a uma temperatura de -161,5°C (vide Ficha de Informação de Produto Químico no Anexo 2).

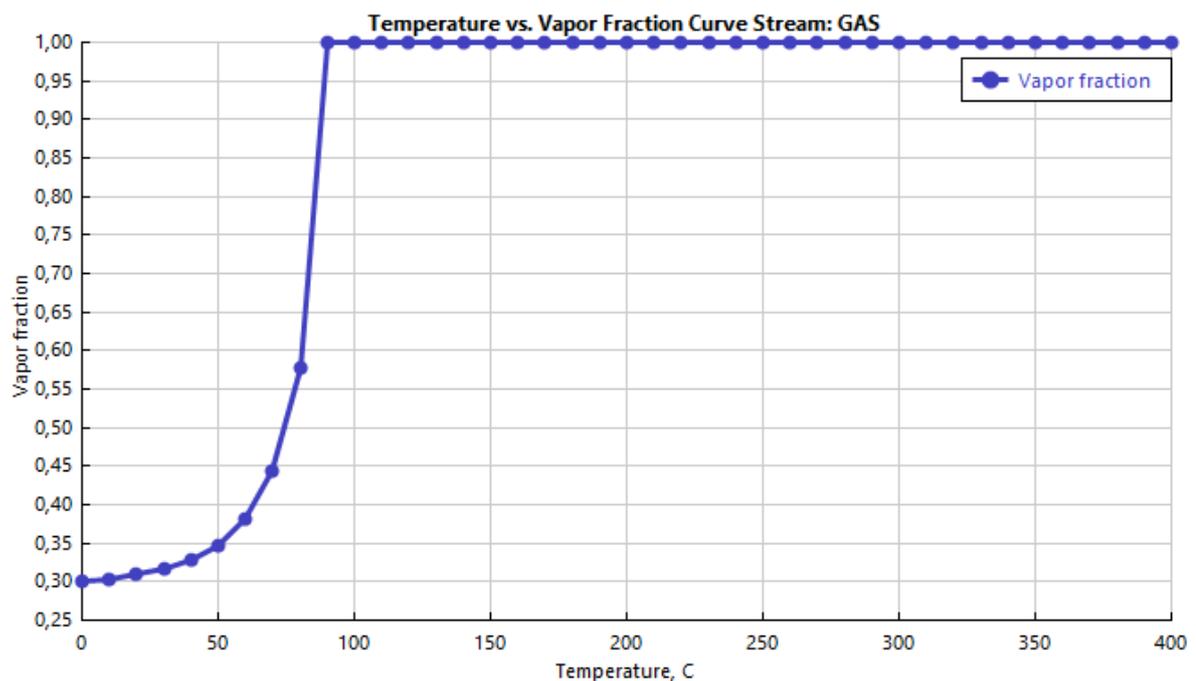
Figura 17: Perfil da fração de vapor em função da pressão para a mistura de gás produzida pelo reator.



Fonte: O autor, 2020.

Também foi possível plotar o gráfico da fração de vapor do gás em função da temperatura conforme pode ser visto na Figura 18. Percebe-se que a fração de vapor do gás aumenta conforme o aumento da temperatura.

Figura 18: Perfil da fração de vapor em função da temperatura para a mistura de gás produzida pelo reator.



Fonte: O autor, 2020.

Para condições de operação de 30°C de temperatura e com relação de substrato em fase aquosa de 45g/2L e um tempo de processo de 125 min, pode-se obter uma quantidade de energia gerada de 0,0446 kW. Fazendo-se o escalonamento para atender um grupo gerador com capacidade de 10kW/h, (40kW em uma batelada de 4 horas) é necessária uma quantidade de biomassa de 40 kg/h de bagaço de malte em meio aquoso. Este volume de bagaço de malte está dentro da realidade de cervejarias de pequeno porte e que poderiam utilizar o gás produzido para a geração de energia para atender o processo ou fábrica.

6.4.2 Simulação para otimização do processo

Buscou-se otimizar o processo de formação de metano na produção de biogás por bagaço de malte. Para isso, foi realizado um novo estudo para a variável temperatura. Conforme os resultados da simulação para o planejamento experimental da Tabela 7, pode-se verificar que a faixa de temperatura ideal se encontra acima dos valores analisados anteriormente. Devido a isso, foi montado um segundo planejamento experimental conforme mostrado na Tabela 16. O planejamento procurou seguir condições mais distantes da faixa de temperatura estudada na Tabela 7, sendo sugeridas os níveis de 50°C, 55°C e 60°C. Para as outras variáveis foram mantidos os mesmos valores.

Tabela 16: Planejamento fatorial para otimização do processo.

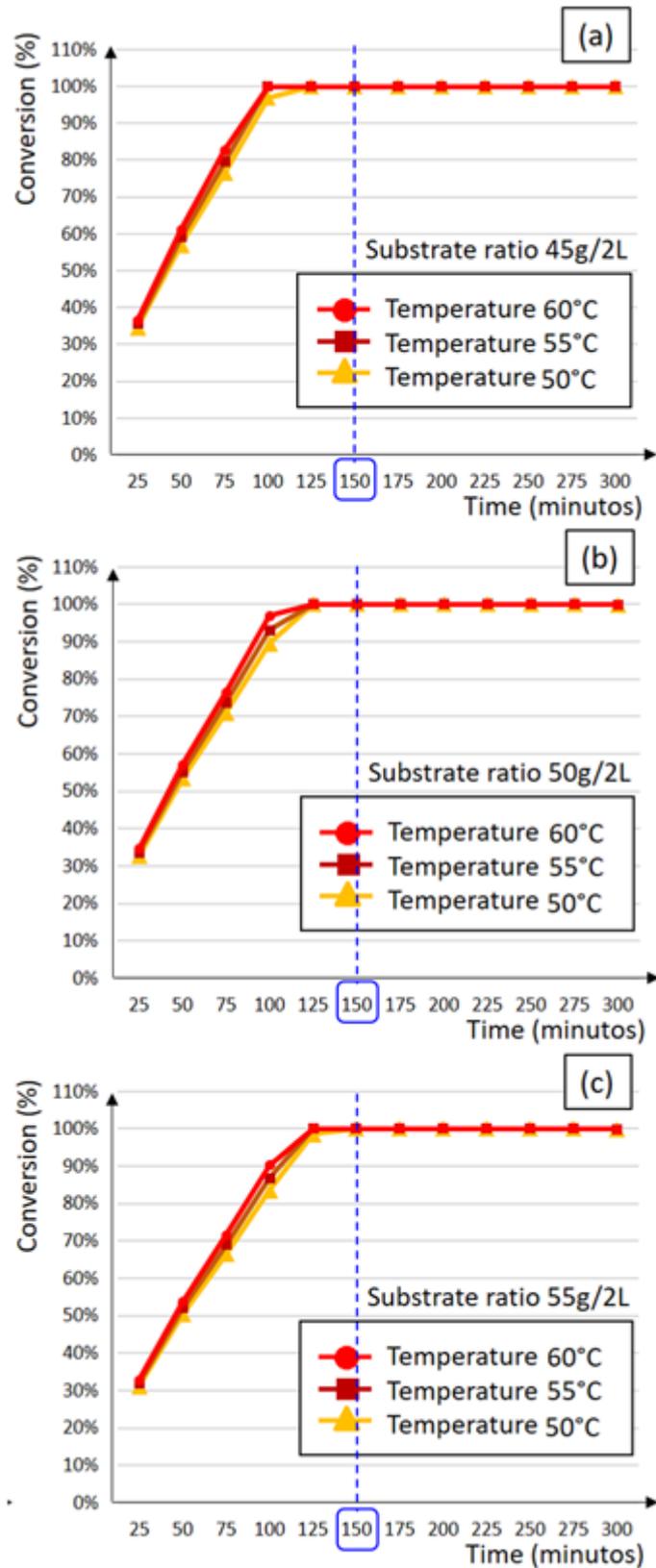
Variável	Nível mínimo (-)	Ponto central (0)	Nível máximo (+)
Tempo de processo	25min	75min	125min
Temperatura	50°C	55°C	60°C
Quantidade de substrato	45g/2L	50g/2L	55g/2L

Fonte: O autor, 2020.

Foi realizado uma análise de sensibilidade com simulações feitas para a conversão de substrato para gás metano em função do tempo de batelada baseados nos resultados anteriores. As condições de operação respeitaram o planejamento experimental mostrado na Tabela 16. A Figura 19 apresenta os perfis de conversão em gás para as condições de temperatura e relação de substrato.

Pode-se notar que a variável temperatura apresenta um grau de influência menor na formação de gás metano quando comparado aos resultados apresentados nos gráficos da Figura 11. Isto sugere que nesta nova faixa de temperatura o processo já se encontra no limite de sua operação ideal para a formação de gás. Também é possível observar que o estado estacionário é atingido com 150 minutos independentemente da relação de substrato em meio aquoso reforçando que a temperatura não apresenta mais influência no processo.

Figura 19: Perfil da conversão de substrato em função do tempo para várias temperaturas (20°C, 25°C e 30°C). Relação de substrato de 45g/2L (a), 50g/2L (b) e 55g/2L (c).



Fonte: O autor, 2020.

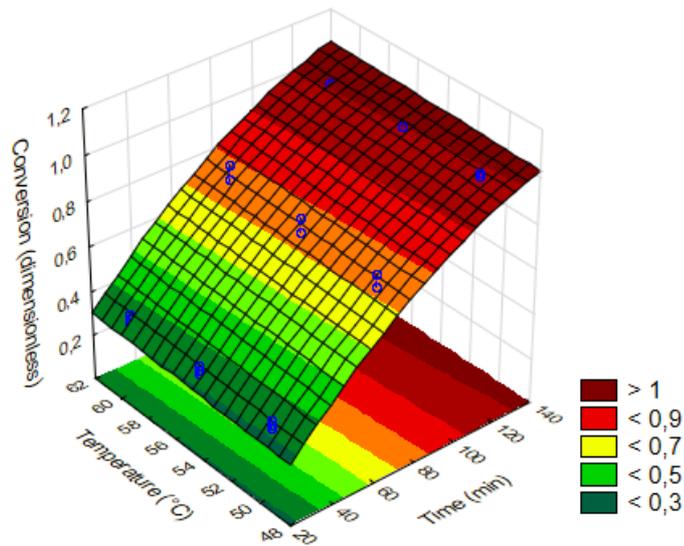
Os resultados do planejamento fatorial apresentado na Tabela 16 podem ser vistos na Tabela 17. Estes resultados foram inseridos no software Statistica® para se obter os gráficos de superfície e de Pareto conforme mostrados nas Figuras 20, 21, 22 e 23.

Tabela 17: Resultados do planejamento experimental otimizado.

Experimento	Tempo de processo	Temperatura	Relação de Substrato	Conversão
1	(-1) 25	(-1) 50°C	(-1) 45g / 2l	35%
2	(-1) 25	(-1) 50°C	(0) 50g / 2l	33%
3	(-1) 25	(-1) 50°C	(+1) 55g / 2l	31%
4	(-1) 25	(0) 55°C	(-1) 45g / 2l	36%
5	(-1) 25	(0) 55°C	(0) 50g / 2l	34%
6	(-1) 25	(0) 55°C	(+1) 55g / 2l	32%
7	(-1) 25	(+1) 60°C	(-1) 45g / 2l	37%
8	(-1) 25	(+1) 60°C	(0) 50g / 2l	35%
9	(-1) 25	(+1) 60°C	(+1) 55g / 2l	33%
10	(0) 75	(-1) 50°C	(-1) 45g / 2l	76%
11	(0) 75	(-1) 50°C	(0) 50g / 2l	71%
12	(0) 75	(-1) 50°C	(+1) 55g / 2l	66%
13	(0) 75	(0) 55°C	(-1) 45g / 2l	80%
14	(0) 75	(0) 55°C	(0) 50g / 2l	74%
15	(0) 75	(0) 55°C	(+1) 55g / 2l	69%
16	(0) 75	(+1) 60°C	(-1) 45g / 2l	83%
17	(0) 75	(+1) 60°C	(0) 50g / 2l	76%
18	(0) 75	(+1) 60°C	(+1) 55g / 2l	71%
19	(+1) 125	(-1) 50°C	(-1) 45g / 2l	100%
20	(+1) 125	(-1) 50°C	(0) 50g / 2l	100%
21	(+1) 125	(-1) 50°C	(+1) 55g / 2l	99%
22	(+1) 125	(0) 55°C	(-1) 45g / 2l	100%
23	(+1) 125	(0) 55°C	(0) 50g / 2l	100%
24	(+1) 125	(0) 55°C	(+1) 55g / 2l	100%
25	(+1) 125	(+1) 60°C	(-1) 45g / 2l	100%
26	(+1) 125	(+1) 60°C	(0) 50g / 2l	100%
27	(+1) 125	(+1) 60°C	(+1) 55g / 2l	100%

Fonte: O autor, 2020.

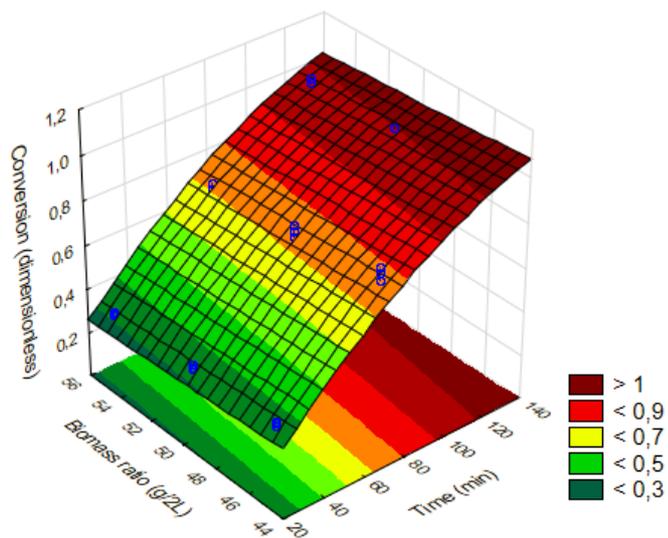
Figura 20: Gráfico de superfície para a Conversão (variável dependente) em função da Temperatura e Tempo de processo (variáveis independentes).



Fonte: O autor, 2020.

Nota-se que a temperatura possui uma influência mais branda na conversão. Já para o tempo de processo, a variável é mais expressiva com tendência a atingir um estado estacionário.

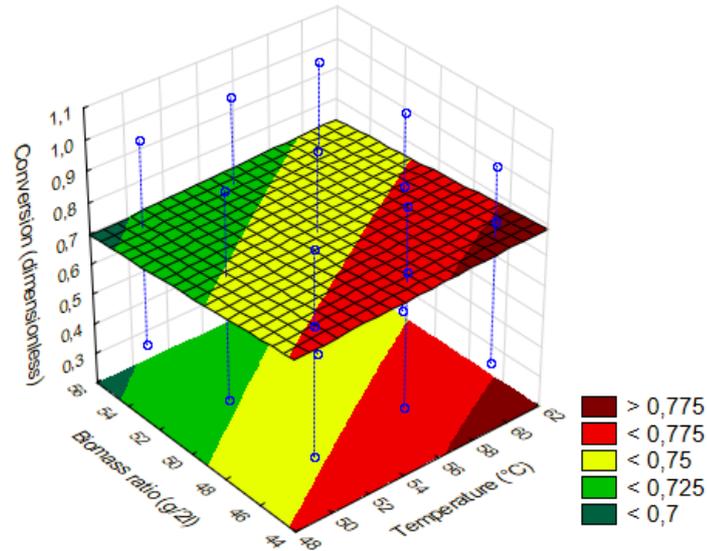
Figura 21: Gráfico de superfície para a Conversão (variável dependente) em função da Relação de substrato e Tempo de processo (variáveis independentes).



Fonte: O autor, 2020.

É possível notar que quanto maior for a Relação de biomassa, menor será a conversão. O tempo de processo segue o mesmo comportamento da Figura 20 com tendência a atingir um estado estacionário para a formação máxima de metano.

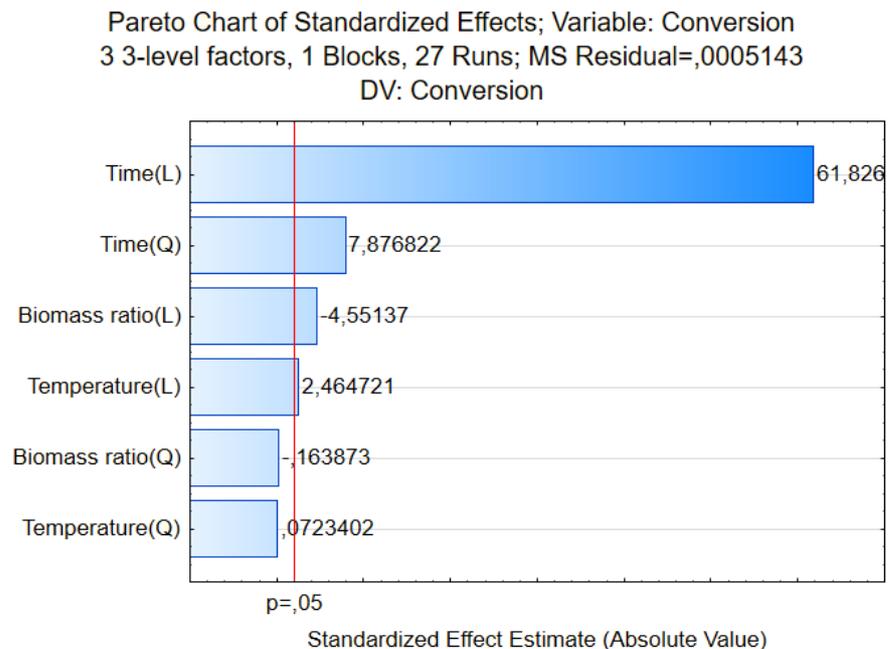
Figura 22: Gráfico de superfície para a Conversão (variável dependente) em função da Relação de substrato e Temperatura do processo (variáveis independentes).



Fonte: O autor, 2020.

É possível verificar que as variáveis Relação de biomassa e Temperatura possuem pouca influência na formação de gás metano. Isto é devido as condições de operação do processo se encontrarem próximas ao estado estacionário com máxima produção de gás.

Figura 23: Gráfico de Pareto para as variáveis de estudo.



Fonte: O autor, 2020.

Percebe-se que a principal variável que influencia o processo é o tempo, seguido da variável relação de substrato e temperatura. Todas essas variáveis sendo analisadas através de modelos lineares. É possível observar que para modelos quadráticos, bem como foi apresentado no Pareto anterior da Figura 15, apenas a variável tempo é representativa, porém desta vez a variável Temperatura chega a ultrapassar o limite de significância de 95% sendo mais expressiva nesta condição do que na anterior.

Devido ao resultado apresentado pelo planejamento experimental da Tabela 7, pode-se verificar que as condições de operação na faixa de 20°C até 30°C ainda não estão otimizadas sugerindo uma faixa maior de trabalho. Os resultados apresentados pelo planejamento experimental da Tabela 16 mostram que para a faixa de temperatura de 50°C até 60°C o processo já se encontra em condições em que as variáveis têm pouca influência no mesmo. Devido a isto, sugere-se trabalhar em uma faixa intermediária que seja entre 30°C e 50°C como condições ótimas de operação para a formação de gás metano.

A Tabela 18 mostra a faixa ótima de operação encontrada nas simulações deste trabalho comparadas com faixas de operação sugeridas em outros trabalhos da literatura.

Tabela 18: Comparação dos resultados com a literatura.

Referência	Condições ótimas de operação
O autor (2020)	Entre 30°C e 50°C
Fezzani; Ben Cheikh (2010)	35°C até 45°C
Zhang et al. (2016)	30°C até 40°C
Chae et al. (2008)	35°C até 37°C
Ward et al. (2008)	50°C até 55°C

Fonte: O autor, 2020.

Pela Tabela 18, nota-se que a faixa de Temperatura ótima simulada neste trabalho engloba a faixa de Temperatura de vários trabalhos encontrados na literatura. Isto implica que tanto a simulação como o modelo cinético proposto representam bem o comportamento da produção de biogás. Também foi observado que o tempo de processo é de fundamental importância, com taxa de formação lenta sugerindo um tempo longo para a produção de biogás.

7 CONCLUSÃO

Através dos resultados obtidos no trabalho pôde-se verificar que o bagaço de malte possui bom potencial para geração de biogás. A caracterização do inóculo e do substrato mostrou uma boa biodegradabilidade e uma boa eficiência na conversão de matéria orgânica em biogás. O comportamento das curvas de geração de gás ao longo do tempo mostrou uma boa produção de metano desde os primeiros dias de retenção. Através das análises realizadas, observou-se que a temperatura é um parâmetro de interferência no processo. Quanto maior for a temperatura, maior será a velocidade de formação de metano e mais volume de biogás será gerado, corroborando com a literatura. A influência da Temperatura pôde ser verificada no experimento de bancada, na modelagem cinética, na simulação e nos gráficos de superfície e de Pareto. Os parâmetros do modelo cinético foram $3,25 \times 10^{-5}$ [1/min] para a constante cinética e de $8,2484 \times 10^3$ [J/mol] para Energia de ativação.

A análise de sensibilidade realizada pela simulação indicou que a temperatura teve um fator importante para a formação de gás no final do processo. Já para a relação de substrato em meio aquoso, notou-se uma situação inversa a da temperatura que quanto maior for essa relação de substrato/água, menor será a conversão em gás mostrando que a quantidade de água usada no substrato interfere na produção do biogás.

O estudo através dos gráficos de superfície, indica que a faixa ótima de temperatura para a operação do processo foi entre 30°C e 50°C mostrando que acima deste valor, o processo se encontra tendendo ao estado estacionário. A análise feita pelo gráfico de Pareto mostrou que o tempo de processo é de fundamental importância indicando que quanto mais tempo o substrato ficar retido no biodigestor, maior será a quantidade de gás metano formada. Isto é devido a atividade do microrganismo poder ser mantida em trabalho. A relação de substrato/água é a segunda variável de grande importância seguida pela temperatura.

Verificou-se que uma quantidade de biomassa de 40 kg/h de bagaço de malte em meio aquoso pode produzir gás metano suficiente para atender um grupo gerador de energia elétrica com capacidade de 10kW/h. Este volume de bagaço de malte está dentro da realidade de cervejarias de pequeno porte onde poderiam utilizar o gás produzido para a geração de energia. Esta energia consumida na indústria pela geração de biogás ajudaria a reduzir o impacto ambiental de forma economicamente favorável.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 10004 – Resíduos sólidos Classificação. Rio de Janeiro, 2004.

APHA, (2005) – Standard Methods. 21º Edição. American Public Health Association, Washington, BC. 2005.

ALVES, I.R.F.S. Análise experimental do potencial de geração de biogás em resíduos sólidos urbanos. Dissertação de Mestrado. Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Recife-PE. 117p. UFPE, 2008.

AMARAL, C. M. C., *et al.* Biodigestão anaeróbia de dejetos de bovinos leiteiros submetidos a diferentes tempos de retenção hidráulica. *Ciência Rural*, Santa Maria, v.34, n.6, p.1897-1902, nov-dez, 2004

ANDRADE, R. R. Modelagem cinética do processo de produção de etanol a partir de hidrolisado enzimático de bagaço de cana-de-açúcar concentrado com melão considerando reciclo de células. 2012. 284 f. Tese de doutorado – Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2012.

ARANTES, M K.; ALVES, H.J.; SEQUINEL, R.; DA SILVA, E. A. Treatment of brewery wastewater and its use for biological production of methane and hydrogen. *INTERNATIONAL JOURNAL OF HYDROGEN ENERGY*, v. 42, p. 26243-26256, 2017.

ARRUDA, M. H, *et al.* Dimensionamento de Biodigestor para Geração de Energia Alternativa. *Revista científica de agronomia da Faculdade de Agronomia e engenharia florestal*, Garça, ano I. nº 2, dez. 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE BEBIDAS - ABRABE. Categoria de mercado: fermentados-cerveja. 2017. Disponível em: <<http://www.abrabe.org.br/categorias/>>. Acesso em: 24 nov. 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS CERVEJARIAS ARTESANAIS – ABRACERVA. Setor cervejeiro. 2018. Disponível em: <<http://abracerva.com.br/em-cinco-meses-brasil-registra-novas-cervejariasartesanais/>>. Acesso em: 25 nov. 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA CERVEJEIRA - CERVBRAZIL. Setor econômico. Disponível em <<http://www.cervbrasil.org.br/paginas/index.php?page=dados-do-setor>>. Acesso em: 01 mai. 2019.

BANCO CENTRAL DO BRASIL – Relatório FOCUS (2018). Disponível em <<https://www.bcb.gov.br/publicacoes/focus>>. Acesso em 24 nov. 2019.

BARROS NETO, B.; SCARMINIO, I. S.; BRUNS, R. E. Como fazer experimentos. Pesquisa e Desenvolvimento na Ciência e na Indústria. Campinas. Editora Bookman, 4. Ed. 2010.

BERTONCINI, E. I. Dejetos da suinocultura - desafios para o uso agrícola. Pesquisa & Tecnologia, Campinas, v.8, n.2, p.1-10, 2011.

BEHESHTI, S. M.; GHASSEMI, H.; SHAHSAVAN-MARKADEH, R. Process simulation of biomass gasification in a bubbling fluidized bed reactor. Energy Conversion and Management, v. 94, p. 345-352, 2015.

BLEY JR., C. Biogás: a energia invisível. 2º ed. – São Paulo: CIBiogás; Foz do Iguaçu: ITAIPU Binacional, 2015.

BOYCE, William E; DIPRIMA, Richard C., Equações Diferenciais Elementares e Problemas de Valores de Contorno. 8 Ed. Rio de Janeiro: LTC 2006;

BOUCKLEY, B. Mintel: big brewers should target non-alcoholic beer sweet spot in Europe. 2015. Disponível em: <<http://www.beveragedaily.com/Markets/Mintel-Big-brewers-should-target-non-alcoholic-beer-sweet-spot>>. Acesso em: 04 mai. 2019.

BORBA, S. M. Análises de modelos de geração de gases em aterros sanitários: estudos de caso Rio de Janeiro. Dissertação de Mestrado. Rio de Janeiro: COOPE/UFRJ, 2006.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Decreto nº 6.871, de 04 de junho de 2009. Regulamenta a Lei nº 8.918, de 14 julho de 1994. Dispõe sobre a padronização, a classificação, o registro, a inspeção, a produção e a fiscalização de bebidas. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 5 jun. 2009. Disponível em: <http://gpex.aduaneiras.com.br/gpex/gpex.dll/infobase/atos/decreto/decreto6871_09/dec%206871_09_01.pdf>. Acesso em: 05 mai. 2019.

BRUST, Luís Armando; ARAGÃO, Ana Paula; BEZERRA Jr, Pedro; GALVÃO, Alexandre; FRANÇA, Ticiane; GRAÇA, Flávio e PEIXOTO, Paulo. Enfermidades em Bovinos Associadas ao Consumo de Resíduos de Cervejaria. *Pesquisa Veterinária Brasileira*, v. 35, n. 12, p. 956–964, 2015.

CAVINATO, C.; DA ROS, C.; PAVAN, P.; BOLZONELLA, D. Influence of temperature and hydraulic retention on the production of volatile fatty acids during anaerobic fermentation of cow manure and maize silage. *Bioresource technology*, v. 223, p. 59-64, 2017.

CASTILLO M., E. F.; CRISTANCHO, D. E.; VICTOR ARELLANO, A. Study of the operational conditions for anaerobic digestion of urban solid wastes. *Waste Management*, v. 26, n. 5, p. 546–556, jan. 2006.

CHAE, K. J.; JANG, A. M.; YIM, S. K.; KIN, I. S. The effects of digestion temperature and temperature shock on the biogas yields from the mesophilic anaerobic digestion of swine manure. *Bioresource Technology*, v. 99, n. 1, p. 1–6, 2008.

CH. PICHASA; POMONIS, P.; PETRAKIS, D.; LADAVOS, A. Kinetic study of the catalytic dry reforming of CH₄ with CO₂ over La_{2-x}Sr_xNiO₄ perovskite-type oxides. *Applied Catalysis A: General Volume 386, Issues 1–2, Pages 116-123*. 2010.

CHERNEY, Y. *Overview of Brewing Science and Technology*. San Diego University of California San Diego, 2017.

COMASTRI FILHO, J. A. *Biogás: independência energética do Pantanal Mato-Grossense*. Corumbá: EMBRAPA-UEPAE Corumba, 1981. 53 p. il.

COMPANHIA ENERGÉTICA DE MINAS GERAIS. Alternativas Energéticas: uma visão Cemig. Belo Horizonte: Cemig, 2012.

CORTEZ, L. A. B.; LORA, E. E. S.; GÓMEZ, E. O. Biomassa para energia. Campinas: UNICAMP, 2008.

COSTA, R.H.K. Produção de cerveja com baixo teor alcoólico. 2016. 84 p. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Escola de Engenharia de Lorena, Universidade de São Paulo, Lorena, 2016.

CUNICO, M. W. M.; CUNICO, M. M.; MIGUEL, O. G.; ZAWADZKI, S. F.; PERALTA-ZAMORA, P.; VOLPATO, N.; Planejamento Fatorial: uma ferramenta estatística valiosa para a definição de parâmetros experimentais empregados na pesquisa científica. Visão Acadêmica, v. 9, p. 23-32, 2008.

DEGANUTTI, Roberto, et al. Biodigestores rurais: modelo indiano, chinês e batelada. Bauru: Departamento de Artes e Representação Gráfica, FAAC - Faculdade de Arquitetura, Artes e Comunicação, UNESP - Universidade Estadual Paulista Julio de Mesquita Filho, Bauru, 2002.

DEUBLEINB, D., STEINHAUSER, A. Biogas from waste and renewable resources, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 2008 368p.

DIACU, Florin. Introdução a Equações Diferenciais: Teoria e Aplicáveis. 1a ed. Rio de Janeiro: LTC, 2004.

DHAMODHARAN, K.; KUMAR, V.; KALAMDHAD, A. S. Effect of different livestock dung as inoculum on food waste anaerobic digestion and its kinetics. Bioresource technology, v. 6, n. 180, p. 237–241, 2015.

FAGBOHUNGBE, M. O.; DODD, I. C.; HERBERT, B. M. J.; LI, H.; RICKETTS, L.; SEMPLE, K. T. High solid anaerobic digestion: Operational challenges and possibilities. Environmental Technology & Innovation, v. 4, p. 268–284, 2015. 234p.

FEZZANI, B.; BEN CHEIKH, R. Two-phase anaerobic co-digestion of olive mill wastes in

semi-continuous digesters at mesophilic temperature. *Bioresource technology*, v. 101, n. 6, p. 1628–34, mar. 2010.

FOGLER, H.S., 1999. *Elements of Chemical Reaction Engineering*. Prentice Hall Press, New Jersey.

HANSEN T. L.; SCHMIDT J. E.; ANGELIDAKI I.; MARCA E., LA COUR JANSEN J.; MOSBAEK H.; CHRISTENSEN T. H. (2004). Method for determination of methane potential of solid organic waste. *Waste Management*, v. 24, p. 393-400, 2004.

IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística). Sistema de Recuperação Automática – SIDRA. 2017. Disponível em: < <https://sidra.ibge.gov.br/tabela/6505#resultado> > Acesso: 24 nov. 2019.

INCROPERA, Frank P.; WITT, David P. *Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa*. Editora Ltc. 5° Edição. 2003.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. *World Energy Balances: Overview*. [S.l.]. 2017.

KHAN, I. U. et al. Biogas as a renewable energy fuel – A review of biogas upgrading, utilisation and storage. *Energy Conversion and Management*, v. 150, p. 63 277-294, Agosto 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2017.08.035>>. Acesso em: 01 mai. 2019.

KARLSSON, T. *Manual básico de biogás / Tommy Karlsson [et al.]*. - Lajeado: Ed. da Univates, 2014.

KONRAD, O., BEZAMA, A. B., PRADE, T., BACKES, G. M., OECHSNER, H. (2016). Enhancing the analytical capacity for biogas development in Brazil: Assessment of an original measurement system for low biogas flow rates out of agricultural biomass residues, *Journal of the Brazilian Association of Agricultural Engineering*, 36 (5), pp.792-798. 2016.

KOTHARI, R.; KUMAR, V.; PATHAK, V.V.; TYAGI, V.V.; Sequential hydrogen and methane production with simultaneous of dairy industry wastewater: Bioenergy profit approach. *International Journal of Hydrogen Energy*. Available online, 2016.

LEVENSPIEL, OCTAVE., 1999. *Chemical Reaction Engineering*, 3rd edition. John Wiley and Sons, New York.

LIMA, U. A. *Matérias-primas dos Alimentos*. São Paulo: Ed Blucher, 2010. 402p.

LIMA JR, S. R.; PAES, J. L.; ALVES, T. B. S. Efeito da adição de inóculo no processo de biodigestão anaeróbica de dejetos de bovino. *Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia. Rev. Bras. Agroecologia*, v.2, n.1, fev, 2018.

MAPA. Ministério da agricultura, abastecimento e pecuária. *Anuário da cerveja*. 2019. Disponível em: <<https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/inspecao/produtos-vegetal/publicacoes/anuario-da-cerveja-2019/view>> Acesso em: 29 jul. 2020.

MORAES, B. S.; ZAIAT, M.; BONOMI, A. Anaerobic digestion of vinasse from sugarcane ethanol production in Brazil_ Challenges and perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 44, p. 888–903, 2015.

ONOFRE, S. B.; BERTOLDO, I. C.; ABATTI, D.; REFOSCO, D. Physiochemical Characterization of the Brewers' Spent Grain from a Brewery Located in the Southwestern Region of Parana - Brazil. *International Journal of Environment, Agriculture and Biotechnology (IJEAB)*, v. 2, p. 277-280, 2017.

PASSOS, F. et al. Anaerobic co-digestion of coffee husks and microalgal biomass after thermal hydrolysis. *Bioresource Technology*, v. 253, p. 49–54, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.12.071>>. Acesso em: 20 abr. 2019.

PORTAL BRASIL. Portal Brasil, 2017. Disponível em: <<http://www.brasil.gov.br/economia-e-emprego/2017/08/brasil-e-o-terceiro-no-ranking-de-producao-mundial-de-cerveja>>. Acesso em: 20 abr. 2019.

ROHSTOFFE, Fachagentur Nachwachsende. Guia Prático do Biogás: Geração e Utilização. 5ª edição, Gülzow, Alemanha, 2013.

SANTOS, M. S.; RIBEIRO, F. M. Cervejas e Refrigerantes: Série P+L. São Paulo: CETESB, 2005.

SCHIRMER, W. N.; JUCÁ, J. F. T.; SCHULER, A. R. P.; HOLANDA, S.; JESUS, L. L. Methane production in anaerobic digestion of organic waste from Recife (Brazil) Landfill: evaluation in refuse of different ages. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, v. 31, n. 2, p. 373-384, 2014.

SILVA, M. O.S. A. Análises físico-químicas para controle das estações de tratamento de esgotos. São Paulo, Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental - CETESB. 1977.

SOUZA, T. P. C. Produção de biodiesel via rota etílica por destilação reativa, extrativa e absorviva: uma comparação experimental e computacional. 2015. Tese de doutorado (Engenharia Química) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2015.

TROMMER, D.; HIRSCHB, A.; STEINFEL, D. Kinetic investigation of the thermal decomposition of CH₄ by direct irradiation of a vortex-flow laden with carbon particles. *International Journal of Hydrogen Energy* Volume 29, Pages 627-633. 2004.

TRZCINSKI, A. P.; STUCKEY, D. C. Treatment of municipal solid waste leachate using a submerged anaerobic membrane bioreactor at mesophilic and psychrophilic temperatures: Analysis of recalcitrants in the permeate using GC-MS. *Water Research*, v. 44, n. 3, p. 671–680, 2010.

VADIM D.; KNYAZEVA; ÁKOS BENCSURA; STANISLAV I.; STOLIAROV; IRENE R. SLAGLE. Kinetics of the $C_2H_3 + H_2 \rightleftharpoons H + C_2H_4$ and $CH_3 + H_2 \rightleftharpoons H + CH_4$ Reactions. ACS Publications. 1996.

WHO - International Reference Center for wastes disposal. Methods of analysis of sewage sludge solid wastes and compost. Switzerland. 1978.

XU, F., LI, Y., GE, X., YANG, L., LI, Y. (2018). Anaerobic digestion of food waste – Challenges and opportunities, *Bioresource Technology*, 247, pp. 1047-1058.

ZHANG, P.; ZENG, G.; ZHANG, G.; LI, Y.; ZHANG, B.; FAN, M. Anaerobic co-digestion of biosolids and organic fraction of municipal solid waste by sequencing batch process. *Fuel Processing Technology*, v. 89, n. 4, p. 485-489, 2008.

ZHANG, Q.; HU, J.; LEE, D. Biogas from anaerobic digestion processes: Research updates. *Renewable Energy*, 2016.

ZHAOXIA, L.; JINLONG, Y.; DAN, S.; CHENG, D. Thechniques optimization of combined enzymatic hydrolysis on brewers' spent grain from Novozymes. *Journal of Life Sciences*, v. 6, p. 1232-1236, 2012.

ZHOU, M. et al. Enhanced volatile fatty acids production from anaerobic fermentation of food waste: A mini-review focusing on acidogenic metabolic pathways. *Bioresource Technology*, 2017.

ZILOTTI, Hécio Alexandre Rodrigues. Potencial de produção de biogás em uma estação de tratamento de esgoto de cascavel para a geração de energia elétrica. *Dissertação - Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu da Universidade Estadual do Oeste do Paraná - UNIOESTE. Cascavel/PR. 2012.*

9 ANEXOS

ANEXO 1

Henan Hanwei Electronics Co., Ltd

www.hwsensor.com

MQ-4 Semiconductor Sensor for Natural Gas

Sensitive material of MQ-4 gas sensor is SnO_2 , which with lower conductivity in clean air. When the target combustible gas exist, The sensor's conductivity is more higher along with the gas concentration rising. Please use simple electrocircuit, Convert change of conductivity to correspond output signal of gas concentration.

MQ-4 gas sensor has high sensitivity to Methane, also to Propane and Butane. The sensor could be used to detect different combustible gas, especially Methane, it is with low cost and suitable for different application.

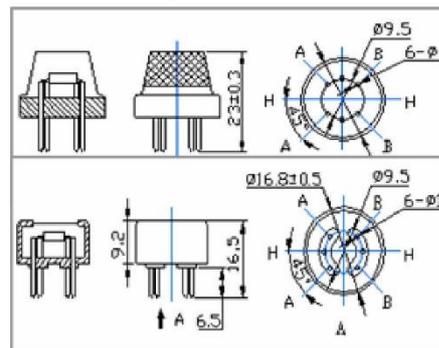
Character

- * Good sensitivity to Combustible gas in wide range
- * High sensitivity to Natural gas
- * Long life and low cost
- * Simple drive circuit

Application

- * Domestic gas leakage detector
- * Industrial Combustible gas detector
- * Portable gas detector

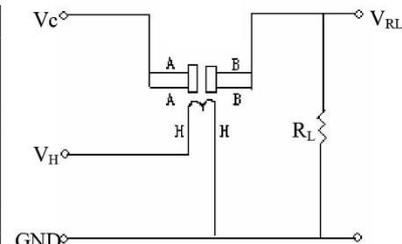
Configuration



Technical Data

Model No.	MQ-4	
Sensor Type	Semiconductor	
Standard Encapsulation	Bakelite (Black Bakelite)	
Detection Gas	Natural gas/ Methane	
Concentration	300-10000ppm (Natural gas / Methane)	
Circuit	Loop Voltage V_c	$\leq 24V$ DC
	Heater Voltage V_H	$5.0V \pm 0.2V$ AC or DC
	Load Resistance R_L	Adjustable
Character	Heater Resistance R_H	$31\Omega \pm 3\Omega$ (Room Tem.)
	Heater consumption P_H	$\leq 900mW$
	Sensing Resistance R_s	$2K\Omega - 20K\Omega$ (in 5000ppm CH_4)
	Sensitivity S	$R_s(\text{in air})/R_s(5000\text{ppm } \text{CH}_4) \geq 5$
	Slope α	$\leq 0.6(R_{5000\text{ppm}}/R_{3000\text{ppm}} \text{CH}_4)$
Condition	Tem. Humidity	$20^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}; 65\% \pm 5\% \text{RH}$
	Standard test circuit	$V_c: 5.0V \pm 0.1V;$ $V_H: 5.0V \pm 0.1V$
	Preheat time	Over 48 hours

Basic test loop



The above is basic test circuit of the sensor. The sensor need to be put 2 voltage, heater voltage (V_H) and test voltage (V_C). V_H used to supply certified working temperature to the sensor, while V_C used to detect voltage (V_{RL}) on load resistance (R_L) whom is in series with sensor. The sensor has light polarity, V_c need DC power. V_C and V_H could use same power circuit with precondition to assure performance of sensor. In order to make the sensor with better performance, suitable R_L value is needed:
Power of Sensitivity body (P_s):

$$P_s = V_c^2 \times R_s / (R_s + R_L)^2$$

Resistance of sensor(R_s): $R_s = (V_c / V_{RL} - 1) \times R_L$

Sensitivity Characteristics

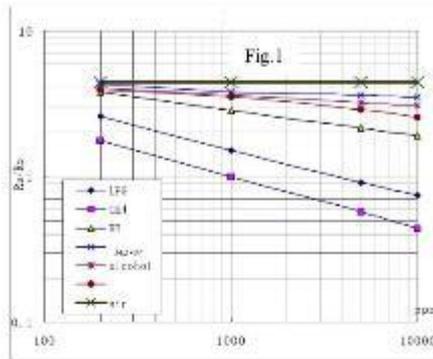


Fig.1 shows the typical sensitivity characteristics of the MQ-4, ordinate means resistance ratio of the sensor (R_s/R_0), abscissa is concentration of gases. R_s means resistance in different gases, R_0 means resistance of sensor in 1000ppm Methane. All test are under standard test conditions.

P.S.: Sensitivity to smoke is ignite 10pcs cigarettes in $8m^3$ room, and the output equals to 200ppm Methane

Influence of Temperature/Humidity

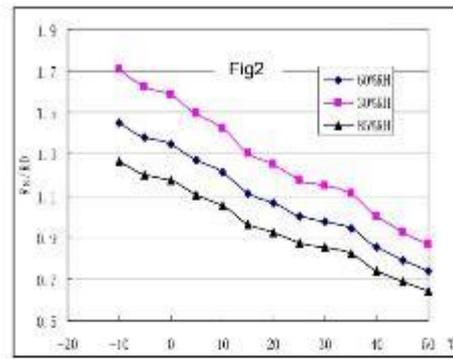
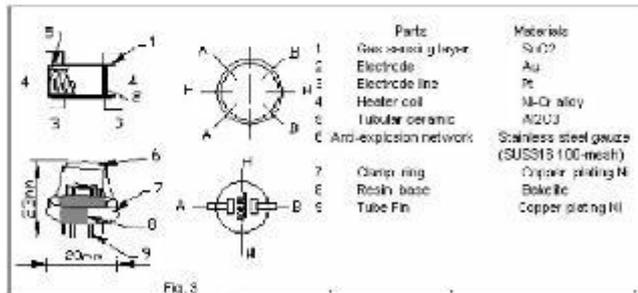


Fig.2 shows the typical temperature and humidity characteristics. Ordinate means resistance ratio of the sensor (R_s/R_0), R_s means resistance of sensor in 1000ppm Methane under different tem. and humidity. R_0 means resistance of the sensor in environment of 1000ppm Methane, 20°C/65%RH

Structure and configuration



Structure and configuration of MQ-4 gas sensor is shown as Fig. 3, sensor composed by micro AL₂O₃ ceramic tube, Tin Dioxide (SnO₂) sensitive layer, measuring electrode and heater are fixed into a crust made by plastic and stainless steel net. The heater provides necessary work conditions for work of sensitive components. The enveloped MQ-4 have 6 pin, 4 of them are used to fetch signals, and other 2 are used for providing heating current.

Notification**1 Following conditions must be prohibited****1.1 Exposed to organic silicon steam**

Organic silicon steam cause sensors invalid, sensors must be avoid exposing to silicon bond, fixture, silicon latex, putty or plastic contain silicon environment

1.2 High Corrosive gas

If the sensors exposed to high concentration corrosive gas (such as H_2S , SO_x , Cl_2 , HCl etc), it will not only result in corrosion of sensors structure, also it cause sincere sensitivity attenuation.

1.3 Alkali, Alkali metals salt, halogen pollution

The sensors performance will be changed badly if sensors be sprayed polluted by alkali metals salt especially brine, or be exposed to halogen such as fluorin.

1.4 Touch water

Sensitivity of the sensors will be reduced when splattered or dipped in water.

1.5 Freezing

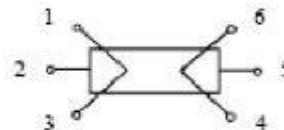
Do avoid icing on sensor's surface, otherwise sensor would lose sensitivity.

1.6 Applied voltage higher

Applied voltage on sensor should not be higher than stipulated value, otherwise it cause down-line or heater damaged, and bring on sensors' sensitivity characteristic changed badly.

1.7 Voltage on wrong pins

For 6 pins sensor, if apply voltage on 1、3 pins or 4、6 pins, it will make lead broken, and without signal when apply on 2、4 pins

**2 Following conditions must be avoided****2.1 Water Condensation**

Indoor conditions, slight water condensation will effect sensors performance lightly. However, if water condensation on sensors surface and keep a certain period, sensor' sensitivity will be decreased.

2.2 Used in high gas concentration

No matter the sensor is electrified or not, if long time placed in high gas concentration, it will affect sensors characteristic.

2.3 Long time storage

The sensors resistance produce reversible drift if it's stored for long time without electrify, this drift is related with storage conditions. Sensors should be stored in airproof without silicon gel bag with clean air. For the sensors with long time storage but no electrify, they need long aging time for stbilty before using.

2.4 Long time exposed to adverse environment

No matter the sensors electrified or not, if exposed to adverse environment for long time, such as high humidity, high temperature, or high pollution etc, it will effect the sensors performance badly.

2.5 Vibration

Continual vibration will result in sensors down-lead response then repture. In transportation or assembling line, pneumatic screwdriver/ultrasonic welding machine can lead this vibration.

2.6 Concussion

If sensors meet strong concussion, it may lead its lead wire disconnected.

2.7 Usage

For sensor, handmade welding is optimal way. If use wave crest welding should meet the following conditions:

2.7.1 Soldering flux: Rosin soldering flux contains least chlorine

2.7.2 Speed: 1-2 Meter/ Minute

2.7.3 Warm-up temperature: $100 \pm 20^\circ C$

2.7.4 Welding temperature: $250 \pm 10^\circ C$

2.7.5 1 time pass wave crest welding machine

If disobey the above using terms, sensors sensitivity will be reduced.

ANEXO 2

**DS18B20****Programmable Resolution
1-Wire Digital Thermometer****DESCRIPTION**

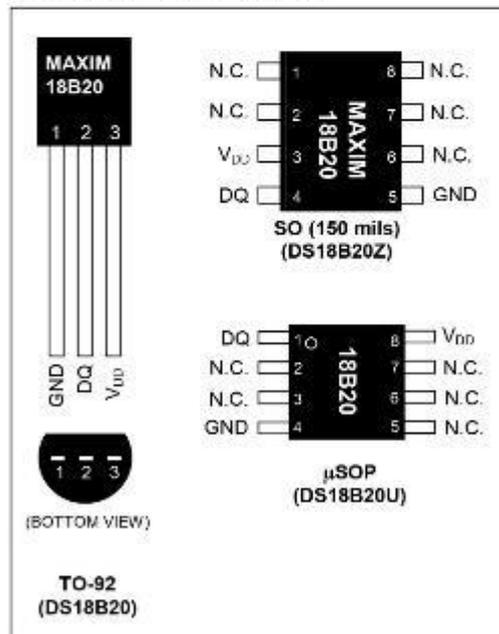
The DS18B20 digital thermometer provides 9-bit to 12-bit Celsius temperature measurements and has an alarm function with nonvolatile user-programmable upper and lower trigger points. The DS18B20 communicates over a 1-Wire bus that by definition requires only one data line (and ground) for communication with a central microprocessor. It has an operating temperature range of -55°C to $+125^{\circ}\text{C}$ and is accurate to $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ over the range of -10°C to $+85^{\circ}\text{C}$. In addition, the DS18B20 can derive power directly from the data line ("parasite power"), eliminating the need for an external power supply.

Each DS18B20 has a unique 64-bit serial code, which allows multiple DS18B20s to function on the same 1-Wire bus. Thus, it is simple to use one microprocessor to control many DS18B20s distributed over a large area. Applications that can benefit from this feature include HVAC environmental controls, temperature monitoring systems inside buildings, equipment, or machinery, and process monitoring and control systems.

FEATURES

- Unique 1-Wire® Interface Requires Only One Port Pin for Communication
- Each Device has a Unique 64-Bit Serial Code Stored in an On-Board ROM
- Multidrop Capability Simplifies Distributed Temperature-Sensing Applications
- Requires No External Components
- Can Be Powered from Data Line; Power Supply Range is 3.0V to 5.5V
- Measures Temperatures from -55°C to $+125^{\circ}\text{C}$ (-67°F to $+257^{\circ}\text{F}$)
- $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ Accuracy from -10°C to $+85^{\circ}\text{C}$
- Thermometer Resolution is User Selectable from 9 to 12 Bits
- Converts Temperature to 12-Bit Digital Word in 750ms (Max)

- User-Definable Nonvolatile (NV) Alarm Settings
- Alarm Search Command Identifies and Addresses Devices Whose Temperature is Outside Programmed Limits (Temperature Alarm Condition)
- Available in 8-Pin SO (150 mils), 8-Pin μSOP , and 3-Pin TO-92 Packages
- Software Compatible with the DS1822
- Applications Include Thermostatic Controls, Industrial Systems, Consumer Products, Thermometers, or Any Thermally Sensitive System

PIN CONFIGURATIONS

1-Wire is a registered trademark of Maxim Integrated Products, Inc.

For pricing, delivery, and ordering information, please contact Maxim Direct at 1-888-629-4642, or visit Maxim's website at www.maximintegrated.com.

REV: 042208

ORDERING INFORMATION

PART	TEMP RANGE	PIN-PACKAGE	TOP MARK
DS18B20	-55°C to +125°C	3 TO-92	18B20
DS18B20+	-55°C to +125°C	3 TO-92	18B20
DS18B20/T&R	-55°C to +125°C	3 TO-92 (2000 Piece)	18B20
DS18B20+/T&R	-55°C to +125°C	3 TO-92 (2000 Piece)	18B20
DS18B20-SL/T&R	-55°C to +125°C	3 TO-92 (2000 Piece)*	18B20
DS18B20-SL+/T&R	-55°C to +125°C	3 TO-92 (2000 Piece)*	18B20
DS18B20U	-55°C to +125°C	8 μ SOP	18B20
DS18B20U1	-55°C to +125°C	8 μ SOP	18B20
DS18B20U/T&R	-55°C to +125°C	8 μ SOP (3000 Piece)	18B20
DS18B20U1/T&R	-55°C to +125°C	8 μ SOP (3000 Piece)	18B20
DS18B20Z	-55°C to +125°C	8 SO	DS18B20
DS18B20Z+	-55°C to +125°C	8 SO	DS18B20
DS18B20Z/T&R	-55°C to +125°C	8 SO (2500 Piece)	DS18B20
DS18B20Z+/T&R	-55°C to +125°C	8 SO (2500 Piece)	DS18B20

+Denotes a lead-free package. A '+' will appear on the top mark of lead-free packages.

T&R = Tape and reel.

*TO-92 packages in tape and reel can be ordered with straight or formed leads. Choose 'SL' for straight leads. Bulk TO-92 orders are straight leads only.

PIN DESCRIPTION

PIN			NAME	FUNCTION
SO	μ SOP	TO-92		
1, 2, 6, 7, 8	2, 3, 5, 6, 7	—	N.C.	No Connection
3	8	3	V _{DD}	Optional V _{DD} . V _{DD} must be grounded for operation in parasite power mode.
4	1	2	DQ	Data Input/Output. Open-drain 1-Wire interface pin. Also provides power to the device when used in parasite power mode (see the <i>Powering the DS18B20</i> section.)
5	4	1	GND	Ground

OVERVIEW

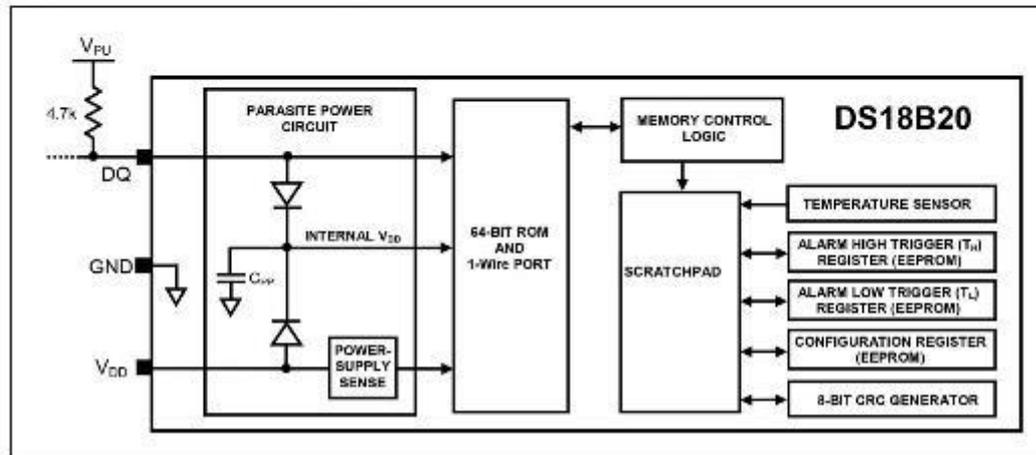
Figure 1 shows a block diagram of the DS18B20, and pin descriptions are given in the *Pin Description* table. The 64-bit ROM stores the device's unique serial code. The scratchpad memory contains the 2-byte temperature register that stores the digital output from the temperature sensor. In addition, the scratchpad provides access to the 1-byte upper and lower alarm trigger registers (T_U and T_L) and the 1-byte configuration register. The configuration register allows the user to set the resolution of the temperature-to-digital conversion to 9, 10, 11, or 12 bits. The T_U, T_L, and configuration registers are nonvolatile (EEPROM), so they will retain data when the device is powered down.

The DS18B20 uses Maxim's exclusive 1-Wire bus protocol that implements bus communication using one control signal. The control line requires a weak pullup resistor since all devices are linked to the bus via a 3-state or open-drain port (the DQ pin in the case of the DS18B20). In this bus system, the microprocessor (the master device) identifies and addresses devices on the bus using each device's unique 64-bit code. Because each device has a unique code, the number of devices that can be addressed on one

bus is virtually unlimited. The 1-Wire bus protocol, including detailed explanations of the commands and “time slots,” is covered in the *1-Wire Bus System* section.

Another feature of the DS18B20 is the ability to operate without an external power supply. Power is instead supplied through the 1-Wire pullup resistor via the DQ pin when the bus is high. The high bus signal also charges an internal capacitor (C_{PP}), which then supplies power to the device when the bus is low. This method of deriving power from the 1-Wire bus is referred to as “parasite power.” As an alternative, the DS18B20 may also be powered by an external supply on V_{DD} .

Figure 1. DS18B20 Block Diagram



OPERATION—MEASURING TEMPERATURE

The core functionality of the DS18B20 is its direct-to-digital temperature sensor. The resolution of the temperature sensor is user-configurable to 9, 10, 11, or 12 bits, corresponding to increments of 0.5°C, 0.25°C, 0.125°C, and 0.0625°C, respectively. The default resolution at power-up is 12-bit. The DS18B20 powers up in a low-power idle state. To initiate a temperature measurement and A-to-D conversion, the master must issue a Convert T [44h] command. Following the conversion, the resulting thermal data is stored in the 2-byte temperature register in the scratchpad memory and the DS18B20 returns to its idle state. If the DS18B20 is powered by an external supply, the master can issue “read time slots” (see the *1-Wire Bus System* section) after the Convert T command and the DS18B20 will respond by transmitting 0 while the temperature conversion is in progress and 1 when the conversion is done. If the DS18B20 is powered with parasite power, this notification technique cannot be used since the bus must be pulled high by a strong pullup during the entire temperature conversion. The bus requirements for parasite power are explained in detail in the *Powering the DS18B20* section.

The DS18B20 output temperature data is calibrated in degrees Celsius; for Fahrenheit applications, a lookup table or conversion routine must be used. The temperature data is stored as a 16-bit sign-extended two’s complement number in the temperature register (see Figure 2). The sign bits (S) indicate if the temperature is positive or negative: for positive numbers $S = 0$ and for negative numbers $S = 1$. If the DS18B20 is configured for 12-bit resolution, all bits in the temperature register will contain valid data. For 11-bit resolution, bit 0 is undefined. For 10-bit resolution, bits 1 and 0 are undefined, and for 9-bit resolution bits 2, 1, and 0 are undefined. Table 1 gives examples of digital output data and the corresponding temperature reading for 12-bit resolution conversions.

Figure 2. Temperature Register Format

	BIT 7	BIT 6	BIT 5	BIT 4	BIT 3	BIT 2	BIT 1	BIT 0
LS BYTE	2 ⁷	2 ⁶	2 ⁵	2 ⁴	2 ³	2 ²	2 ¹	2 ⁰
	BIT 15	BIT 14	BIT 13	BIT 12	BIT 11	BIT 10	BIT 9	BIT 8
MS BYTE	S	S	S	S	S	2 ⁸	2 ⁹	2 ⁸

S = SIGN

Table 1. Temperature/Data Relationship

TEMPERATURE (°C)	DIGITAL OUTPUT (BINARY)	DIGITAL OUTPUT (HEX)
+125	0000 0111 1101 0000	07D0h
+85*	0000 0101 0101 0000	0550h
25.0625	0000 0001 1001 0001	0191h
+10.125	0000 0000 1010 0010	00A2h
+0.5	0000 0000 0000 1000	0008h
0	0000 0000 0000 0000	0000h
-0.5	1111 1111 1111 1000	FFF8h
-10.125	1111 1111 0101 1110	FF5Eh
-25.0625	1111 1110 0110 1111	FE6Fh
-55	1111 1100 1001 0000	FC90h

*The power-on reset value of the temperature register is +85°C.

OPERATION—ALARM SIGNALING

After the DS18B20 performs a temperature conversion, the temperature value is compared to the user-defined two's complement alarm trigger values stored in the 1-byte T_H and T_L registers (see Figure 3). The sign bit (S) indicates if the value is positive or negative: for positive numbers $S = 0$ and for negative numbers $S = 1$. The T_H and T_L registers are nonvolatile (EEPROM) so they will retain data when the device is powered down. T_H and T_L can be accessed through bytes 2 and 3 of the scratchpad as explained in the *Memory* section.

Figure 3. T_H and T_L Register Format

BIT 7	BIT 6	BIT 5	BIT 4	BIT 3	BIT 2	BIT 1	BIT 0
S	2 ⁶	2 ⁵	2 ⁴	2 ³	2 ²	2 ¹	2 ⁰

Only bits 11 through 4 of the temperature register are used in the T_H and T_L comparison since T_H and T_L are 8-bit registers. If the measured temperature is lower than or equal to T_L or higher than or equal to T_H , an alarm condition exists and an alarm flag is set inside the DS18B20. This flag is updated after every temperature measurement; therefore, if the alarm condition goes away, the flag will be turned off after the next temperature conversion.

The master device can check the alarm flag status of all DS18B20s on the bus by issuing an Alarm Search [ECh] command. Any DS18B20s with a set alarm flag will respond to the command, so the master can determine exactly which DS18B20s have experienced an alarm condition. If an alarm condition exists and the T_H or T_L settings have changed, another temperature conversion should be done to validate the alarm condition.

POWERING THE DS18B20

The DS18B20 can be powered by an external supply on the V_{DD} pin, or it can operate in “parasite power” mode, which allows the DS18B20 to function without a local external supply. Parasite power is very useful for applications that require remote temperature sensing or that are very space constrained. Figure 1 shows the DS18B20’s parasite-power control circuitry, which “steals” power from the 1-Wire bus via the DQ pin when the bus is high. The stolen charge powers the DS18B20 while the bus is high, and some of the charge is stored on the parasite power capacitor (C_{PP}) to provide power when the bus is low. When the DS18B20 is used in parasite power mode, the V_{DD} pin must be connected to ground.

In parasite power mode, the 1-Wire bus and C_{PP} can provide sufficient current to the DS18B20 for most operations as long as the specified timing and voltage requirements are met (see the *DC Electrical Characteristics* and *AC Electrical Characteristics*). However, when the DS18B20 is performing temperature conversions or copying data from the scratchpad memory to EEPROM, the operating current can be as high as 1.5mA. This current can cause an unacceptable voltage drop across the weak 1-Wire pullup resistor and is more current than can be supplied by C_{PP} . To assure that the DS18B20 has sufficient supply current, it is necessary to provide a strong pullup on the 1-Wire bus whenever temperature conversions are taking place or data is being copied from the scratchpad to EEPROM. This can be accomplished by using a MOSFET to pull the bus directly to the rail as shown in Figure 4. The 1-Wire bus must be switched to the strong pullup within 10 μ s (max) after a Convert T [44h] or Copy Scratchpad [48h] command is issued, and the bus must be held high by the pullup for the duration of the conversion (t_{CONV}) or data transfer ($t_{WR} = 10$ ms). No other activity can take place on the 1-Wire bus while the pullup is enabled.

The DS18B20 can also be powered by the conventional method of connecting an external power supply to the V_{DD} pin, as shown in Figure 5. The advantage of this method is that the MOSFET pullup is not required, and the 1-Wire bus is free to carry other traffic during the temperature conversion time.

The use of parasite power is not recommended for temperatures above -100°C since the DS18B20 may not be able to sustain communications due to the higher leakage currents that can exist at these temperatures. For applications in which such temperatures are likely, it is strongly recommended that the DS18B20 be powered by an external power supply.

In some situations the bus master may not know whether the DS18B20s on the bus are parasite powered or powered by external supplies. The master needs this information to determine if the strong bus pullup should be used during temperature conversions. To get this information, the master can issue a Skip ROM [CCh] command followed by a Read Power Supply [B4h] command followed by a “read time slot”. During the read time slot, parasite powered DS18B20s will pull the bus low, and externally powered DS18B20s will let the bus remain high. If the bus is pulled low, the master knows that it must supply the strong pullup on the 1-Wire bus during temperature conversions.

Figure 4. Supplying the Parasite-Powered DS18B20 During Temperature Conversions

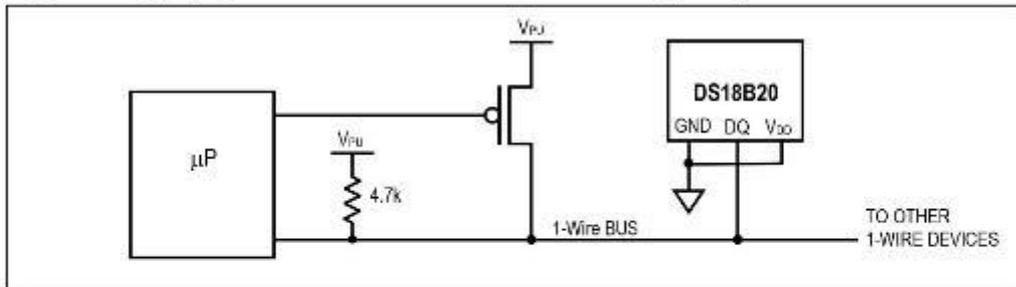
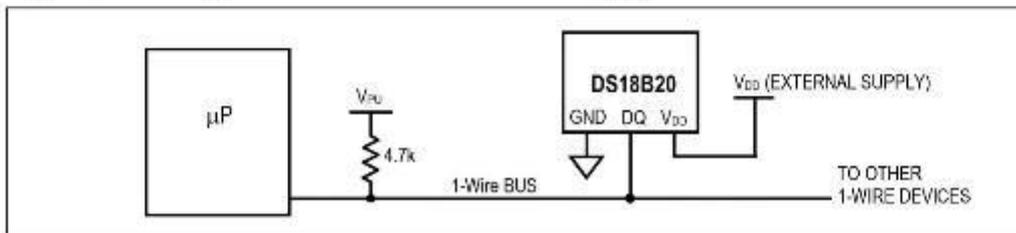


Figure 5. Powering the DS18B20 with an External Supply



64-BIT LASERED ROM CODE

Each DS18B20 contains a unique 64-bit code (see Figure 6) stored in ROM. The least significant 8 bits of the ROM code contain the DS18B20's 1-Wire family code: 28h. The next 48 bits contain a unique serial number. The most significant 8 bits contain a cyclic redundancy check (CRC) byte that is calculated from the first 56 bits of the ROM code. A detailed explanation of the CRC bits is provided in the *CRC Generation* section. The 64-bit ROM code and associated ROM function control logic allow the DS18B20 to operate as a 1-Wire device using the protocol detailed in the *1-Wire Bus System* section.

Figure 6. 64-Bit Lasered ROM Code

8-BIT CRC		48-BIT SERIAL NUMBER				8-BIT FAMILY CODE (28h)	
MSB	LSB	MSB	LSB	MSB	LSB	MSB	LSB

MEMORY

The DS18B20's memory is organized as shown in Figure 7. The memory consists of an SRAM scratchpad with nonvolatile EEPROM storage for the high and low alarm trigger registers (T_H and T_L) and configuration register. Note that if the DS18B20 alarm function is not used, the T_H and T_L registers can serve as general-purpose memory. All memory commands are described in detail in the *DS18B20 Function Commands* section.

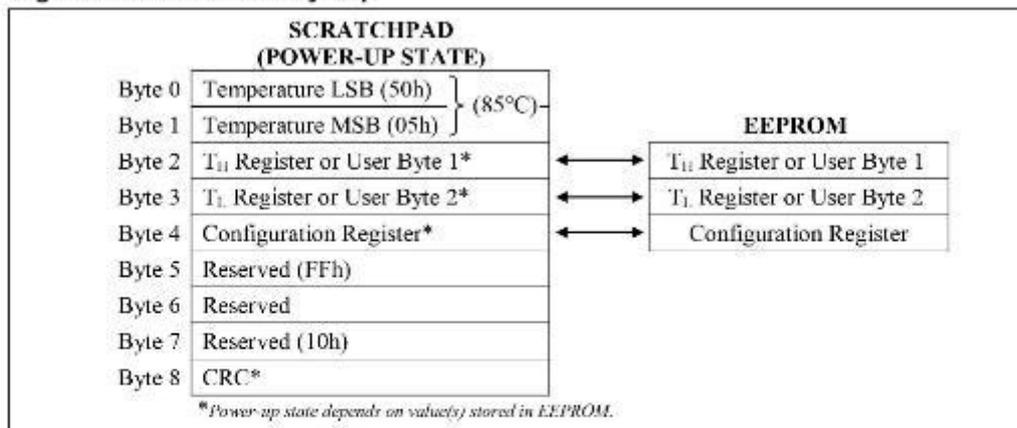
Byte 0 and byte 1 of the scratchpad contain the LSB and the MSB of the temperature register, respectively. These bytes are read-only. Bytes 2 and 3 provide access to T_H and T_L registers. Byte 4 contains the configuration register data, which is explained in detail in the *Configuration Register* section. Bytes 5, 6, and 7 are reserved for internal use by the device and cannot be overwritten.

Byte 8 of the scratchpad is read-only and contains the CRC code for bytes 0 through 7 of the scratchpad. The DS18B20 generates this CRC using the method described in the *CRC Generation* section.

Data is written to bytes 2, 3, and 4 of the scratchpad using the Write Scratchpad [4Eh] command; the data must be transmitted to the DS18B20 starting with the least significant bit of byte 2. To verify data integrity, the scratchpad can be read (using the Read Scratchpad [BEh] command) after the data is written. When reading the scratchpad, data is transferred over the 1-Wire bus starting with the least significant bit of byte 0. To transfer the T_H , T_L and configuration data from the scratchpad to EEPROM, the master must issue the Copy Scratchpad [48h] command.

Data in the EEPROM registers is retained when the device is powered down; at power-up the EEPROM data is reloaded into the corresponding scratchpad locations. Data can also be reloaded from EEPROM to the scratchpad at any time using the Recall E² [B8h] command. The master can issue read time slots following the Recall E² command and the DS18B20 will indicate the status of the recall by transmitting 0 while the recall is in progress and 1 when the recall is done.

Figure 7. DS18B20 Memory Map



CONFIGURATION REGISTER

Byte 4 of the scratchpad memory contains the configuration register, which is organized as illustrated in Figure 8. The user can set the conversion resolution of the DS18B20 using the R0 and R1 bits in this register as shown in Table 2. The power-up default of these bits is R0 = 1 and R1 = 1 (12-bit resolution). Note that there is a direct tradeoff between resolution and conversion time. Bit 7 and bits 0 to 4 in the configuration register are reserved for internal use by the device and cannot be overwritten.

Figure 8. Configuration Register

BIT 7	BIT 6	BIT 5	BIT 4	BIT 3	BIT 2	BIT 1	BIT 0
0	R1	R0	1	1	1	1	1

Table 2. Thermometer Resolution Configuration

R1	R0	RESOLUTION (BITS)	MAX CONVERSION TIME	
0	0	9	93.75ms	($t_{CONV}/8$)
0	1	10	187.5ms	($t_{CONV}/4$)
1	0	11	375ms	($t_{CONV}/2$)
1	1	12	750ms	(t_{CONV})

CRC GENERATION

CRC bytes are provided as part of the DS18B20's 64-bit ROM code and in the 9th byte of the scratchpad memory. The ROM code CRC is calculated from the first 56 bits of the ROM code and is contained in the most significant byte of the ROM. The scratchpad CRC is calculated from the data stored in the scratchpad, and therefore it changes when the data in the scratchpad changes. The CRCs provide the bus master with a method of data validation when data is read from the DS18B20. To verify that data has been read correctly, the bus master must re-calculate the CRC from the received data and then compare this value to either the ROM code CRC (for ROM reads) or to the scratchpad CRC (for scratchpad reads). If the calculated CRC matches the read CRC, the data has been received error free. The comparison of CRC values and the decision to continue with an operation are determined entirely by the bus master. There is no circuitry inside the DS18B20 that prevents a command sequence from proceeding if the DS18B20 CRC (ROM or scratchpad) does not match the value generated by the bus master.

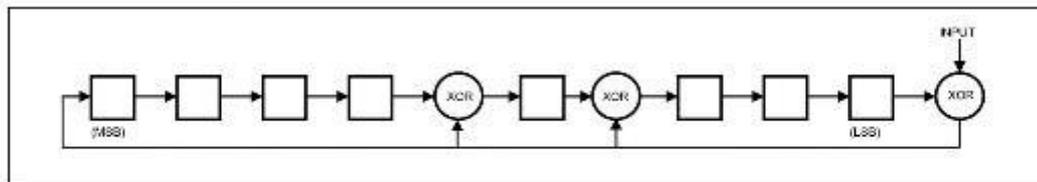
The equivalent polynomial function of the CRC (ROM or scratchpad) is:

$$CRC = X^8 + X^5 - X^4 + 1$$

The bus master can re-calculate the CRC and compare it to the CRC values from the DS18B20 using the polynomial generator shown in Figure 9. This circuit consists of a shift register and XOR gates, and the shift register bits are initialized to 0. Starting with the least significant bit of the ROM code or the least significant bit of byte 0 in the scratchpad, one bit at a time should be shifted into the shift register. After shifting in the 56th bit from the ROM or the most significant bit of byte 7 from the scratchpad, the polynomial generator will contain the re-calculated CRC. Next, the 8-bit ROM code or scratchpad CRC from the DS18B20 must be shifted into the circuit. At this point, if the re-calculated CRC was correct, the shift register will contain all 0s. Additional information about the Maxim 1-Wire cyclic redundancy check

is available in *Application Note 27: Understanding and Using Cyclic Redundancy Checks with Maxim iButton Products*.

Figure 9. CRC Generator



1-WIRE BUS SYSTEM

The 1-Wire bus system uses a single bus master to control one or more slave devices. The DS18B20 is always a slave. When there is only one slave on the bus, the system is referred to as a “single-drop” system; the system is “multidrop” if there are multiple slaves on the bus.

All data and commands are transmitted least significant bit first over the 1-Wire bus.

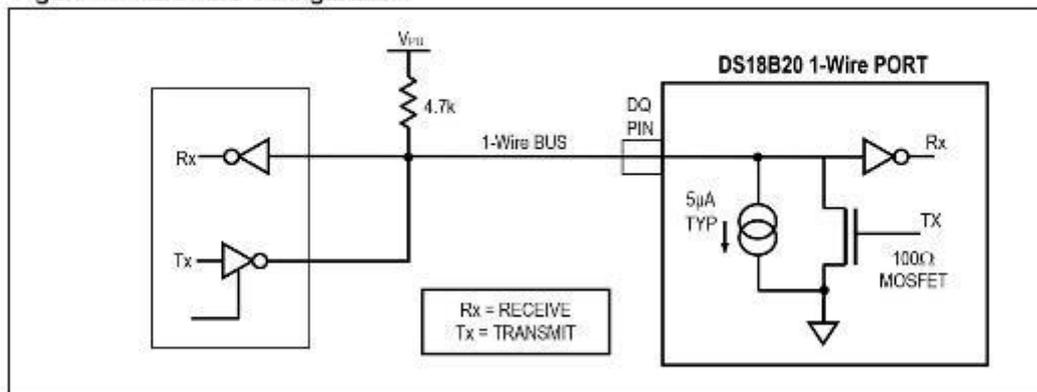
The following discussion of the 1-Wire bus system is broken down into three topics: hardware configuration, transaction sequence, and 1-Wire signaling (signal types and timing).

HARDWARE CONFIGURATION

The 1-Wire bus has by definition only a single data line. Each device (master or slave) interfaces to the data line via an open-drain or 3-state port. This allows each device to “release” the data line when the device is not transmitting data so the bus is available for use by another device. The 1-Wire port of the DS18B20 (the DQ pin) is open drain with an internal circuit equivalent to that shown in Figure 10.

The 1-Wire bus requires an external pullup resistor of approximately 5k Ω ; thus, the idle state for the 1-Wire bus is high. If for any reason a transaction needs to be suspended, the bus MUST be left in the idle state if the transaction is to resume. Infinite recovery time can occur between bits so long as the 1-Wire bus is in the inactive (high) state during the recovery period. If the bus is held low for more than 480 μ s, all components on the bus will be reset.

Figure 10. Hardware Configuration



TRANSACTION SEQUENCE

The transaction sequence for accessing the DS18B20 is as follows:

- Step 1. Initialization
- Step 2. ROM Command (followed by any required data exchange)
- Step 3. DS18B20 Function Command (followed by any required data exchange)

It is very important to follow this sequence every time the DS18B20 is accessed, as the DS18B20 will not respond if any steps in the sequence are missing or out of order. Exceptions to this rule are the Search ROM [F0h] and Alarm Search [FCh] commands. After issuing either of these ROM commands, the master must return to Step 1 in the sequence.

INITIALIZATION

All transactions on the 1-Wire bus begin with an initialization sequence. The initialization sequence consists of a reset pulse transmitted by the bus master followed by presence pulse(s) transmitted by the slave(s). The presence pulse lets the bus master know that slave devices (such as the DS18B20) are on the bus and are ready to operate. Timing for the reset and presence pulses is detailed in the *1-Wire Signaling* section.

ROM COMMANDS

After the bus master has detected a presence pulse, it can issue a ROM command. These commands operate on the unique 64-bit ROM codes of each slave device and allow the master to single out a specific device if many are present on the 1-Wire bus. These commands also allow the master to determine how many and what types of devices are present on the bus or if any device has experienced an alarm condition. There are five ROM commands, and each command is 8 bits long. The master device must issue an appropriate ROM command before issuing a DS18B20 function command. A flowchart for operation of the ROM commands is shown in Figure 11.

SEARCH ROM [F0h]

When a system is initially powered up, the master must identify the ROM codes of all slave devices on the bus, which allows the master to determine the number of slaves and their device types. The master learns the ROM codes through a process of elimination that requires the master to perform a Search ROM cycle (i.e., Search ROM command followed by data exchange) as many times as necessary to identify all of the slave devices. If there is only one slave on the bus, the simpler Read ROM command (see below) can be used in place of the Search ROM process. For a detailed explanation of the Search ROM procedure, refer to the *iButton[®] Book of Standards* at www.maxim-ic.com/ibuttonbook. After every Search ROM cycle, the bus master must return to Step 1 (Initialization) in the transaction sequence.

READ ROM [33h]

This command can only be used when there is one slave on the bus. It allows the bus master to read the slave's 64-bit ROM code without using the Search ROM procedure. If this command is used when there is more than one slave present on the bus, a data collision will occur when all the slaves attempt to respond at the same time.

MATCH ROM [55h]

The match ROM command followed by a 64-bit ROM code sequence allows the bus master to address a specific slave device on a multidrop or single-drop bus. Only the slave that exactly matches the 64-bit ROM code sequence will respond to the function command issued by the master; all other slaves on the bus will wait for a reset pulse.

iButton is a registered trademark of Maxim Integrated Products, Inc.

SKIP ROM [CCh]

The master can use this command to address all devices on the bus simultaneously without sending out any ROM code information. For example, the master can make all DS18B20s on the bus perform simultaneous temperature conversions by issuing a Skip ROM command followed by a Convert T [44h] command.

Note that the Read Scratchpad [BEh] command can follow the Skip ROM command only if there is a single slave device on the bus. In this case, time is saved by allowing the master to read from the slave without sending the device's 64-bit ROM code. A Skip ROM command followed by a Read Scratchpad command will cause a data collision on the bus if there is more than one slave since multiple devices will attempt to transmit data simultaneously.

ALARM SEARCH [ECh]

The operation of this command is identical to the operation of the Search ROM command except that only slaves with a set alarm flag will respond. This command allows the master device to determine if any DS18B20s experienced an alarm condition during the most recent temperature conversion. After every Alarm Search cycle (i.e., Alarm Search command followed by data exchange), the bus master must return to Step 1 (Initialization) in the transaction sequence. See the *Operation—Alarm Signaling* section for an explanation of alarm flag operation.

DS18B20 FUNCTION COMMANDS

After the bus master has used a ROM command to address the DS18B20 with which it wishes to communicate, the master can issue one of the DS18B20 function commands. These commands allow the master to write to and read from the DS18B20's scratchpad memory, initiate temperature conversions and determine the power supply mode. The DS18B20 function commands, which are described below, are summarized in Table 3 and illustrated by the flowchart in Figure 12.

CONVERT T [44h]

This command initiates a single temperature conversion. Following the conversion, the resulting thermal data is stored in the 2-byte temperature register in the scratchpad memory and the DS18B20 returns to its low-power idle state. If the device is being used in parasite power mode, within 10 μ s (max) after this command is issued the master must enable a strong pullup on the 1-Wire bus for the duration of the conversion (t_{CONV}) as described in the *Powering the DS18B20* section. If the DS18B20 is powered by an external supply, the master can issue read time slots after the Convert T command and the DS18B20 will respond by transmitting a 0 while the temperature conversion is in progress and a 1 when the conversion is done. In parasite power mode this notification technique cannot be used since the bus is pulled high by the strong pullup during the conversion.

WRITE SCRATCHPAD [4Eh]

This command allows the master to write 3 bytes of data to the DS18B20's scratchpad. The first data byte is written into the T_{HI} register (byte 2 of the scratchpad), the second byte is written into the T_{LO} register (byte 3), and the third byte is written into the configuration register (byte 4). Data must be transmitted least significant bit first. All three bytes **MUST** be written before the master issues a reset, or the data may be corrupted.

READ SCRATCHPAD [BEh]

This command allows the master to read the contents of the scratchpad. The data transfer starts with the least significant bit of byte 0 and continues through the scratchpad until the 9th byte (byte 8 – CRC) is read. The master may issue a reset to terminate reading at any time if only part of the scratchpad data is needed.

COPY SCRATCHPAD [48h]

This command copies the contents of the scratchpad T_H , T_L , and configuration registers (bytes 2, 3 and 4) to EEPROM. If the device is being used in parasite power mode, within 10 μ s (max) after this command is issued the master must enable a strong pullup on the 1-Wire bus for at least 10ms as described in the *Powering the DS18B20* section.

RECALL E² [B8h]

This command recalls the alarm trigger values (T_H and T_L) and configuration data from EEPROM and places the data in bytes 2, 3, and 4, respectively, in the scratchpad memory. The master device can issue read time slots following the Recall E² command and the DS18B20 will indicate the status of the recall by transmitting 0 while the recall is in progress and 1 when the recall is done. The recall operation happens automatically at power-up, so valid data is available in the scratchpad as soon as power is applied to the device.

READ POWER SUPPLY [B4h]

The master device issues this command followed by a read time slot to determine if any DS18B20s on the bus are using parasite power. During the read time slot, parasite powered DS18B20s will pull the bus low, and externally powered DS18B20s will let the bus remain high. See the *Powering the DS18B20* section for usage information for this command.

Table 3. DS18B20 Function Command Set

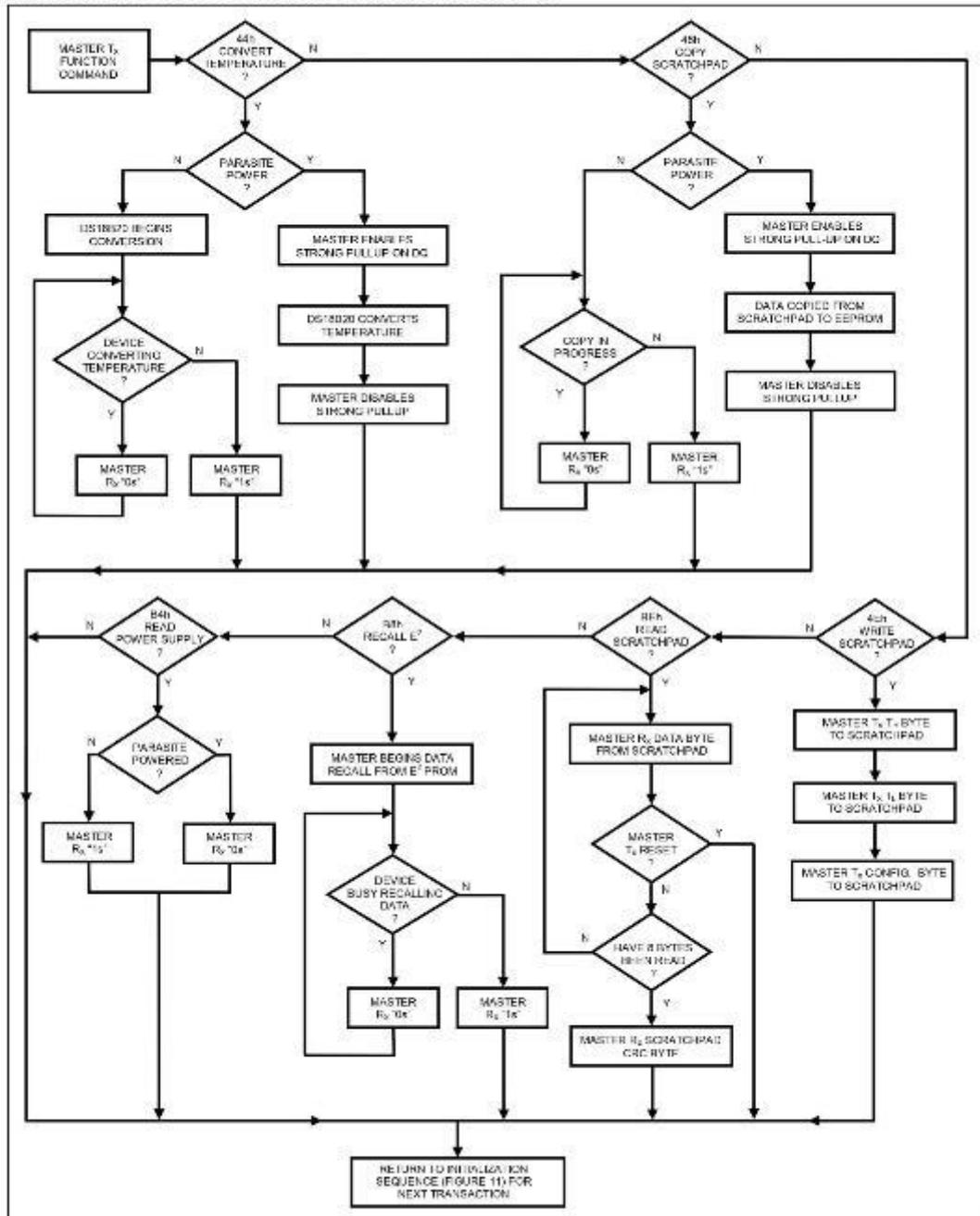
COMMAND	DESCRIPTION	PROTOCOL	1-Wire BUS ACTIVITY AFTER COMMAND IS ISSUED	NOTES
TEMPERATURE CONVERSION COMMANDS				
Convert T	Initiates temperature conversion.	44h	DS18B20 transmits conversion status to master (not applicable for parasite-powered DS18B20s).	1
MEMORY COMMANDS				
Read Scratchpad	Reads the entire scratchpad including the CRC byte.	BEh	DS18B20 transmits up to 9 data bytes to master.	2
Write Scratchpad	Writes data into scratchpad bytes 2, 3, and 4 (T_H , T_L , and configuration registers).	4Fh	Master transmits 3 data bytes to DS18B20.	3
Copy Scratchpad	Copies T_H , T_L , and configuration register data from the scratchpad to EEPROM.	48h	None.	1
Recall E ²	Recalls T_H , T_L , and configuration register data from EEPROM to the scratchpad.	B8h	DS18B20 transmits recall status to master.	
Read Power Supply	Signals DS18B20 power supply mode to the master.	B4h	DS18B20 transmits supply status to master.	

Note 1: For parasite-powered DS18B20s, the master must enable a strong pullup on the 1-Wire bus during temperature conversions and copies from the scratchpad to EEPROM. No other bus activity may take place during this time.

Note 2: The master can interrupt the transmission of data at any time by issuing a reset.

Note 3: All three bytes must be written before a reset is issued.

Figure 12. DS18B20 Function Commands Flowchart



1-WIRE SIGNALING

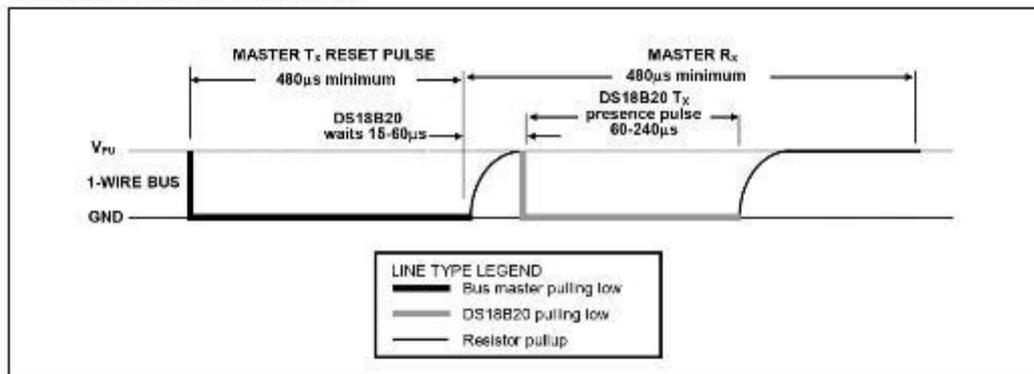
The DS18B20 uses a strict 1-Wire communication protocol to ensure data integrity. Several signal types are defined by this protocol: reset pulse, presence pulse, write 0, write 1, read 0, and read 1. The bus master initiates all these signals, with the exception of the presence pulse.

INITIALIZATION PROCEDURE—RESET AND PRESENCE PULSES

All communication with the DS18B20 begins with an initialization sequence that consists of a reset pulse from the master followed by a presence pulse from the DS18B20. This is illustrated in Figure 13. When the DS18B20 sends the presence pulse in response to the reset, it is indicating to the master that it is on the bus and ready to operate.

During the initialization sequence the bus master transmits (T_x) the reset pulse by pulling the 1-Wire bus low for a minimum of 480 μ s. The bus master then releases the bus and goes into receive mode (R_x). When the bus is released, the 5k Ω pullup resistor pulls the 1-Wire bus high. When the DS18B20 detects this rising edge, it waits 15 μ s to 60 μ s and then transmits a presence pulse by pulling the 1-Wire bus low for 60 μ s to 240 μ s.

Figure 13. Initialization Timing



READ/WRITE TIME SLOTS

The bus master writes data to the DS18B20 during write time slots and reads data from the DS18B20 during read time slots. One bit of data is transmitted over the 1-Wire bus per time slot.

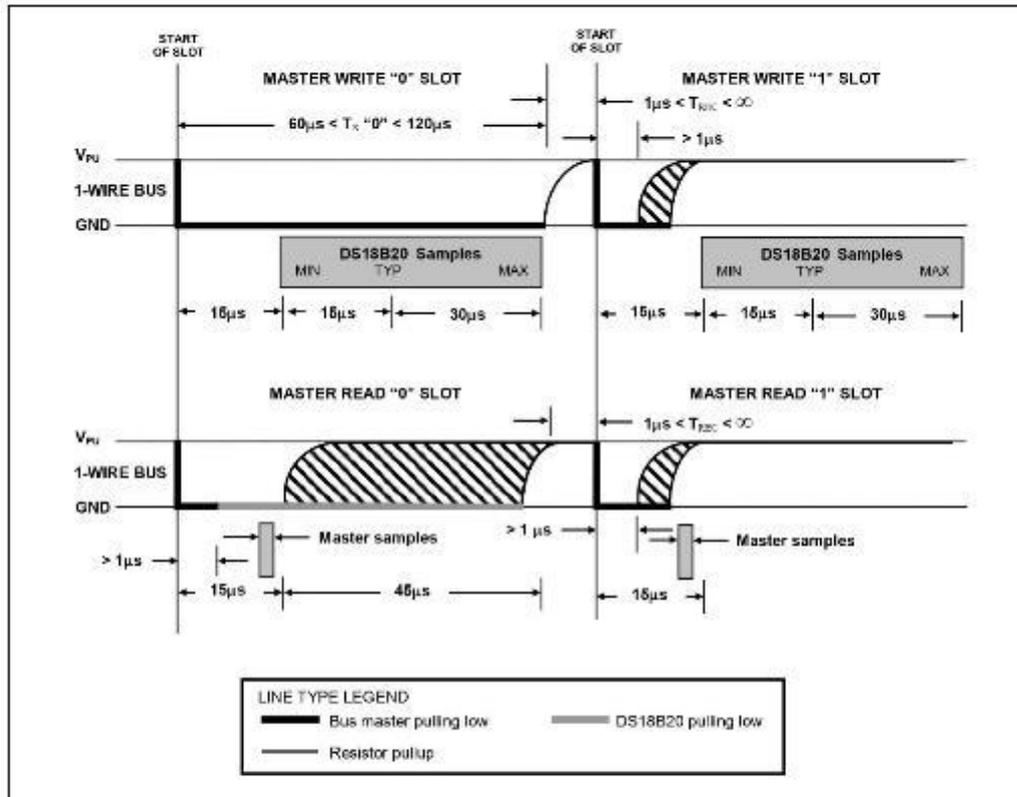
WRITE TIME SLOTS

There are two types of write time slots: “Write 1” time slots and “Write 0” time slots. The bus master uses a Write 1 time slot to write a logic 1 to the DS18B20 and a Write 0 time slot to write a logic 0 to the DS18B20. All write time slots must be a minimum of 60 μ s in duration with a minimum of a 1 μ s recovery time between individual write slots. Both types of write time slots are initiated by the master pulling the 1-Wire bus low (see Figure 14).

To generate a Write 1 time slot, after pulling the 1-Wire bus low, the bus master must release the 1-Wire bus within 15 μ s. When the bus is released, the 5k Ω pullup resistor will pull the bus high. To generate a Write 0 time slot, after pulling the 1-Wire bus low, the bus master must continue to hold the bus low for the duration of the time slot (at least 60 μ s).

The DS18B20 samples the 1-Wire bus during a window that lasts from 15 μ s to 60 μ s after the master initiates the write time slot. If the bus is high during the sampling window, a 1 is written to the DS18B20. If the line is low, a 0 is written to the DS18B20.

Figure 14. Read/Write Time Slot Timing Diagram



READ TIME SLOTS

The DS18B20 can only transmit data to the master when the master issues read time slots. Therefore, the master must generate read time slots immediately after issuing a Read Scratchpad [BEh] or Read Power Supply [B4h] command, so that the DS18B20 can provide the requested data. In addition, the master can generate read time slots after issuing Convert T [44h] or Recall E² [B8h] commands to find out the status of the operation as explained in the *DS18B20 Function Commands* section.

All read time slots must be a minimum of 60 μ s in duration with a minimum of a 1 μ s recovery time between slots. A read time slot is initiated by the master device pulling the 1-Wire bus low for a minimum of 1 μ s and then releasing the bus (see Figure 14). After the master initiates the read time slot, the DS18B20 will begin transmitting a 1 or 0 on bus. The DS18B20 transmits a 1 by leaving the bus high and transmits a 0 by pulling the bus low. When transmitting a 0, the DS18B20 will release the bus by the end of the time slot, and the bus will be pulled back to its high idle state by the pullup resistor. Output

data from the DS18B20 is valid for 15 μ s after the falling edge that initiated the read time slot. Therefore, the master must release the bus and then sample the bus state within 15 μ s from the start of the slot.

Figure 15 illustrates that the sum of T_{INIT} , T_{RC} , and T_{SAMPLE} must be less than 15 μ s for a read time slot. Figure 16 shows that system timing margin is maximized by keeping T_{INIT} and T_{RC} as short as possible and by locating the master sample time during read time slots towards the end of the 15 μ s period.

Figure 15. Detailed Master Read 1 Timing

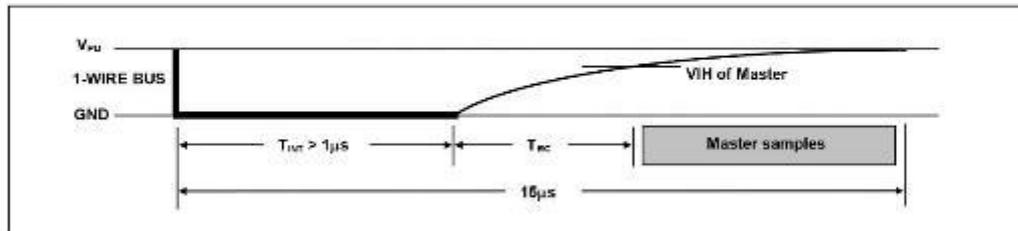
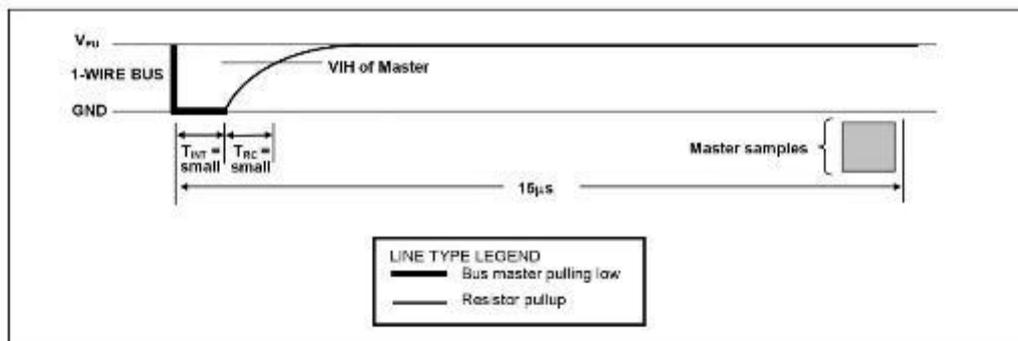


Figure 16. Recommended Master Read 1 Timing



RELATED APPLICATION NOTES

The following application notes can be applied to the DS18B20 and are available on our website at www.maxim-ic.com.

- Application Note 27: Understanding and Using Cyclic Redundancy Checks with Maxim iButton Products*
- Application Note 122: Using Dallas' 1-Wire ICs in 1-Cell Li-Ion Battery Packs with Low-Side N-Channel Safety FETs Master*
- Application Note 126: 1-Wire Communication Through Software*
- Application Note 162: Interfacing the DS18x20/DS1822 1-Wire Temperature Sensor in a Microcontroller Environment*
- Application Note 208: Curve Fitting the Error of a Bandgap-Based Digital Temperature Sensor*
- Application Note 2420: 1-Wire Communication with a Microchip PICmicro Microcontroller*
- Application Note 3754: Single-Wire Serial Bus Carries Isolated Power and Data*

Sample 1-Wire subroutines that can be used in conjunction with *Application Note 74: Reading and Writing iButtons via Serial Interfaces* can be downloaded from the Maxim website.

DS18B20 OPERATION EXAMPLE 1

In this example there are multiple DS18B20s on the bus and they are using parasite power. The bus master initiates a temperature conversion in a specific DS18B20 and then reads its scratchpad and recalculates the CRC to verify the data.

MASTER MODE	DATA (LSB FIRST)	COMMENTS
Tx	Reset	Master issues reset pulse.
Rx	Presence	DS18B20s respond with presence pulse.
Tx	55h	Master issues Match ROM command.
Tx	64-bit ROM code	Master sends DS18B20 ROM code.
Tx	44h	Master issues Convert T command.
Tx	DQ line held high by strong pullup	Master applies strong pullup to DQ for the duration of the conversion (t_{CONV}).
Tx	Reset	Master issues reset pulse.
Rx	Presence	DS18B20s respond with presence pulse.
Tx	55h	Master issues Match ROM command.
Tx	64-bit ROM code	Master sends DS18B20 ROM code.
Tx	BEh	Master issues Read Scratchpad command.
Rx	9 data bytes	Master reads entire scratchpad including CRC. The master then recalculates the CRC of the first eight data bytes from the scratchpad and compares the calculated CRC with the read CRC (byte 9). If they match, the master continues; if not, the read operation is repeated.

DS18B20 OPERATION EXAMPLE 2

In this example there is only one DS18B20 on the bus and it is using parasite power. The master writes to the T_{IL} , T_L , and configuration registers in the DS18B20 scratchpad and then reads the scratchpad and recalculates the CRC to verify the data. The master then copies the scratchpad contents to EEPROM.

MASTER MODE	DATA (LSB FIRST)	COMMENTS
Tx	Reset	Master issues reset pulse.
Rx	Presence	DS18B20 responds with presence pulse.
Tx	CCh	Master issues Skip ROM command.
Tx	4Eh	Master issues Write Scratchpad command.
Tx	3 data bytes	Master sends three data bytes to scratchpad (T_{IL} , T_L , and config).
Tx	Reset	Master issues reset pulse.
Rx	Presence	DS18B20 responds with presence pulse.
Tx	CCh	Master issues Skip ROM command.
Tx	BEh	Master issues Read Scratchpad command.
Rx	9 data bytes	Master reads entire scratchpad including CRC. The master then recalculates the CRC of the first eight data bytes from the scratchpad and compares the calculated CRC with the read CRC (byte 9). If they match, the master continues; if not, the read operation is repeated.
Tx	Reset	Master issues reset pulse.
Rx	Presence	DS18B20 responds with presence pulse.
Tx	CCh	Master issues Skip ROM command.
Tx	48h	Master issues Copy Scratchpad command.
Tx	DQ line held high by strong pullup	Master applies strong pullup to DQ for at least 10ms while copy operation is in progress.

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

Voltage Range on Any Pin Relative to Ground	-0.5V to +6.0V
Operating Temperature Range	-55°C to +125°C
Storage Temperature Range	-55°C to +125°C
Solder Temperature	Refer to the IPC/JEDEC J-STD-020 Specification.

These are stress ratings only and functional operation of the device at these or any other conditions above those indicated in the operation sections of this specification is not implied. Exposure to absolute maximum rating conditions for extended periods of time may affect reliability.

DC ELECTRICAL CHARACTERISTICS (-55°C to +125°C; $V_{DD}=3.0V$ to 5.5V)

PARAMETER	SYMBOL	CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNITS	NOTES
Supply Voltage	V_{DD}	Local Power	+3.0		-5.5	V	1
Pullup Supply Voltage	V_{PU}	Parasite Power	+3.0		-5.5	V	1,2
		Local Power	+3.0		V_{DD}		
Thermometer Error	t_{ERR}	-10°C to +85°C			±0.5	°C	3
		-55°C to +125°C			±2		
Input Logic-Low	V_{IL}		-0.3		-0.8	V	1,4,5
Input Logic-High	V_{IH}	Local Power	+2.2		The lower of 5.5 or $V_{DD} + 0.3$	V	1, 6
		Parasite Power	+3.0				
Sink Current	I_L	$V_{LO} = 0.4V$	4.0			mA	1
Standby Current	I_{DDS}			750	1000	nA	7,8
Active Current	I_{DD}	$V_{DD} = 5V$		1	1.5	mA	9
DQ Input Current	I_{DQ}			5		μA	10
Drift				±0.2		°C	11

NOTES:

- All voltages are referenced to ground.
- The Pullup Supply Voltage specification assumes that the pullup device is ideal, and therefore the high level of the pullup is equal to V_{PU} . In order to meet the V_{IH} spec of the DS18B20, the actual supply rail for the strong pullup transistor must include margin for the voltage drop across the transistor when it is turned on; thus: $V_{PU_ACTUAL} = V_{PU_IDEAL} + V_{TRANSISTOR}$.
- See typical performance curve in Figure 17.
- Logic-low voltages are specified at a sink current of 4mA.
- To guarantee a presence pulse under low voltage parasite power conditions, V_{ILMAX} may have to be reduced to as low as 0.5V.
- Logic-high voltages are specified at a source current of 1mA.
- Standby current specified up to +70°C. Standby current typically is 3μA at +125°C.
- To minimize I_{DDs} , DQ should be within the following ranges: $GND \leq DQ \leq GND + 0.3V$ or $V_{DD} - 0.3V \leq DQ \leq V_{DD}$.
- Active current refers to supply current during active temperature conversions or EEPROM writes.
- DQ line is high ("high-Z" state).
- Drift data is based on a 1000-hour stress test at +125°C with $V_{DD} = 5.5V$.

DS18B20

AC ELECTRICAL CHARACTERISTICS—NV MEMORY(-55°C to +100°C; $V_{DD} = 3.0V$ to 5.5V)

PARAMETER	SYMBOL	CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNITS
NV Write Cycle Time	t_{WR}			2	10	ms
EEPROM Writes	N_{HEUR}	-55°C to +55°C	50k			writes
EEPROM Data Retention	t_{EDR}	-55°C to +55°C	10			years

AC ELECTRICAL CHARACTERISTICS (-55°C to +125°C; $V_{DD} = 3.0V$ to 5.5V)

PARAMETER	SYMBOL	CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNITS	NOTES
Temperature Conversion Time	t_{CONV}	9-bit resolution			93.75	ms	1
		10-bit resolution			187.5		
		11-bit resolution			375		
		12-bit resolution			750		
Time to Strong Pullup On	t_{SPON}	Start Convert T Command Issued			10	μs	
Time Slot	t_{SLOT}		60		120	μs	1
Recovery Time	t_{REC}		1			μs	1
Write 0 Low Time	t_{LOW0}		60		120	μs	1
Write 1 Low Time	t_{LOW1}		1		15	μs	1
Read Data Valid	t_{RDV}				15	μs	1
Reset Time High	t_{RSTH}		480			μs	1
Reset Time Low	t_{RSTL}		480			μs	1.2
Presence-Detect High	t_{PDHIGH}		15		60	μs	1
Presence-Detect Low	t_{PDLW}		60		240	μs	1
Capacitance	$C_{IN/OUT}$				25	pF	

NOTES:

- 1) See the timing diagrams in Figure 18.
- 2) Under parasite power, if $t_{RSTL} > 960\mu s$, a power-on reset may occur.

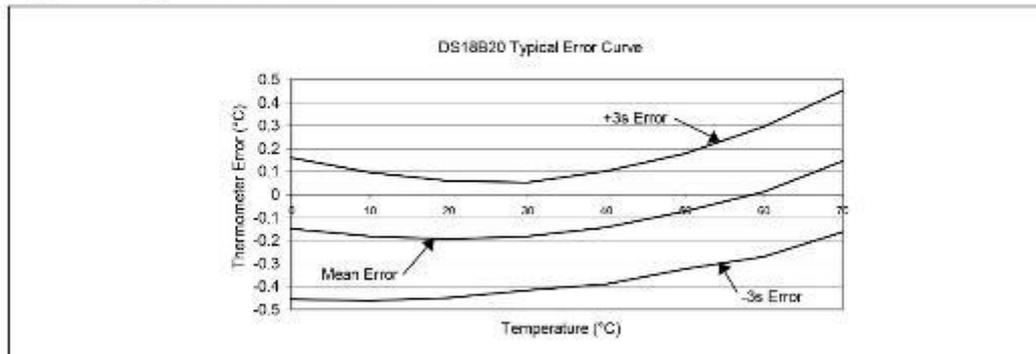
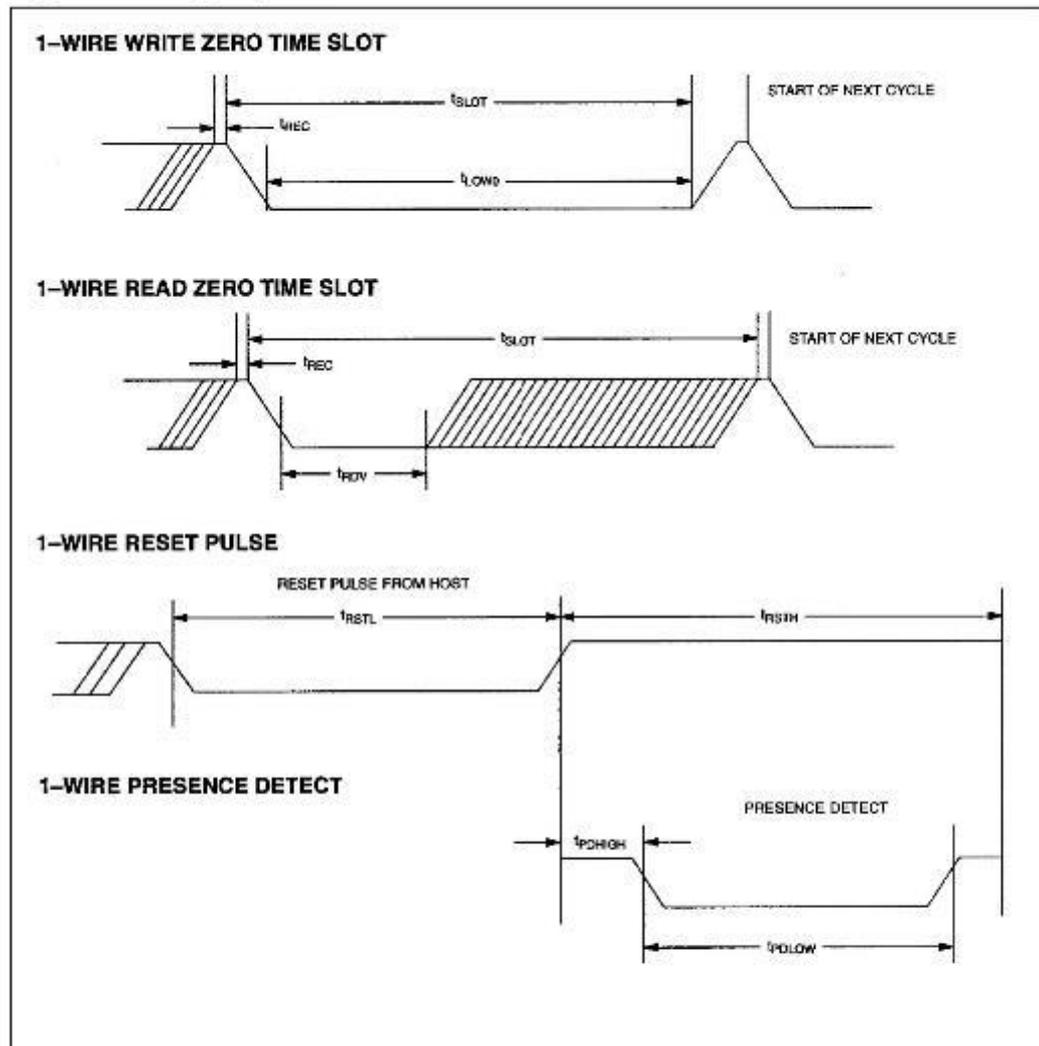
Figure 17. Typical Performance Curve

Figure 18. Timing Diagrams



REVISION HISTORY

REVISION DATE	DESCRIPTION	PAGES CHANGED
030107	In the <i>Absolute Maximum Ratings</i> section, removed the reflow oven temperature value of +220°C. Reference to JEDEC specification for reflow remains.	19
101207	In the <i>Operation—Alarm Signaling</i> section, added “or equal to” in the description for a TH alarm condition.	5
	In the <i>Memory</i> section, removed incorrect text describing memory.	7
	In the <i>Configuration Register</i> section, removed incorrect text describing configuration register.	8
042208	In the <i>Ordering Information</i> table, added TO-92 straight-lead packages and included a note that the TO-92 package in tape and reel can be ordered with either formed or straight leads.	2



Maxim cannot assume responsibility for use of any circuit other than circuit entirely embodied in a Maxim product. No circuit patent licenses are implied. Maxim reserves the right to change the circuit and specifications without notice at any time. The parameter values (min and max (typ)) shown in the Electrical Characteristics table are guaranteed. Other parametric values quoted in this data sheet are provided for guidance.

Maxim Integrated 160 Rio Robles, San Jose, CA 95134 USA 1-408-601-1000

22

© 2008 Maxim Integrated

The Maxim logo and Maxim Integrated are trademarks of Maxim Integrated Products, Inc.

ANEXO 3

Ficha de Informação de Produto Químico

IDENTIFICAÇÃO

Help

Número ONU	Nome do produto	Rótulo de risco
1971	METANO	

Número de risco	Classe	Subclasse
23	2.1	

Sinônimos
GÁS DO PÂNTANO ; GÁS NATURAL, COMPRIMIDO.

Aparência
GÁS COMPRIMIDO LIQÜEFEITO ; SEM COLORAÇÃO ; ODOR SUAVE ; FLUTUA E FERVE NA ÁGUA ; PRODUZ NÚVEM DE VAPOR, VISÍVEL E INFLAMÁVEL

Fórmula	molecular	Família	química
CH4		HIDROCARBONETO	

Fabricantes
Para informações atualizadas recomenda-se a consulta às seguintes instituições ou referências:
[ABIQUIM - Associação Brasileira da Indústria Química](#): Fone 0800-118270
[ANDEF - Associação Nacional de Defesa Vegetal](#): Fone (11) 3081-5033
[Revista Química e Derivados - Guia geral de produtos químicos, Editora QD](#): Fone (11) 3826-6899
[Programa Agrofit - Ministério da Agricultura](#)

MEDIDAS DE SEGURANÇA

Help

Medidas preventivas imediatas
EVITAR CONTATO COM O LÍQUIDO. MANTER AS PESSOAS AFASTADAS. CHAMAR OS BOMBEIROS. PARAR O VAZAMENTO, SE POSSÍVEL. DESLIGAR AS FONTES DE IGNIÇÃO. FICAR CONTRA O VENTO E USAR NEBLINA D'ÁGUA, PARA BAIXAR O VAPOR. EVACUAR A ÁREA, EM CASO DE GRANDE VAZAMENTO.

Equipamentos de Proteção Individual (EPI)
USAR LUVAS, BOTAS E ROUPAS DE PROTEÇÃO E MÁSCARA DE RESPIRAÇÃO AUTÔNOMA.

RISCOS AO FOGO

Help

Ações a serem tomadas quando o produto entra em combustão
ESFRIAR OS RECIPIENTES EXPOSTOS E PROTEGER O HOMEM CONTRA OS EFEITOS, COM ÁGUA. O RETROCESSO DA CHAMA PODE OCORRER, DURANTE O ARRASTE DE VAPOR. DEIXAR O FOGO QUEIMAR.

Comportamento do produto no fogo
INFLAMÁVEL. O VAPOR PODE EXPLODIR, SE A IGNIÇÃO FOR EM ÁREA FECHADA.

Produtos perigosos da reação de combustão
NENHUM.

Agentes de extinção que não podem ser usados
ÁGUA.

Limites de inflamabilidade no ar
Limite Superior: 15,0 %
Limite Inferior: 5,0 %

Ponto de fulgor	GÁS INFLAMÁVEL
Temperatura de ignição	540,4 °C
Taxa de queima	12,5 mm/min
Taxa de evaporação (éter=1)	DADO NÃO DISPONÍVEL
NFPA (National Fire Protection Association)	
Perigo de Saúde (Azul):	1
Inflamabilidade (Vermelho):	4
Reatividade (Amarelo):	0

PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS E AMBIENTAIS		Help
Peso molecular	16,04	Ponto de ebulição (°C)
Ponto de ebulição (°C)	- 161,5	Ponto de fusão (°C)
Ponto de fusão (°C)	- 182,6	Densidade relativa do vapor
Temperatura crítica (°C)	- 82,5	Pressão crítica (atm)
Pressão crítica (atm)	45,44	Densidade relativa do vapor
Densidade relativa do líquido (ou sólido)	0,422 A -160 °C (LÍQUIDO)	Calor latente de vaporização (cal/g)
Calor latente de vaporização (cal/g)	121,9	Calor de combustão (cal/g)
Calor de combustão (cal/g)	- 11.954	Viscosidade (cP)
Viscosidade (cP)	DADO NÃO DISPONÍVEL	Solubilidade na água
Solubilidade na água	INSOLÚVEL	pH
pH	NÃO PERT.	Reatividade química com água
Reatividade química com água	NÃO REAGE.	Reatividade química com materiais comuns
Reatividade química com materiais comuns	NÃO REAGE.	Polimerização
Polimerização	NÃO OCORRE.	Reatividade química com outros materiais
Reatividade química com outros materiais	DADO NÃO DISPONÍVEL.	Degradabilidade
Degradabilidade	PRODUTO VOLÁTIL.	Potencial de concentração na cadeia alimentar
Potencial de concentração na cadeia alimentar	NENHUM.	Demanda bioquímica de oxigênio (DBO)
Demanda bioquímica de oxigênio (DBO)	NENHUMA.	Neutralização e disposição final
Neutralização e disposição final	DADO NÃO DISPONÍVEL.	

INFORMAÇÕES ECOTOXICOLÓGICAS		Help
Toxicidade	-	limites e padrões
L.P.O.:		200 ppm
P.P.:		NÃO PERTINENTE
IDLH:	DADO	NÃO DISPONÍVEL
LT: Brasil	- Valor	Médio
LT: Brasil	- Valor	48h: Teto:
LT: EUA	-	TWA: ASFIXIANTE
LT: EUA - STEL:	ASFIXIANTE	SIMPLES
Toxicidade ao homem e animais superiores (vertebrados)	M.D.T.:	DADO NÃO DISPONÍVEL

M.C.T.: DADO NÃO DISPONÍVEL		
Toxicidade:	Espécie:	RATO
Via Oral (DL 50): 400 ppm		
Toxicidade: Espécie: CAMUNDONGO		
Toxicidade: Espécie: OUTROS		
Toxicidade	aos organismos aquáticos:	PEIXES : Espécie
Toxicidade	aos organismos aquáticos:	CRUSTÁCEOS : Espécie
Toxicidade	aos organismos aquáticos:	ALGAS : Espécie
Toxicidade	a outros organismos:	BACTÉRIAS
Toxicidade	a outros organismos:	MUTAGENICIDADE
Toxicidade	a outros organismos:	OUTROS
Informações sobre intoxicação humana		
Tipo de contato	Síndrome tóxica	Tratamento
VAPOR	NÃO É IRRITANTE PARA OS OLHOS, NARIZ OU GARGANTA. SE INALADO, CAUSARÁ TONTURA, DIFICULDADE RESPIRATÓRIA E PERDA DA CONSCIÊNCIA.	MOVER PARA O AR FRESCO. SE A RESPIRAÇÃO FOR DIFICULTADA OU PARAR, DAR OXIGÊNIO OU FAZER RESPIRAÇÃO ARTIFICIAL.
Tipo de contato	Síndrome tóxica	Tratamento
LÍQUIDO	CAUSARÁ ENREGELAMENTO.	ENXAGUAR AS ÁREAS AFETADAS COM MUITA ÁGUA. NÃO ESFREGAR AS ÁREAS AFETADAS.

DADOS GERAIS		Help
Temperatura	e	armazenamento
- 162.2 °C.		
Ventilação	para	transporte
VÁLVULA DE ALÍVIO.		
Estabilidade	durante	o transporte
ESTÁVEL.		
Usos		
FONTE DE PRODUTOS PETROQUÍMICOS ; COMO GÁS NATURAL E FONTE DE COMBUSTÍVEL ; FONTE DE NEGRO DE CARBONO.		
Grau	de	pureza
PESQUISA ; PURO.		
Radioatividade		
NÃO TEM.		
Método	de	coleta
DADO NÃO DISPONÍVEL.		
Código	NAS	(National Academy of Sciences)
FOGO	SAÚDE	POLUIÇÃO DAS ÁGUAS REATIVIDADE
Fogo: 4	Vapor Irritante: 0 Líquido/Sólido Irritante: 0 Venenos: 0	Toxicidade humana: 0 Toxicidade aquática: 0 Efeito estético: 0 Outros Produtos Químicos: 0 água: 0 Auto reação: 0

OBSERVAÇÕES

Help

TAXA DE TOXICIDADE AOS ORGANISMOS AQUÁTICOS : TLm (96 h) = ACIMA DE 1.000 ppm POTENCIAL DE IONIZAÇÃO (PI) = 12,51 eV.