

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ALIMENTOS
CURSO DE ENGENHARIA DE ALIMENTOS
CAMPUS MEDIANEIRA

HENRIQUE HERBERT

**ANÁLISE DO CONSUMO DE GÁS LIQUEFEITO DE PETRÓLEO
(GLP) NO PROCESSO PRODUTIVO DE BISCOITOS**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

MEDIANEIRA
2019

HENRIQUE HERBERT

**ANÁLISE DO CONSUMO DE GÁS LIQUEFEITO DE PETRÓLEO
(GLP) NO PROCESSO PRODUTIVO DE BISCOITOS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso II da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, campus Medianeira, como requisito para a obtenção do título de Engenheiro de Alimentos.

Orientador: Prof. Dr. Ilton José Baraldi

MEDIANEIRA

2019



TERMO DE APROVAÇÃO

Trabalho de Conclusão de Curso

ANÁLISE DO CONSUMO DE GÁS LIQUEFEITO DE PETRÓLEO (GLP) NO PROCESSO PRODUTIVO DE BISCOITOS

Por

HENRIQUE HERBERT

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado às **10h** do dia **19 de junho de 2019**, como requisito parcial para a obtenção do título de **ENGENHEIRO DE ALIMENTOS**, pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Prof. Dr. Ilton José Baraldi
Orientador

Prof^a. Dr^a. Daiane Cristina Lenhard
Membro da Banca

Prof^a. Dr^a. Nádia Cristiane Steinmacher
Membro da Banca

Henrique Herbert
Acadêmico

Medianeira, 19 de junho de 2019.

* A Folha de Aprovação assinada encontra-se na Coordenação do curso de Eng. de Alimentos

À Deus, à fé, à família e à amizade.

AGRADECIMENTOS

Obrigado Deus, por me amar o suficiente e permitir que me aconteça somente aquilo com que eu consigo lidar. Obrigado por quem eu me tornei através de tudo que o Senhor permitiu que me acontecesse.

Deus, o Senhor esteve ao meu lado e me deu força, ânimo e crença para não desistir e continuar lutando por este meu sonho e objetivo de vida. Ao Senhor eu devo minha gratidão.

Aos meus pais Tarcísio e Fabiane, irmã Gabriela e à minha avó Irma Cristina Herbert que apesar de todas as dificuldades, me ajudaram na realização do meu sonho. Eu nunca teria conseguido sem o apoio de vocês. Obrigado por tudo, de coração.

À minha namorada Julia Augusta Seyboth pela compreensão e apoio em todos os fins de semana dedicados aos estudos e por permitir que essa caminhada fosse mais alegre.

Agradeço ao meu orientador Ilton José Baraldi pela paciência e dedicação, por nunca ter desistido de mim, e acima de tudo, pelo incentivo, pois muitas vezes foi o empurrão que precisava.

À minha gerente Maike Tais Maziero Montanhini por toda ajuda, apoio e confiança durante este período tão importante da minha formação acadêmica.

A quem não mencionei, mas esteve junto eu prometo reconhecer essa proximidade, ajuda e incentivo por toda minha vida.

Agradeço muito à cada um de vocês!

***“Julgue seu sucesso pelas coisas
que você teve que renunciar para
conseguir.”***

(Dalai Lama)

RESUMO

HERBERT, H. **Análise do consumo de gás liquefeito de petróleo (GLP) no processo produtivo de biscoitos.** Trabalho de Conclusão de Curso TCC. 51 páginas. Curso de Engenharia de Alimentos. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, campus Medianeira.

Este trabalho trata de um estudo de caso de uma indústria de alimentos, com ênfase na produção de biscoitos. Estudos trazem que de toda energia empregada na produção de biscoitos, cerca de 95% são atribuídos a etapa de cozimento. Sendo assim, a unidade apresentou a necessidade da otimização do processo em busca da redução do consumo específico (kg de GLP / tonelada de produto) de Gás Liquefeito de Petróleo (GLP). A partir disso, buscou-se a compreensão do processo, avaliando as perdas de energia térmica e identificando oportunidades de reaproveitamento de calor do processo, determinando-se por fim, medidas de redução do consumo de GLP. Para isso, utilizou-se a metodologia DMAIC em conjunto com a aplicação de ferramentas da qualidade. Diagnosticadas as oportunidades de melhorias, encontrou-se alternativas que possibilitam economia de 24% de GLP do processo, sendo as mesmas apresentadas como sugestão para implementação futura por parte da indústria.

Palavras-chave: Biscoitos - indústria, Energia – indústria, Indústrias – consumo de energia, Gás como combustível, Calor residual, Meios de transferência de calor.

ABSTRACT

HERBERT, HENRIQUE. **Análise do consumo de gás liquefeito de petróleo (GLP) no processo produtivo de biscoitos.** Trabalho de Conclusão de Curso TCC. 51 páginas. Curso de Engenharia de Alimentos. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, campus Medianeira.

This work deals with a case study of a food industry, with an emphasis on the production of biscuits. The bring that of wide energy on the 95% shakes of the cook of 95% they are the stage for baking. Thus, the first attempt to adapt the process of seeking the reduction of specific consumption (kg of LPG / ton of product) of Liquefied Petroleum Gas (LPG). From this process, an evaluation of the process of evaluation of energy losses and the identification of opportunities of reutilization of heat of the process was determined, determining the reduction of LPG consumption. To do this, use a DMAIC methodology in conjunction with a quality tools application. Diagnosing the opportunities for improvements, find alternatives that allow the saving of 24% of the process GLP, being the same as a suggestion for the future implementation of the part of the industry.

Keywords: Cooky industry, Energy - industries, Industries - energy consumption, Gas as fuel, Waste heat, Heat transfer media.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Cronologia de aplicação da metodologia DMAIC.....	24
Figura 2 - Fluxograma do processo.....	25
Figura 3 - Configuração do forno 2.1 nas diferentes zonas.....	26
Figura 4 - Diagrama da entalpia de combustão.....	32
Figura 5 - Queimadores gás indireto encontrados nas zonas 1 e 2.....	35
Figura 6 - Representação do fluxo nas Zonas 1 e 2 do forno.....	36
Figura 7 - Forno baseado no sistema de aquecimento indireto.....	36
Figura 8 - Proposta de recuperação de calor nas Zonas 1 e 2.....	38
Figura 9 – Queimador com regulagem estequiométrica.....	39
Figura 10 - Queimador Regenerativo.....	40

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Principais ingredientes na produção de biscoitos e suas funções...	16
Tabela 2 - Descrição das atividades da metodologia DMAIC.....	22
Tabela 3 - Possíveis análises do processo.....	25
Tabela 4 - Indicador da eficiência energética do processo.....	26
Tabela 5 - Formulação e composição química do biscoito de leite.....	29
Tabela 6 - Temperaturas das zonas do forno 2.1.....	34
Tabela 7 - Distribuição do consumo de energia no forno.....	40
Tabela 8 - Temperaturas atingida com a troca de calor.....	42

LISTA DE SIGLAS

<i>ABIMAPI</i>	Associação Brasileira das Indústrias de Biscoitos, Massas Alimentícias, Pães & Bolos Industrializados
<i>ANVISA</i>	Agência Nacional de Vigilância Sanitária
<i>CEP</i>	Controle Estatístico de Processos
cp_{H_2O}	Calor específico da água
cp_{PR}	Calor específico das proteínas
cp_{CH}	Calor específico dos carboidratos
cp_{LI}	Calor específico dos lipídios
cp_{CZ}	Calor específico das cinzas
cp_{vapor}	Calor específico do vapor d'água
cp_{CO_2}	Calor específico do gás carbônico
cp_{O_2}	Calor específico do oxigênio
cp_{N_2}	Calor específico do nitrogênio
<i>DMAIC</i>	Define, Measure, Analyze, Improve and Control
E_s	Energia para evaporar água e aquecer até 285°C
E_{ai}	Energia para aquecer o biscoito de 40°C até 100°C
E_{af}	Energia para cozer o biscoito de 100°C até 180°C
<i>EC</i>	Energia total no processo de cozimento
<i>GLP</i>	Gás Liquefeito de Petróleo
m_{ae}	Massa de água evaporada
m_{bi}	Massa de biscoito no início
<i>PBL</i>	Problem Based Learning
<i>PCI</i>	Poder Calorífico Inferior
<i>PDCA</i>	Plan, do, check and act
X_{H_2O}	Fração mássica da água no biscoito
X_{CH}	Fração mássica do carboidrato no biscoito
X_{PR}	Fração mássica da proteína no biscoito
X_{LP}	Fração mássica do lipídio no biscoito
X_{CZ}	Fração mássica da cinza no biscoito

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	OBJETIVOS	15
2.1	OBJETIVO GERAL.....	15
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	15
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
3.1	COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO BISCOITO.....	16
3.2	COZIMENTO DO BISCOITO.....	17
3.3	EFICIÊNCIA ENERGÉTICA.....;	18
3.3.1	Eficiência energética na combustão.....	19
3.4	DESAFIOS DE IMPLEMENTAÇÃO.....	20
3.5	METODOLOGIA DMAIC.....	21
4	MATERIAL E MÉTODOS	23
4.1	MATERIAL.....	23
4.2	MÉTODOS.....	23
4.3	APLICAÇÃO DA METODOLOGIA DMAIC.....	24
4.4	CÁLCULOS E EQUAÇÕES.....	27
4.4.1	Estequiometria da reação.....	27
4.4.2	Propriedades termofísica dos alimentos e dos gases.....	28
4.4.3	Formulação e composição química do biscoito de leite.....	29
4.4.4	Cálculo das frações mássica.....	29
4.4.5	Energia de evaporação.....	30
4.4.6	Energia para aquecer o biscoito de 40°C até 100°C.....	30
4.4.7	Energia para cozer o biscoito de 100°C até 180°C.....	31
4.4.8	Energia total no processo de cozimento.....	31
4.4.9	Cálculo do consumo de gás para fornecer a energia EC.....	31
4.4.10	Algoritmo Scilab.....	34
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	34
5.1	ANÁLISES DO PROCESSO.....	34
5.2	OPORTUNIDADES DE MELHORIA.....	38
6	CONCLUSÃO	44
	REFERÊNCIAS	45
	APÊNDICE A	49

1. INTRODUÇÃO

O mercado de biscoitos representa no cenário nacional uma parcela significativa para as indústrias de alimentos, pois segundo a Associação Brasileira das Indústrias de Biscoitos, Massas Alimentícias, Pães & Bolos Industrializados (ABIMAPI, 2018), que divulgou o desempenho do setor em 2017, o faturamento das indústrias de biscoitos atingiu a marca dos R\$ 24,054 bilhões.

Em relação ao volume foram vendidas 1,82 milhão de toneladas. Em comparação aos últimos cinco anos a categoria avançou 35,3% em negócios e 6,51% em toneladas vendidas, de acordo com o mesmo levantamento (ABIMAPI, 2018).

Apesar da característica competitiva do mercado, segundo pesquisa do Instituto Clarice Herzog (2000), os biscoitos encontram-se presentes em 97,2% das mesas brasileiras, um dado que norteia as estratégias de expansão das empresas que comercializam este tipo de produto no país.

Biscoitos são produtos que não necessitam de nenhum tipo de preparo para seu consumo, tornando-os práticos para o dia a dia, sendo consumidos em sua maioria diretamente da embalagem. Outra característica importante deste produto é que, por possuir baixa atividade de água, os biscoitos apresentam uma longa vida de prateleira, podendo ser estocados em grande quantidade e por um longo período de tempo (MONTEIRO, 2009).

Frente à alta concorrência do mercado atual, onde os preços de venda dos produtos são determinados pelo próprio mercado, em busca de se manterem competitivas em relação aos seus concorrentes e ao mesmo tempo aumentarem seus lucros, as indústrias necessitam buscar a redução de seus custos de produção, uma vez que as margens de lucros são resultados do preço de venda subtraindo os custos da produção.

Entre as etapas do processo produtivo, de acordo com Mondal e Datta (2008), o cozimento da massa recebe uma atenção especial pela indústria, pois além de agregar características sensoriais ao produto, necessita o emprego de energia.

Esta energia pode ser elétrica ou liberada pela queima de combustíveis como o gás liquefeito de petróleo (GLP), diesel, entre outros (GONÇALVES, 2010). Todos estes combustíveis são considerados caros pelas indústrias, e podem representar

95% do uso total de energia no processo, sendo uma importante parcela no custo de produção do produto (DAVIDSON, 2016).

Um estudo de caso é caracterizado pelo estudo profundo e exaustivo de um ou de poucos objetos, de maneira a permitir o seu conhecimento amplo e detalhado, o que é mais difícil de se conseguir através de outros tipos de análises (GIL, 2008).

Partindo da definição supracitada, pode-se definir este trabalho como um estudo de caso, pois o objeto de estudo não possui uma solução pré-definida e que segundo Insper (2018) exige dos executantes empenho para a identificação do problema, análise das evidências, desenvolvimento de argumentos e avaliação a fim de propor soluções.

Em busca da otimização do processo e redução do consumo específico de GLP, duas abordagens apresentam-se para esta análise, uma que propõe medidas que apresentem resultados imediatos sem necessidade de investimento e outra que necessita de investimentos, cujos recursos nem sempre estão disponíveis para a indústria no momento, mas que podem ser implementadas a longo prazo.

Sendo importante ressaltar que a otimização do processo, em busca da minimização do consumo de energia, deverá estar diretamente atrelada à melhoria da qualidade do produto ou ao menos, a garantia da qualidade já existente.

Sabendo do impacto do consumo de energia na produção de biscoitos, a pesquisa abordará formas de redução do consumo específico de GLP (kg de GLP / ton. de produto), uma vez que essa é a fonte de energia utilizada pela indústria analisada neste estudo.

Espera-se no final desta análise, identificar oportunidades de otimização do processo, bem como suas restrições, buscando a redução do consumo de GLP com o intuito de minimizar os custos de fabricação, sem impactar negativamente na qualidade do produto.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Diagnosticar potenciais oportunidades e apresentar sugestões para otimização do processo produtivo de biscoitos com o objetivo de reduzir o consumo específico de GLP (kg de GLP / ton. de produto).

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analisar perfil de temperatura nos fornos para assar biscoito;
- Avaliar as perdas de energia térmica;
- Avaliar oportunidades de reaproveitamento de calor do processo;
- Determinar medidas de redução do consumo de GLP.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO BISCOITO

Os ingredientes para produção de biscoitos consistem predominantemente de farinha, água e sal. Uma variedade de ingredientes secundários também tem sido sugerida para melhorar as propriedades físicas e as qualidades alimentares como volume, textura, cor da crosta, sabor e aroma, prazo de validade e valor nutricional (PAREYT; DELCOUR, 2008).

A Agência Nacional de Vigilância Sanitária – ANVISA, órgão regulamentador da indústria de biscoitos no Brasil, define biscoito como o “produto obtido pelo amassamento e cozimento conveniente de massa preparada com farinhas, amidos, féculas fermentadas, ou não, e outras substâncias alimentícias” (BRASIL, 2005).

Em outra definição, tem-se que biscoito é o produto seco e aerado, elaborado a partir de uma massa constituída basicamente por farinha de trigo, água, gordura e fermento biológico ou agentes químicos de crescimento, modelada em pequenas unidades e assada (GRANOTEC, 2000).

A farinha de trigo constitui o principal ingrediente das formulações de biscoitos, sendo responsável por fornecer a matriz na qual os demais ingredientes são misturados, formando uma rede viscoelástica (EL-DASH; CAMARGO, 1982). O glúten é que dá a característica de força e elasticidade da farinha, determinando assim a utilização para cada tipo de produto em função de sua qualidade (Cauvain, 2015) (AZEVEDO, 2007). Os demais ingredientes possuem função importante para as características finais do produto, como pode ser visualizado na Tabela 1.

Tabela 1. Principais ingredientes na produção de biscoitos e suas respectivas funções.

Ingrediente	Função
Farinha de trigo	Matriz para formação da massa; Características de processamento e textura do produto.
Água	Distribuição uniforme dos outros ingredientes, hidratação da farinha e dissolução dos ingredientes.
Açúcares	Afetam as dimensões do produto, cor, dureza, estrutura, acabamento superficial e doçura;
Gordura	Importante papel estrutural na massa como sabor e maciez.
Fermento	Diminuem a densidade do biscoito, aumentando seu volume.

Fonte: Cauvain, 2016.

3.2 COZIMENTO DO BISCOITO

Para os diferentes produtos fabricados pela indústria de biscoitos, os estágios comuns de produção incluem: mistura, modelagem, cozimento, resfriamento e embalagem. Contudo o uso de energia é mais concentrado no processo de cozimento (SIKIRICA et al. 2003). Esses estágios de produção consomem quantidades suficientes de energia para justificar a investigação de medidas de eficiência energética (FRANK 2009, MCMULLEN 2010).

O cozimento é a última e uma das mais importantes etapas na produção de biscoitos e pode ser definido como o processo que transforma massa em um alimento com características sensoriais únicas pela aplicação de calor dentro de um forno. Estas características são resultado de uma série de mudanças físicas e químicas produzida pela transferência simultânea de calor e massa que ocorre no produto durante o cozimento (MONDAL; DATTA, 2008).

O modo a qual esse calor é transferido ao produto, segundo as propriedades de fenômenos de transporte, ocorrem por condução, convecção e radiação, onde cada uma delas apresenta resultados ao longo do cozimento. Segundo Sablani et al (1998), a condução contribui na expansão da massa devido à transferência gradual de calor através do volume final da massa, já a convecção determina a taxa de remoção de umidade, removendo a camada de água de umidade na superfície do produto através da evaporação.

O biscoito apresenta transformações ao longo do tempo de cozimento em diferentes faixas de temperatura, como a ativação do fermento (25°C), produção de CO₂ (50°C), aumento do volume (75°C), evaporação da água da superfície (100°C), evaporação da água da solução (125°C) e a caramelização de açúcares por meio da reação de Maillard (150°C) (DAVIDSON, 2016).

Ainda segundo Davidson (2016), as indústrias de biscoitos utilizam linhas de produção, pelas quais a massa é transportada por meio de esteiras em processo contínuo, as principais mudanças que ocorrem durante o cozimento:

- a) o desenvolvimento das estruturas que ocorre até a primeira metade do forno;
- b) a redução da umidade que decorre no meio do forno principalmente;
- c) o desenvolvimento da coloração no último terço do forno.

O desenvolvimento das estruturas durante o cozimento se deve a aeração sofrida pela massa por meio da formação da rede de glúten, que tem a capacidade de aprisionar os metabólitos formados e pela aplicação de calor tornando essas estruturas fixas (BALAJI, 1991).

O fator de propagação da massa é uma característica importante na determinação da qualidade dos biscoitos e é altamente dependente da viscosidade da massa. Já as propriedades de textura são um dos principais fatores de qualidade e aceitação dos biscoitos, onde sua umidade, além da qualidade, relaciona-se também diretamente na estabilidade e vida de prateleira do produto (PAREYT; DELCOUR, 2008).

Sendo assim, o ponto final do processo de cozimento é geralmente estabelecido se avaliando os atributos sensoriais, como a cor da superfície, a textura e o sabor do biscoito, que desempenham um papel fundamental na aceitação do produto pelos consumidores (PURLIS; SALVADORI, 2007).

O escurecimento da superfície que ocorre por meio da reação de Maillard é um indicador prático do avanço do cozimento, uma vez que pode ser facilmente monitorado durante o processo (MCFARLANE, 1990).

3.3 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

A eficiência energética é palavra-chave na indústria moderna, sendo um fator de competitividade, sustentabilidade e proteção ambiental. Segundo estudos realizados pelo governo norte-americano, estima-se que mais de 20% de todo o consumo de energia industrial no país é liberado como um calor desperdiçado (EUA, 2008).

As mudanças nas legislações em relação à busca de se reduzir as emissões de gases prejudiciais para a atmosfera e o aumento dos custos de energia estão levando a necessidade de processos de cozimento mais eficientes (KHATIR et al, 2013).

A otimização no processo de produção de biscoitos é um assunto de grande importância para a indústria de alimentos, por ser um alimento básico e, sendo assim, relevante do ponto de vista comercial. Por outro lado, é um processo de uso

intensivo de energia devido à evaporação da água do produto no cozimento (LE BAIL et al, 2010).

Outro fator que interfere na eficiência energética deste processo produtivo é o empirismo aplicado na operação dos fornos (operação por tentativa e erro), uma vez que estudos sobre como manipular as configurações dos fornos para se obter alta eficiência energética ainda são escassos (BROYART; TRYSTRAM, 2002).

Como resultado, a falta de padrão na qualidade de produtos é comum na maioria dos processos industriais, além de um ineficiente uso de energia, levando a perdas econômicas (WONG; ZHOU; HUA, 2007).

A otimização do processo através da alteração de parâmetros, como a configuração de ventiladores, minimizando o fluxo de ar do sistema e da análise do isolamento do sistema, é apresentada no estudo elaborado por Pask et al (2017) para melhorar a uniformidade da temperatura e maximizar o desempenho do sistema, em busca da redução do consumo de energia do processo produtivo de biscoitos.

3.3.1 – Eficiência energética na combustão

Nos fornos industriais utilizados para produção de biscoitos, o gás liquefeito de petróleo (GLP) apresenta-se como o combustível mais utilizado para gerar o calor. Para melhorar a eficiência energética, deve-se compreender a reação da combustão deste combustível.

O gás GLP é uma mistura de 50% (m/m) de n-propano com 50% (m/m) de n-butano, cuja densidade é 550 kg.m^{-3} a $20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (Resolução ANP nº 18 de 02-09-2004). E o poder calorífico inferior (PCI) do GLP corresponde a 48000 kJ.kg^{-1} .

Para garantir a combustão completa, ou seja, com baixa formação de monóxido de carbono (CO), utiliza-se ar em excesso de aproximadamente 30%, ou seja, uma quantidade em mols 30% superior à proporção estequiométrica.

O PCI dos combustíveis, no caso GLP, é medido a $25 \text{ }^{\circ}\text{C}$ correspondendo à variação de entalpia durante a combustão, utilizando-se o combustível e comburente (oxigênio) em proporções estequiométricas.

As quantidades de emissões de gases atmosféricos provenientes da queima de combustível são dependentes, principalmente, do tipo e da quantidade de combustível consumido e da fração de combustível que é efetivamente oxidada, fração esta, dependente da temperatura de combustão (XAVIER, 2004).

Se o ar de combustão puder ser pré-aquecido a uma alta temperatura na entrada de um forno usando o calor sensível recuperado, ele poderá economizar alguma quantidade de energia no aquecimento dos materiais até a temperatura especificada (TSUJI et al., 2003).

Para Roiha et al. (2014), esse pré-aquecimento da mistura do combustível pelo calor reciclado dos gases de combustão tem sido considerado uma tecnologia eficaz não só para a combustão de combustíveis de baixo poder calorífico, mas também para as baixas emissões de óxidos de nitrogênio (NO_x) e monóxido de carbono (CO).

3.4 DESAFIOS DE IMPLEMENTAÇÃO

Melhorar a eficiência energética das indústrias de alimentos pode ser um esforço complicado, considerando a diversidade de produtos fabricados e as tecnologias empregadas. Para cada tipo de produto, há uma série de tecnologias empregadas no processamento deste alimento e qualquer consideração de eficiência energética terá que ser feita dentro dos limites impostos ao produto em relação a sua qualidade e segurança (MANZINI; ACCORSI, 2012).

Além disso, são várias as operações que devem ser avaliadas, visto que as indústrias de biscoitos usam uma série de equipamentos como motores, fornos, compressores de ar e caldeiras que apresentam um grande consumo de energia e, portanto, precisam ser eficientemente operados (MASANET; THERKELSEN; WORRELL, 2012).

Existem várias opções para as indústrias de processamento de alimentos aumentar a eficiência energética, incluindo, grandes investimentos em equipamentos de economia de energia. Mas esse grande investimento muitas vezes é proibitivo, especialmente porque esbarra na falta de recursos por parte das empresas como tempo, pessoas e finanças (MIAH et al, 2014).

Portanto, a economia de energia começa quando todos na empresa reconhecem que a redução do uso de energia é um importante objetivo. Todos os níveis da organização, desde a alta gerência até os operadores, devem comprometer-se a melhoria contínua da eficiência energética (MASANET; THERKELSEN; WORRELL, 2012).

Ainda segundo Masanet; Therkelsen; Worrell (2012) é preciso olhar além do primeiro custo. Com eficiência energética, o retorno é proporcional ao seu investimento. É fundamental reconhecer que equipamentos e produtos eficientes podem custar à empresa inicialmente, mas que a economia obtida com o uso economizará mais dinheiro com o tempo.

3.5 METODOLOGIA DMAIC

Dentre as estratégias utilizadas para melhorar o desempenho de empresas, destaca-se o Seis Sigma que, de acordo com Werkema (2011), é uma estratégia gerencial quantitativa, que tem como objetivo, por meio da melhoria da qualidade dos produtos e processos e, da satisfação de clientes e consumidores, aumentar a lucratividade das empresas.

Seis Sigma é uma estratégia de negócios que é aplicável em todas as indústrias e está configurada para identificar e eliminar defeitos em qualquer processo, como produtos ou serviços (AHMAD et al, 2016).

Dentre as diversas ferramentas utilizadas no programa Seis Sigma, segundo Marshall Junior et al (2012), pode-se citar o mapeamento de processos, a análise de sistemas de medição e controle estatístico de processos (CEP), todas integradas na metodologia baseada no PDCA (plan, do, check and act), conhecida como DMAIC (*define, measure, analyze, improve and control*).

A metodologia DMAIC, aborda a resolução de problemas por meio de uma ampla gama de ferramentas de qualidade, analisando o processo, fornecendo diagnósticos, ajudando a eliminar o desperdício, organizar e simplificar os processos de trabalho (FURTERER, 2009).

A análise é vista por muitos como o passo mais importante na metodologia DMAIC. De acordo com Eckes (2003), isto é devido ao fato de que nesta etapa são

debatidas as ideias a partir de *Brainstorming* e, em muitos projetos, as equipes podem apresentar divergências sobre o que fazer para melhorar um processo.

A descrição das atividades e as ferramentas passíveis de aplicação em cada uma das etapas da metodologia DMAIC podem ser observadas na Tabela 2.

Tabela 2. Descrição das atividades da metodologia DMAIC.

	Descrição das atividades	Ferramentas passíveis de aplicação
D DEFINE (DEFINIR)	Definir o escopo do projeto de forma objetiva; Formar o time que irá trabalhar no projeto; Focar nos projetos mais relevantes e viáveis; Pensar nas melhorias que podem ser feitas.	Método de Brainstorming e a análise dos indicadores da empresa.
M MEASURE (MEDIR)	Levantar dados e informações; Determinar indicadores apropriados; Avaliar o desempenho do processo	Matrizes, como a de Causa e Efeito.
A ANALYZE (ANALISAR)	Levantar possíveis causas dos problemas; Analisar as melhores formas de contra-atacar as causas; Criar oportunidades de melhoria.	Método dos 5 Porquês;
I IMPROVE (MELHORAR)	Testar possíveis ações, observando os pós e contras; Executar o plano de ação de acordo com as necessidades de cada processo; Implementar as mudanças.	Método 5W2H; Matriz de priorização; Programa 5S.
C CONTROL (CONTROLAR)	Monitorar o plano de ação; Estabelecer critérios de controle (check-lists, estatísticas); Analisar o desempenho geral dos retornos. Buscar melhoria contínua dos procedimentos.	Cartas de controle; Check-lists; Estatísticas.

Fonte: Marshall Junior et al (2012), Petenate (2013).

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 MATERIAL

Este trabalho baseia-se em um estudo de caso realizado em uma indústria de alimentos, que além de outros produtos, tem seu foco voltado na produção de biscoitos.

Elaborou-se a estrutura conceitual teórica deste estudo por meio de pesquisa bibliográfica em livros, revistas e artigos científicos, o que permitiu fomentar a base teórica, identificar oportunidades de melhoria e consequentes restrições do processo.

Para a realização das análises propostas neste trabalho, utilizou-se ferramentas e equipamentos como lanterna, termômetro entre outros. Já em relação a necessidade da utilização de software para leitura e tratamento dos dados, foram utilizados Excel e Scilab.

4.2 MÉTODOS

Dentre as ferramentas existentes para controle de processos, optou-se pela utilização do DMAIC, que envolve uma sequência de atividades a serem desenvolvidas no intuito de melhorar as atividades que estão sendo analisadas.

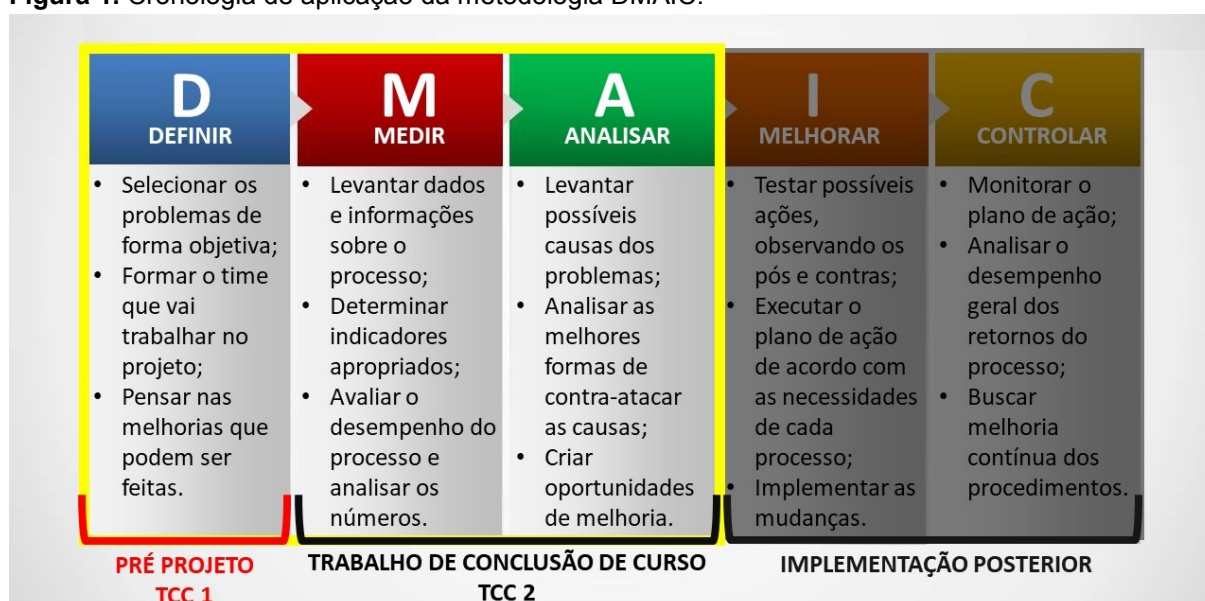
Partiu-se da identificação do problema, para então, traçar de forma clara os objetivos do projeto, definindo assim os resultados esperados com a sua realização. Sendo assim, buscou-se a compreensão do produto, foco do estudo, e o entendimento do processo produtivo, com visitas *in loco* na indústria, para acompanhar de perto a realidade atual.

Posteriormente, procurou-se identificar melhorias que poderiam ser implementadas para a otimização do processo em busca da redução do consumo específico de GLP no processo produtivo de biscoitos, através de *Brainstorming* realizadas entre o acadêmico e seu orientador.

Como citado neste trabalho, o DMAIC possui 5 (cinco) etapas, sendo o planejamento descrito acima a primeira dessas etapas, realizada na fase de pré-projeto.

As duas etapas posteriores (medir e analisar) foram executadas no decorrer desse trabalho e as duas últimas (melhorar e controlar) poderão ser desempenhadas posteriormente pela indústria caso haja interesse. Esta divisão de etapas pode ser visualizada na Figura 1.

Figura 1. Cronologia de aplicação da metodologia DMAIC.



Fonte: MARSHALL JUNIOR et al (2012), PETENATE (2013).

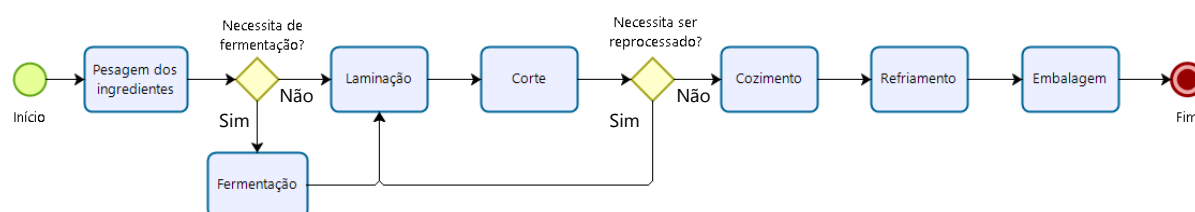
4.3 APLICAÇÃO DA METODOLOGIA DMAIC

Na primeira etapa da metodologia, o planejamento, foi identificado o problema, que é o alto consumo de GLP na produção de biscoitos, sendo sua redução apresentada como uma necessidade pela indústria.

Designou-se então a equipe encarregada pela execução do projeto, sendo esta composta pelo acadêmico responsável, seu professor orientador, juntamente com os representantes da empresa, sendo eles o gerente de manutenção e a analista de processos.

Na etapa de medir, foram realizadas as coletas de dados do processo por meio de visitas realizadas na empresa, em busca de indicadores apropriados para avaliar o desempenho atual do processo. Uma das primeiras análises foi a compreensão do fluxograma de processo (Figura 2).

Figura 2. Fluxograma do processo.



Fonte: Autoria própria (2019).

No que diz respeito às análises, os pontos descritos na Tabela 3 apresentaram-se como essenciais para um entendimento da situação atual do processo.

Tabela 3. Possíveis análises do processo.

Análise	Unidade de medida	Método de obtenção
Temperatura do forno, fornalha, ar de exaustão, lastro e teto.	Graus Celsius (°C).	Observação do controlador do forno.
Capacidade nominal do forno.	kg de gás/h.	Relatório fornecido pela empresa.
Consumo médio de gás atual.	kg de gás/h.	Relatório fornecido pela empresa.
Consumo específico de gás em determinado lote.	kg GLP/ton. produto	Relatório fornecido pela empresa.

Fonte: Autoria própria (2019).

Em termos de indicadores buscados, o atual consumo específico de GLP do processo (kg de GLP / ton. de produto), apresentado na Tabela 4, com seu

respectivo método de obtenção, serviu de base para a mensuração da eficiência energética do processo.

Tabela 4. Indicador da eficiência energética do processo.

Indicador	Unidade medida	Método de obtenção
Atual consumo de GLP do processo de cozimento;	Consumo específico (kg GLP/ton. produto)	Relatórios disponibilizados pela empresa.

Fonte: Autoria própria (2019).

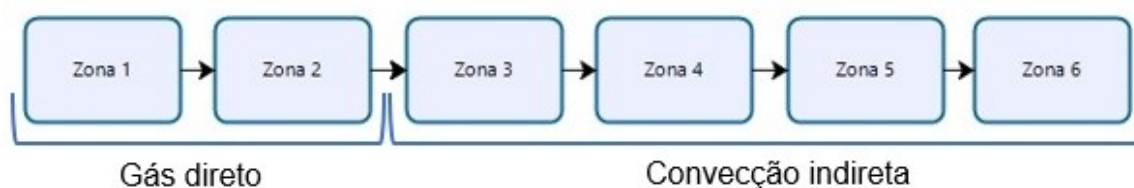
O acompanhamento visou uma melhor compreensão de pontos estratégicos do processo como: fluxo de ar dentro das zonas; resfriamento das esteiras; isolamento do forno; medidor de consumo de gás; quantidade de massa por hora (produtividade); tempo de cozimento e velocidade da esteira.

Os acessos a esses dados são essenciais para um melhor entendimento da real situação do processo atualmente, e a partir deles, a simulação de perfis de temperatura e modelagem do processo seja possível.

Na medida em que surgiram dúvidas em relação ao funcionamento do processo que acompanhavam, os mesmos se dirigiam a operadores que se faziam presentes para que se obtivesse a informação necessária.

Realizou-se as observações na linha de produção denominada por parte da indústria de forno 2.1, que apresenta 6 zonas dispostos em forma contínua, com funcionamento a partir do princípio de gás direto nas zonas 1 e 2 e por meio de convecção indireta nas zonas 3,4,5 e 6, como pode ser observado na figura 3.

Figura 3. Configuração do forno 2.1 nas diferentes zonas.



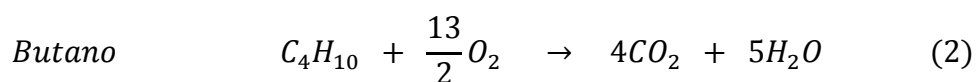
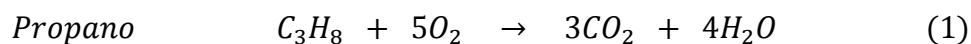
Fonte: Autoria própria (2019).

4.4 CÁLCULOS E EQUAÇÕES

4.4.1 Estequiometria da reação

O balanceamento das equações é feito levando-se em conta a conservação da massa dos elementos químicos, ou seja, para um determinado elemento, o número de átomos que existirá nos produtos de combustão é o mesmo número de átomos dos reagentes.

Segundo Bizzo (2003), o conhecimento das necessidades de ar para combustão, bem como da composição e volume dos produtos de combustão é fundamental para o projeto e controle de equipamentos de combustão. A estequiometria química do GLP (equações 1 e 2) nos fornece os principais dados necessários aos cálculos de combustão.



reagentes \rightarrow *produtos*

Qualquer combustível requer, de acordo com sua composição, uma quantidade específica de oxigênio e, portanto, de ar, uma vez que este é o agente comum de fornecimento para atingir teoricamente uma reação completa.

Neste estudo, utilizou-se 30% de ar em excesso em relação à quantidade de ar estequiométrica, chamada ar teórico, a fim de se garantir a combustão completa dos reagentes. Quando é fornecido ar em excesso, o ar excedente passa através do sistema, inalterado. O excesso de ar influencia tanto a eficiência térmica quanto o nível de emissão de poluentes (CO, SO_x, NO_x) das fornalhas.

4.4.2 Propriedades termofísica dos componentes dos alimentos e dos gases

O conhecimento das propriedades termofísicas é essencial para o projeto eficiente e econômico de operações de processamento de alimentos envolvendo transferência de calor.

O calor específico é definido como a quantidade de energia necessária para alterar em uma unidade de temperatura uma massa unitária de um material qualquer, sendo importante para se determinar a quantidade de energia a ser adicionada ou removida em processos de aquecimento e resfriamento (ARAÚJO, QUEIROZ e FIGUEIREDO, 2004).

Os componentes do biscoito incluem a água, proteínas, carboidratos, lipídios e cinzas e os valores das propriedades termofísicas destes componentes e dos gases, como o calor específico em função da temperatura estão disponíveis em Ibarz (2003).

Propriedades termofísica dos componentes dos alimentos:

$$cp_{H_2O} = 4,0195 + 0,576272 \cdot 10^{-3} T - 0,08304 \cdot 10^{-6} T^2 \quad [kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}] \quad (3)$$

$$cp_{PR} = 2,0082 + 1,2089 \cdot 10^{-3} T - 1,3129 \cdot 10^{-6} T^2 \quad [kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}] \quad (4)$$

$$cp_{CH} = 1,5488 + 1,962510^{-3} T - 5,9399 \cdot 10^{-6} T^2 \quad [kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}] \quad (5)$$

$$cp_{LI} = 1,0082 + 1,4733 \cdot 10^{-3} T - 4,8008 \cdot 10^{-6} T^2 \quad [kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}] \quad (6)$$

$$cp_{CZ} = 1,0926 + 1,8896 \cdot 10^{-3} T - 3,6817 \cdot 10^{-6} T^2 \quad [kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}] \quad (7)$$

Propriedades termofísica dos gases:

$$cp_{vapor} = 8.314 * (3.470 + 1.450 * e^{-3} * T + 0.121 * e^5 * T^{-2}) \quad [J/(mol \cdot K)] \quad (8)$$

$$cp_{CO_2} = 8.314 * (5.457 + 1.045 * e^{-3} - 1.157 * e^5 * T^{-2}) \quad [J/(mol \cdot K)] \quad (9)$$

$$cp_{O_2} = 8.314 * (3.639 + 0.506 * e^{-3} * T - 0.227 * e^5 * T^{-2}) \quad [J/(mol \cdot K)] \quad (10)$$

$$cp_{N_2} = 8.314 * (3.280 + 0.593 * e^{-3} * T + 0.040 * e^5 * T^{-2}) \quad [J/(mol \cdot K)] \quad (11)$$

4.4.3 Formulação e composição química do biscoito de leite

Para a realização dos cálculos, necessitou-se da formulação de uma receita de biscoito. A formulação utilizada está disponível em Davidson (2016).

Tabela 5. Formulação e composição química do biscoito de leite.

Componente	Quantidade	Composição
Farinha	100 kg	8% proteína, 15% umidade e 77% carboidrato
Açúcar	29,5 kg	0,3% umidade e 99,7% Carboidratos
Gordura	19,5 kg	100% gordura
Leite	2,35 kg	1,5% Lipídeos, 52,0% carboidratos, 36,2% de proteína, 4% de água, 3,6% minerais
Cinzas	0,58 kg	Bicarbonato
	1,10 kg	Sal

Fonte: Adaptado de DAVIDSON (2016).

4.4.4 Cálculo das frações mássica

A fração mássica ou fração em massa de um constituinte de uma mistura é o quociente entre a massa desse constituinte e a soma das massas de todos os constituintes da mistura (LIMA, 2014).

$$X_{\text{soluto}} = \frac{m_{\text{soluto}}}{m_{\text{total}}} = \frac{m_{\text{soluto}}}{\sum m_{\text{constituintes}}} \quad (12)$$

onde m_{soluto} representa a massa de soluto, m_{total} ou $\sum m_{\text{constituintes}}$ representa a soma das massas de todas as substâncias presentes na solução ou na mistura.

Desta forma, calculou-se as frações mássicas dos componentes do biscoito (equações 13 a 17) para utilização no cálculo do consumo de energia.

$$X_{H_2O} = (\text{água} + \text{farinha} \cdot 0.15 + \text{açúcar} \cdot 0.003 + \text{leite} \cdot 0.04) / \text{TOTAL} \quad (13)$$

$$X_{CH} = (\text{farinha} \cdot 0.77 + \text{açúcar} \cdot 0.997 + \text{leite} \cdot 0.52) / \text{TOTAL} \quad (14)$$

$$X_{PR} = (\text{farinha} \cdot 0.08 + \text{leite} \cdot 0.362) / \text{TOTAL} \quad (15)$$

$$X_{LP} = (\text{gordura} + \text{leite} \cdot 0.015) / \text{TOTAL} \quad (16)$$

$$X_{CZ} = (\text{cinza} + \text{leite} \cdot 0.036) / \text{TOTAL} \quad (17)$$

4.4.5 Energia de evaporação

Um elemento importante no uso de energia é fornecer o calor latente de evaporação. De modo a evaporar a umidade na massa (14% em peso de massa) até um teor final de umidade de 3,0%, é necessário calor latente para vaporizar a água e calor sensível para aquecer o vapor de água até a temperatura de cozimento. A energia térmica necessária para evaporar a água do produto é apresentada na equação 18:

$$E_s = m_{ae} * 2257 + \frac{m_{ae}}{18,04} \int_{100+273,15}^{285+273,15} cp_{H_2O} dT \quad (18)$$

4.4.6 Energia para aquecer o biscoito de 40°C até 100°C

A energia necessária para elevar a temperatura dos ingredientes secos de 40°C a 100°C é apresentada na equação 19:

$$E_{ai} = m_{bi} * X_{H_2O} \int_{40+273,15}^{100+273,15} cp_{H_2O} dT + X_{CH} \int_{40+273,15}^{100+273,15} cp_{CH} dT + X_{PR} \int_{40+273,15}^{100+273,15} cp_{PR} dT \\ + X_{LI} \int_{40+273,15}^{100+273,15} cp_{LP} dT + X_{CZ} \int_{40+273,15}^{100+273,15} cp_{CZ} dT \quad (19)$$

4.4.7 Energia para cozer o biscoito de 100°C até 180°C

A energia necessária para elevar a temperatura dos ingredientes secos de 100°C a 180°C é apresentada na equação 20:

$$E_{af} = m_{bi} * X_{H_2O} \int_{100+273,15}^{180+273,15} cp_{H_2O} dT + X_{CH} \int_{100+273,15}^{180+273,15} cp_{CH} dT + X_{PR} \int_{100+273,15}^{180+273,15} cp_{PR} dT \\ + X_{LI} \int_{100+273,15}^{180+273,15} cp_{LP} dT + X_{CZ} \int_{100+273,15}^{180+273,15} cp_{CZ} dT \quad (20)$$

4.4.8 Energia total no processo de cozimento

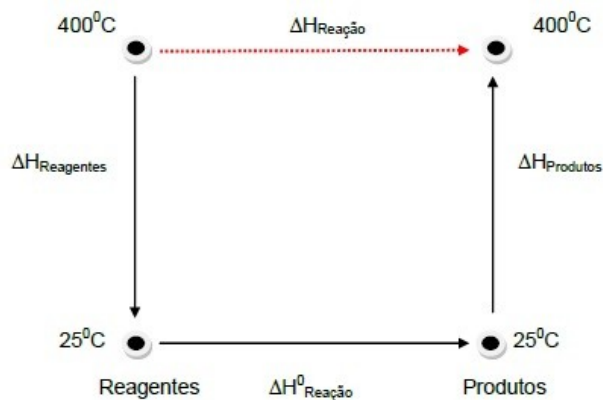
A energia total necessária para o processo de cozimento do biscoito é o somatório da energia de evaporação da água (eq. 18), energia para aquecer o biscoito de 40°C até 100°C (eq. 19) e a energia para cozer o biscoito de 100°C até 180°C (eq. 20) e é apresentado a seguir pela equação 21:

$$EC = E_s + E_{ai} + E_{af} \quad (21)$$

4.4.9 Cálculo do consumo de gás para fornecer a energia EC

Para o cálculo do consumo de gás, foi necessário primeiramente calcular a entalpia de combustão, que é obtida pela soma das entalpias de reagentes, reação química e produtos, como pode ser observado na figura 4.

Figura 4. Diagrama da entalpia de combustão.



Fonte: SMITH; VAN NESS; ABBOTT (2007).

Para tanto, necessitou-se dos valores do número de mols do combustível, que é constituído por duas partes iguais (50%) de propano e butano em massa, como também do número de mols dos componentes do ar tanto nos reagentes como nos produtos. Esses cálculos são encontrados nas equações 22 a 30.

$$\text{excesso} = 0.30 \text{ // Ar de excesso igual a } 30\% \quad (22)$$

$$n_{\text{prop}} = (m \cdot 0.5) / 44.097 \text{ // número de mols de propano (50\% na mistura)} \quad (23)$$

$$n_{\text{but}} = (m \cdot 0.5) / 58.123 \text{ // número de mols de butano (50\% na mistura)} \quad (24)$$

$$n_{\text{O}_2\text{R}} = (n_{\text{prop}} \cdot 5 + n_{\text{but}} \cdot 6.5) \cdot (1 + \text{excesso}) \text{ // mols O}_2 \text{ reagente} \quad (25)$$

$$n_{\text{N}_2\text{R}} = n_{\text{O}_2\text{R}} \cdot (0.79 / 0.21) \cdot (1 + \text{excesso}) \text{ // mols N}_2 \text{ reagentes} \quad (26)$$

$$n_{\text{CO}_2\text{P}} = n_{\text{prop}} \cdot 3 + n_{\text{but}} \cdot 4 \text{ // mols CO}_2 \text{ produtos} \quad (27)$$

$$n_{\text{H}_2\text{OP}} = n_{\text{prop}} \cdot 4 + n_{\text{but}} \cdot 5 \text{ // mols de H}_2\text{O formado} \quad (28)$$

$$n_{\text{O}_2\text{P}} = (n_{\text{prop}} \cdot 5 + n_{\text{but}} \cdot 6.5) \cdot \text{excesso} \text{ // mols O}_2 \text{ produtos} \quad (29)$$

$$n_{\text{N}_2\text{P}} = n_{\text{O}_2\text{R}} \cdot (0.79 / 0.21) \cdot (1 + \text{excesso}) \text{ // mols N}_2 \text{ produtos} \quad (30)$$

O cálculo da entalpia dos reagentes é apresentado pela equação 31.

$$\Delta H_{reagentes} = nO_2R \int_{T_i+273,15}^{25+273,15} cp_{O_2} dT + nN_2R \int_{T_i+273,15}^{25+273,15} cp_{N_2} dT \quad (31)$$

O cálculo da entalpia da reação é apresentado pela equação 32.

$$\Delta H^0_{reação} = n_{prop} \Delta H_{prop}^{combustao} + n_{but} \Delta H_{but}^{combustao} \quad (32)$$

O cálculo da entalpia dos produtos é apresentado pela equação 33.

$$\begin{aligned} \Delta H_{produtos} = & nCO_2P \int_{25+273,15}^{T_f+273,15} cp_{CO_2} dT + nH_2OP \int_{25+273,15}^{T_f+273,15} cp_{steam} dT \\ & + nO_2P \int_{25+273,15}^{T_f+273,15} cp_{O_2} dT + nN_2P \int_{25+273,15}^{T_f+273,15} cp_{N_2} dT \end{aligned} \quad (33)$$

A entalpia de combustão é apresentada na equação 34 com a somatória das entalpias dos reagentes, reação e produtos.

$$\Delta H_{reação} = \Delta H_{reagentes} + \Delta H^0_{reação} + \Delta H_{produtos} \quad (34)$$

Para os cálculos do consumo de gás ($m_{gás}$) para fornecer a energia total necessária (EC), foram utilizados métodos iterativos de cálculo numérico (equação 35), que podem ser encontrados na íntegra no Apêndice A deste trabalho. Suas resoluções também contaram com o auxílio do algoritmo desenvolvido no Scilab.

$$Q = \Delta H_{combustão} (m_{gás}, T_i, T_f) \quad (35)$$

4.4.10 Algoritmo Scilab

Todas as equações apresentadas no tópico 4.4 foram utilizadas para os cálculos de energia necessária para o cozimento do biscoito e o consumo de gás do processo. Estes cálculos foram realizados tanto para os parâmetros atuais de processo como também com as alterações de parâmetros propostas pelos pesquisadores, de acordo com as análises feitas ao longo deste projeto. Para a realização desses, foi desenvolvido um algoritmo no software Scilab, que é apresentado na íntegra no Apêndice A.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 ANÁLISES DO PROCESSO

A fim de se analisar o perfil de temperatura dos fornos, as temperaturas de set point e real no momento da observação apresentadas no visor dos controladores podem ser observadas na Tabela 6.

Tabela 6. Temperaturas das zonas do forno 2.1.

		Set Point	Real
Zona 1	Temperatura do teto	280°C	323°C
	Temperatura do lastro	265°C	265°C
Zona 2	Temperatura do teto	300°C	318°C
	Temperatura do lastro	310°C	-
Zona 3	Temperatura da zona	279°C	281°C
	Temperatura da fornalha	-	453°C
Zona 4	Temperatura da zona	290°C	292°C
	Temperatura da fornalha	660°C	500°C
Zona 5	Temperatura da zona	293°C	-
	Temperatura da fornalha	660°C	500°C
Zona 6	Temperatura da zona	255°C	262°C
	Temperatura da fornalha	409°C	550°C

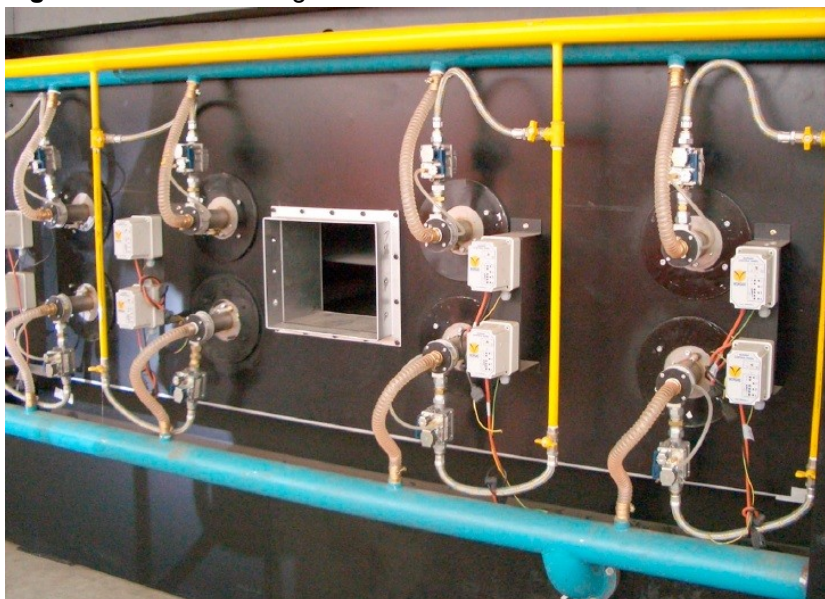
Fonte: Autoria própria (2019).

Ao analisar-se a tabela 6, verifica-se que as temperaturas empregadas no processo produtivo de biscoitos são consideravelmente altas, justificando o alto consumo de gás na etapa de cozimento e estudos que buscam a otimização do processo.

Foi possível observar que o controle de temperatura é realizado por inversores de frequência que controlam a velocidade do ar. O gás é injetado por efeito venturi no misturador, fazendo com que tenha sempre a mesma proporção de combustível e comburente (gás e ar).

Na figura 4 é possível visualizar uma instalação de queimadores com princípios de gás direto, com as tubulações de gás em amarelo, tubulações do ar de combustão em azul, válvulas de gás, misturadores de gás e ar.

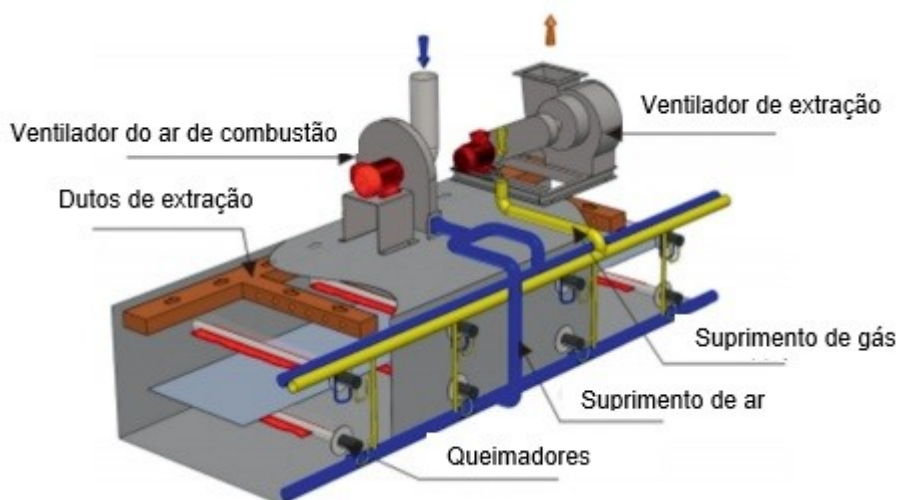
Figura 5. Queimadores gás indireto encontrados nas zonas 1 e 2.



Fonte: DAVIDSON (2016).

Já a figura 5 apresenta a distribuição de calor no interior dos fornos com princípio de gás direto, como encontrado nas zonas 1 e 2 da linha de produção observada.

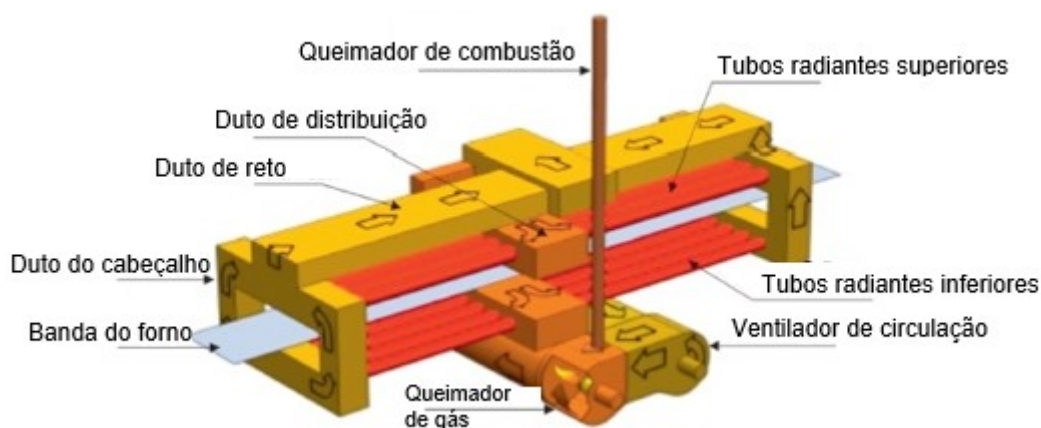
Figura 6. Representação do fluxo nas Zonas 1 e 2 do forno.



Fonte: DAVIDSON (2016).

Na zona 3, observou-se a caldeira seca (fornalha), com o princípio de ciclo térmico, injetando o ar apenas na câmara, que é responsável por gerar o calor para toda a zona. A fornalha apresenta duas válvulas, fogo alto e fogo baixo, possuindo três alarmes de segurança: para bloqueio do fogo alto (565°C), temperatura alta (570°C) e desligar o queimador (575°C). A mesma apresenta uma bomba injetora de ar para o sistema, uma bomba que suga uma quantidade de ar para a exaustão, e outra parte é recirculada. Observou-se que o ar de combustão entra a temperatura ambiente e a pressão do gás é de 300 mm de coluna de água.

Figura 7. Forno baseado no sistema de aquecimento indireto.



Fonte: DAVIDSON (2016).

Foi possível observar dois estágios para os queimadores, o queimador piloto, e o queimador de segundo estágio que trabalha ligando e desligando. Comentou-se sobre a oportunidade de melhoria na eficiência energética com a troca dos queimadores de primeiro e segundo estágio por queimadores modulares.

Constatou-se que a capacidade nominal do forno é de 115 kg de gás/h e que a média de consumo apresentado gira em torno de 84 a 85 kg de gás/h. O indicador utilizado para o processo é o consumo específico do GLP, ou seja, kg de gás consumido / tonelada de produto produzido.

Um aspecto que chamou a atenção foi a não uniformidade no processo de cozimento na linha de produção denominada de 2.1 pela indústria, onde os biscoitos assavam excessivamente em um lado da esteira, onde saíam mais escuros, enquanto que do outro lado saíam na cor perto de padrão, e enquanto se fazia a regulagem do processo, produziu-se uma quantidade de produtos defeituosos. Um correto ajuste desde o início do processo reduz retrabalhos e como consequência aumenta a eficiência energética (kg de gás consumido / tonelada de produto produzido).

Em seguida, observou-se que as demais zonas (zonas 3, 4, 5 e 6) são baseadas no princípio de aquecimento indireto, onde cada uma delas conta com uma fornalha com queimador Riello - 40, onde é realizada a combustão, e este calor é distribuído ao longo do forno por tubos cilíndricos.

Também se teve acesso a planilhas que controlam o consumo de gás da produção e a quantidade de massa que entram para cozimento e que saem do forno assados de diferentes lotes.

Como exemplo, observou-se a produção de determinado lote de biscoitos de leite, onde 34.658,02 kg de massa entraram nos fornos e após cocção saíram 29.113,82 kg de biscoitos assados. Com um consumo de 1.403,3 kg de gás para realizar esta operação, chega-se em um consumo específico em torno 48,2 kg de GLP/tonelada de produto. Também se observou que para a realização do cozimento deste lote, mais de 5,5 mil kg de água foram evaporados para chegar em um produto com 3% de umidade.

Os dados coletados na observação foram de grande valia para o entendimento do processo e para que pudessem ser feitas modelagens visando sua otimização.

5.2 OPORTUNIDADES DE MELHORIA

Observou-se que se rejeita calor no ventilador de extração a uma temperatura elevada, considerando que as temperaturas no teto das zonas 1 e 2 da linha de produção 2.1 é superior a 320 °C e das zonas 3,4,5 e 6 superiores 500°C.

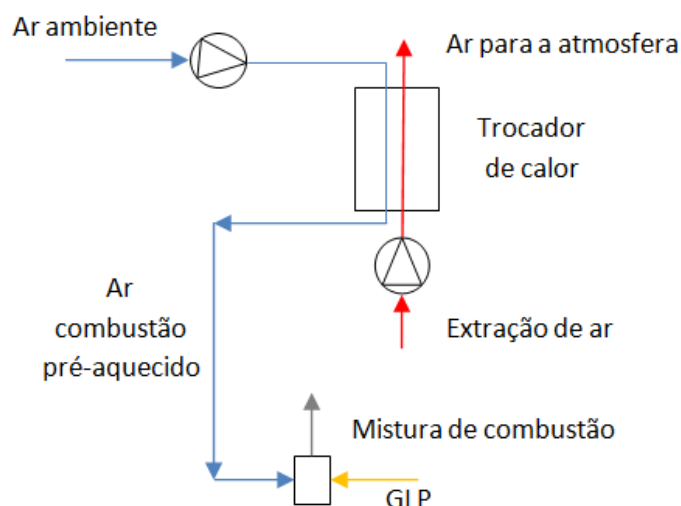
Em balanços de massa e energia preliminares observou-se que o calor rejeitado corresponde a aproximadamente 10% do calor utilizado nestas zonas. As oportunidades de melhorias nestas etapas que podem ser estudadas são:

- Estudar a regulagem da extração de ar quente. Observou-se a existência de sistema de regulagem, mas aparentemente estavam todos 100% abertos e uma minimização da extração de ar quente implica em menor perda de calor.

- Estudar a possibilidade de pré-aquecer o ar de combustão com o ar que é extraído. Verificou-se que o ar de combustão pode ser aquecido até 300°C (zonas 1 e 2) e 480°C (zonas 3,4,5 e 6).

Sabendo que para cada 20 °C de pré-aquecimento do ar de combustão é possível economizar 1% de combustível, sugere-se a implementação de trocadores de calor nas zonas 1 e 2 para que seja feita o reaproveitamento da energia que é desperdiçada na extração do ar de exaustão. Sendo assim, propõem-se a troca de calor entre o ar de exaustão e o ar de entrada para combustão, como pode ser observado na figura 8.

Figura 8. Proposta de recuperação de calor nas Zonas 1 e 2.



Fonte: Autoria própria (2019).

Para isso, também seria necessário realizar a troca dos queimadores de gás diretos das zonas 1 e 2 por queimadores que permitam trabalhar com as temperaturas de pré-aquecimento sugeridas, como também queimadores que façam a regulação estequiométrica da mistura de combustível e comburente (figura 9), visando a queima completa do gás, aumentando assim a eficiência da combustão. Os queimadores de gás direto encontrados atualmente nos fornos não permitem trabalhar com temperaturas elevadas como também não apresentam esta regulação.

Figura 9. Queimador com regulação estequiométrica.



Fonte: Adaptado de DAVIDSON (2016).

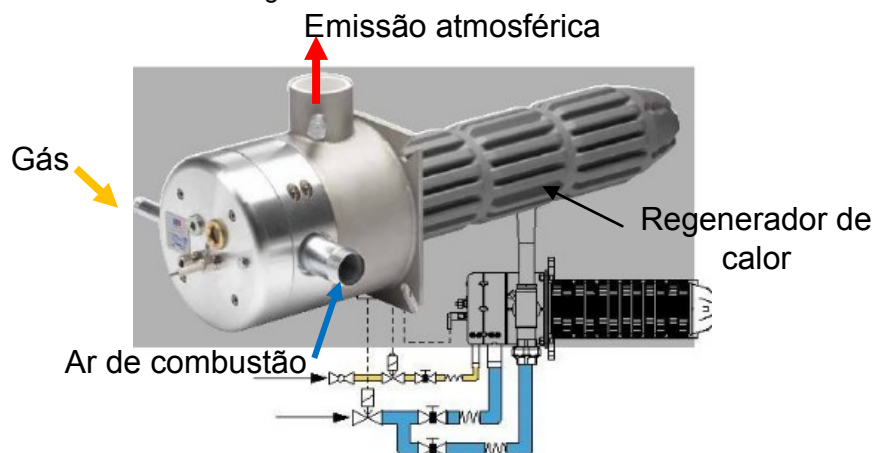
Verificou-se que a temperatura de ignição do GLP é superior a $400\text{ }^{\circ}\text{C}$, não existindo risco de combustão no misturador que causaria explosão (PETROBRAS, 2015).

Schwotzer et al. (2018) sugere utilizar os gases de combustão das emissões atmosféricas da fornalha para aquecimento de uma zona, mas em análise preliminar verifica-se ser inviável, pois o forno não possui as zonas 7 e 8 e desligar o queimador das zonas 5 e 6 e alimentar os tubos desta zona com “Burner flue” da fornalha anterior acarretará em perda de capacidade de produção.

A alternativa viável é estudar o pré-aquecimento do ar de combustão, que poderia ser pré-aquecido até aproximadamente $300\text{ }^{\circ}\text{C}$, porém o queimador utilizado atualmente, não permite esta operação, e deveria ser substituído por um queimador

que permite trabalhar com ar pré-aquecido, como um queimador regenerativo (Figura 10).

Figura 10. Queimador Regenerativo.



Fonte: Adaptado de WESMAN THERMAL ENGINEERING PROCESSES (2018).

A figura 10 apresenta a imagem de um queimador regenerativo, onde os gases de exaustão da fornalha são eliminados pelo próprio queimador, porém pré-aquecem a mistura de combustão antes de tornarem-se emissões atmosféricas. Para emissões atmosféricas, onde a fornalha está em temperatura próxima de 500 °C, estima-se economia de aproximadamente 20% de combustível.

Em seu estudo, Davidson (2016) apresenta a distribuição do consumo de energia no forno, exposto na Tabela 8. Observa-se que o presente estudo sugere alterações do processo, sendo elas, energia aplicada para o produto, perda de calor na extração e perda de calor na banda de retorno. Somados, esses parâmetros representam 81% da energia empregada no processo.

Tabela 7. Distribuição do consumo de energia no forno.

Para o produto	56%
Perda de calor da extração	18%
Perda de calor de condutas de queimador	7%
Perda de calor da banda de retorno	7%
Perda de calor estimada do ar da extremidade do forno	6%
Perda estimada de metal, ventiladores, etc.	3%
Perda de calor através do isolamento	2%
Perda de calor da radiação no final do forno	1%
TOTAL	100%

Fonte: Davidson (2016).

Portanto, pode-se verificar que 19% do consumo de energia do processo ainda pode ser trabalhado a fim de se otimizar a eficiência no consumo de gás no processo. Com auxílio do algoritmo do Scilab, apresentado no Apêndice A, obteve-se o consumo de energia total (equação 21) no processo de cozimento do biscoito.

$$\mathbf{EC: 348,96295 \text{ kWh}} \quad (36)$$

A fins de análise da eficiência do processo, apresenta-se o consumo de energia do processo específico ($EC_{\text{específico}}$) para comparação entre lotes com diferentes quantidades de biscoitos processados (equações 37 a 39).

$$EC_{\text{específico}}: EC / \text{ton. de biscoito} \quad (37)$$

$$EC_{\text{específico}}: EC / 1,8 \text{ ton. de biscoito} \quad (38)$$

$$\mathbf{EC_{\text{específico}}: 193,868 \text{ kWh / ton. de biscoito}} \quad (39)$$

No estudo de Davidson (2016), observou-se um consumo específico de energia de 168 kWh / ton. de biscoito de leite, valor que corrobora com o resultado obtido através dos cálculos realizados no presente estudo.

Considerando o consumo específico de energia ($EC_{\text{específico}}$) aplicado aos parâmetros atuais de processo, ou seja, o ar de combustão com entrada a temperatura ambiente da indústria (40°C), obtêm-se o consumo de gás atual (equação 40) com o auxílio do código desenvolvido no Scilab (Apêndice A).

$$\mathbf{\text{Consumo de gás atual: } 37,219172 \text{ kg/h}} \quad (40)$$

Como apresentado anteriormente como sugestão para otimização e aumento da eficiência do processo, a seguir Tabela 7, projeta-se as temperaturas alcançadas pelo ar de combustão com a implementação de trocadores de calor, em contracorrente.

Tabela 8. Temperaturas atingida com a troca de calor.

Zona	Temperatura do ar ambiente	Temperatura do ar de exaustão	Temperatura atingida com a troca de calor
1 e 2	40°C	320°C	300°C
3 e 4	40°C	500°C	480°C
5 e 6	40°C	500°C	480°C

Fonte: Aatoria própria (2019).

Sendo assim, considerando o consumo específico de energia ($EC_{\text{específico}}$) aplicado aos parâmetros otimizados de processo, ou seja, com o ar de combustão aquecido por meio de troca de calor com o ar de exaustão de cada zona, obtêm-se um consumo de gás de:

$$\text{Consumo de gás simulado: } 28,273805 \text{ kg/h} \quad (41)$$

Comparando os consumos específicos de gás do processo com os parâmetros atuais e os parâmetros de otimização sugeridos, temos:

$$\begin{array}{l} \text{Parâmetros atuais} \\ \text{(Ar ambiente)} \end{array} \quad \frac{\text{Kg GLP}}{\text{ton. de biscoito}} = \frac{37,219172}{1,8} = 20,68 \frac{\text{Kg GLP}}{\text{ton. de biscoito}} \quad (42)$$

$$\begin{array}{l} \text{Parâmetros otimizados} \\ (43) \\ \text{(Ar aquecido)} \end{array} \quad \frac{\text{Kg GLP}}{\text{ton. de biscoito}} = \frac{28,273805}{1,8} = 15,71 \frac{\text{Kg GLP}}{\text{ton. de biscoito}}$$

Dessa forma, é possível calcular a eficiência obtida por meio da implementação das sugestões propostas:

$$\% \text{ de economia no consumo de gás} = \frac{20,68 - 15,71}{20,68} = 24\% \quad (44)$$

Desse modo pode-se observar que através das alterações sugeridas é possível reduzir em praticamente 1/4 (um quarto) do consumo de gás do processo. Para tanto, é importante ressaltar que há a necessidade da realização de

investimentos por parte da indústria na aquisição de equipamentos, com a implementação de trocadores de calor nas zonas 1 e 2 e a troca dos queimadores de gás direto destas mesmas zonas, como também a troca dos queimadores das fornalhas por queimadores regenerativos.

6 CONCLUSÃO

Ao analisar-se o perfil de temperatura dos fornos, verificou-se que as temperaturas empregadas no processo produtivo de biscoitos são consideravelmente altas, justificando o alto consumo de gás na etapa de cozimento e a realização de estudos como este que buscam a otimização do processo.

A partir disso verificou-se a oportunidade de reaproveitamento da energia térmica desperdiçada nos dutos de ar de exaustão, realizando-se a troca de calor com a tubulação do ar de entrada, originando o pré-aquecimento do ar de combustão. Esse pré-aquecimento do ar de combustão apresentou-se como a medida de redução no consumo de GLP sugerida.

Desta forma, com a implementação das sugestões a partir das medidas de redução propostas, identificou-se a oportunidade da redução do consumo de combustível GLP, em 24% com a simulação de alterações do processo. No entanto é importante ressaltar que há a necessidade da realização de investimentos por parte da indústria na aquisição de equipamentos.

As sugestões de alterações propostas no estudo, abrangem em média, 81% da energia consumida para o cozimento do biscoito. Sendo assim, existe ainda a possibilidade de se atuar nos outros 19% do consumo de energia, ficando como sugestão de estudo posterior.

Apresenta-se também como sugestão de estudo futuro, como complemento deste trabalho, a análise da viabilidade econômica da implementação das melhorias propostas, considerando-se o impacto financeiro entre o valor mensal gasto com gás e o valor necessário de investimento em equipamentos por parte da indústria, avaliando o *payback* do projeto.

REFERÊNCIAS

ABIMAPI, Associação Brasileira das Indústrias de Biscoitos, Massas Alimentícias, Pães & Bolos Industrializados; NIELSEN, Consultoria. **ABIMAPI registra estabilidade do setor em 2017**. Investimentos e notícias. 2018. Disponível em: <<http://www.investimentosenoticias.com.br/noticias/negocios/abimapi-registra-estabilidade-do-setor-em-2017>>. Acesso em: 03 maio 2018.

AHMAD, M. F., PING, W. J., HAMID, N. A. A., CHAN, S. W. **Critical Success Factors of Six Sigma Implementation in Malaysian Manufacturing Industry**. International Conference on Industrial Engineering and Operations Management, 2016.

ARAÚJO, J. L., QUEIROZ, A. J. M., FIGUEIREDO, R. M. F. **Propriedades termofísicas da polpa do cupuaçu com diferentes teores de sólidos**. Ciência Agrotécnica. Lavras, v.28, n.1, p.126-134, 2004.

AZEVEDO, R. G. **Melhoria do forneamento de biscoitos em forno á lenha com processo em batelada**. 2007. Dissertação (Mestrado em Sistemas e Processos Industriais) - Universidade de Santa Cruz do Sul, Santa Cruz do Sul, 2007.

BALAJI, N. **Modelling of transient temperature distribution during bread baking by finite difference analysis**. B.Tech Thesis, IIT, Kharagpur, India, 1991.

BIZZO, W. **Geração, Distribuição e Utilização de Vapor**: Cap. 1 - Combustão. Faculdade de Engenharia de Alimentos - FEA: UNICAMP, Campinas, 2003.

BRASIL. Ministério da Saúde. RDC nº 263, de 22 de setembro de 2005: **Regulamento técnico para produtos de cereais, amidos, farinhas e farelos**. Diário Oficial da União, Brasília, 2005. Disponível em: <http://bvsms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/anvisa/2005/rdc0263_22_09_2005.html>. Acesso em: 18 maio 2018.

BROYART, B., TRYSTRAM, G. **Modelling heat and mass transfer during the continuous baking of biscuits**. Journal of Food Engineering. v. 51, n. 1, p. 47-57, 2002.

CAUVAIN, S. P. **Cookies, Biscuits and Crackers: Formulation, Processing and Characteristics**. 2. ed. [s.l.] Elsevier Ltd., 2015. v. 3–4

DAVIDSON, I. **Biscuit baking technology**: Processing and Engineering Manual. 2. ed. Londres: Elsevier, 2016. 327 p.

ECKES, G. **Praise for George Eckes and Six Sigma for Everyone**. (I. John Wiley & Sons, Ed.), *Director*. New Jersey, 2003. 143p.

EL-DASH, A.A.; CAMARGO, C.O.; DIAZ, N.M. **Fundamentos da tecnologia de panificação**. São Paulo: Secretaria da Indústria, Comércio e Tecnologia, p. 1-243. 1982.

EUA, Department of Energy's Office of Energy Efficiency., BCS, Incorporated. **Waste Heat Recovery: Technology Opportunities in the US Industry**, p. 1–112, 2008.

FRANK, P. 2012. **Energy efficiency yields high returns on investment**, Jun 2009. Available from http://baking-management.com/production_solutions/energy_efficiencyyields-high-0609/index.html.

FURTERER, S. L. **Lean Six Sigma in Service**. Florida-Orlando, CRC Press, Boca Raton, 2009. 465 p.

GIL, A. C. **Método e técnicas de pesquisa social**. 6^a. ed. Atlas. São Paulo, 2008.

GRANOTEC do Brasil. **Tecnologia de biscoitos, qualidade de farinhas e função de ingredientes**. Curitiba: Apostila do curso, 2000.

GONÇALVES, F. dos S. **Petróleo e combustíveis industriais : mercado e aplicações**. Trabalho de conclusão de curso em engenharia química. Porto Alegre, 2010. 32 p.

HERZOG, C. **Segmento de recheados**: Estudo exploratório. São Paulo: Instituto Clarice Herzog Associados, 2000.

IBARZ, A., BARBOSA-CANOVAS, G., **Unit Operation in Food Engineering**, Editora CRC, Boca Raton: Flórida - EUA, 2003.

INSPER, Instituto de ensino superior e pesquisa. **O que é um estudo de caso?**: Coleção de Casos Insper. 2018. Disponível em: <<https://www.insper.edu.br/casos/estudo-caso/>>. Acesso em: 19 maio 2018.

KHATIR, Z., PATON, J., THOMPSON, H., KAPUR, N., TOROPOV, V. **Optimisation of the energy efficiency of bread-baking ovens using a combined experimental and computational approach**. Applied Energy, v. 112, p. 918–927, 2013.

LE BAIL, A., DESSEV, T., JURY, V., ZUNIGA, R., PARK, T., & PITROFF, M. **Energy demand for selected bread making process: conventional versus part baked frozen technologies**. Journal of Food Engineering, v. 96, n. 4, p. 510-519, 2010.

LIMA, L. S. **Fração mássica e percentagem mássica**. Revista de Ciência Elementar, v. 2, n. 4, 30 dez. 2014. ICETA. <http://dx.doi.org/10.24927/rce2014.309>.

MANZINI, R.; ACCORSI, R. **The new conceptual framework for food supply chain assessment**. Journal of Food Engineering, v. 115, n. 2, p. 251–263, 2013. Elsevier Ltd. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2012.10.026>>.

MARSHALL JUNIOR, I., ROCHA, A. V., MOTA, E. B., QUINTELLA, O. M. **Gestão da qualidade e processos**. Série gestão empresarial. Rio de Janeiro. p. 204, 2012.

MASANET, E.; THERKELSEN, P.; WORRELL, E. **Energy efficiency improvement and cost saving opportunities for the pharmaceutical industry**. Environmental Protection, , n. September, 2005.

MCFARLANE, I. **New method for computer management of baking ovens.** Food Control, v. 1, n. 2, p. 111-116, 1990.

MCMULLEN, E. 2012. **Retooling for improved efficiency.** Baking Management 2010. Available from http://bakingmanagement.com/production_solutions/retoolingimproved-performance-0510/index.html.

MIAH, J. H.; GRIFFITHS, A.; MCNEILL, R.; POONAJI, I., MARTIN, R., YANG, A., MORSE, S. **Heat integration in processes with diverse production lines: A comprehensive framework and an application in food industry.** Applied Energy, v. 132, p. 452–464, 2014. Elsevier Ltd. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.07.027>>.

MONDAL, A.; DATTA, A. K. **Bread baking - A review.** Journal of Food Engineering, v. 86, n. 4, p. 465–474, 2008.

MONTEIRO, C. A. **Nutrition and health. The issue is not food, nor nutrients, so much as processing.** Public Health Nutrition, v. 12, n. 5, p. 729–731, 2009.

PAREYT, B., DELCOUR, J. A. **The role of wheat flour constituents, sugar, and fat in low moisture cereal based products: a review on sugar-snap cookies.** Critical Reviews in Food Science and Nutrition, v. 48, p. 824-839, 2008.

PASK, F., LAKE P., YANG, A., TOKOS, H., SADHUKHAN J. **Industrial oven improvement for energy reduction and enhanced process performance.** Clean Technologies and Environmental Policy, v. 19, n. 1, p. 215–224, 2017.

PETENATE, M. **O que é o roteiro DMAIC no Lean Six Sigma.** 2013. Disponível em: <<http://www.escolaedti.com.br/roteiro-dmaic/>>. Acesso em: 06 maio 2018.

PETROBRAS, Liquigás. **Ficha de Informações de Segurança de Produto Químico - FISPQ.** 2015. Disponível em: <https://www.liquigas.com.br/wps/wcm/connect/a94a95004640d0be8ce7cddd2947447b/GLP_27_05_15.pdf?MOD=AJPERES&CACHEID=ROOTWORKSPACE-a94a95004640d0be8ce7cddd2947447b-kG6Kw2G>. Acesso em: 27 maio 2015.

PURLIS, E., SALVADORI, V. O. **Bread browning kinetics during baking.** Journal of Food Engineering, v. 80, n. 4, p. 1107-1115, 2007.

ROIHA, I. KAIKKO, J., JAANU, K., VAKKILAINEN, E. **Analysis of high flue gas recirculation for small energy conversion systems.** Applied Thermal Engineering, Lappeenranta, Finland, v. 63, n. 1, p.218-226, fev. 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2013.10.062>.

SABLANI, S.S., MARCOTTE M., BAIK, O.D., CASTAIGNE, F. **Modeling of simultaneous heat and water transport in the baking process.** Food science Technology, v. 31, p. 201–209, 1998.

SCHWOTZER, C.; SCHNITZLER, M.; PFEIFER, H. **Low scale reheating of semi-**

finished metal products in furnaces with recuperative burners. Applied Thermal Engineering, v. 128, p. 586–594, 2018. Elsevier Ltd. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.09.041>>.

SMITH, J.M.; VAN NESS, H. C.; ABBOTT, M. M. **Introdução à termo-dinâmica da engenharia química.** 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2007. 626 p.

SIKIRICA, S.J., CHEN, J., BLUESTEIN, J., ELSON, A., MCGERVEY, J. 2003. **Reserach Collaboration Program Food Processing Technology Project Phase 1.** Gas Research Institute (GRI).

TSUJI, H., GUPTA, A. K., HASEGAWA, T., KATSUKI, M., KISHIMOTO, K., MORITA, M. **High temperature air combustion: from energy conservation to pollution reduction.** Crc Press, 2003. 405p.

WERKEMA, C. **Introdução às ferramentas do lean manufacturing.** 2.ed. – Rio de Janeiro: Elsevier, 2011.

WESMAN Thermal Engineering Processes. **Regenerative Burner.** 2018. Disponível em: <<https://www.indiamart.com/proddetail/regenerative-burner-2340749288.html>>.

WONG, S.-Y., Zhou, W., & Hua, J. **CFD modeling of an industrial continuous bread-baking process involving U-movement.** Journal of Food Engineering, v. 78, n. 3, p. 888-896, 2007.

XAVIER, E. E. **Termeletricidade no Brasil – Proposta Metodológica para Inventário das Emissões Aéreas e sua Aplicação para o Caso do CO2.** 2004. 308 p. Tese (D.Sc., Planejamento Energético) - Programa de Pós Graduação em Engenharia – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ , Rio de Janeiro, 2004.

APENDICE A

Algoritmo desenvolvido no Scilab para realização dos cálculos:

```
// TCC - Henrique - 14-04-2019
clc; clear

// Propriedades Termofísica dos Alimentos - Calor Específico [kJ/(kg.K)]
// Temperaturas em Kelvin
function cp=cppr(T) // Proteina
    cp = 2.0082 + 1.2089e-3*T - 1.3129e-6*T^2
endfunction

function cp=cpfat(T) // Lipídeos
    cp = 1.0082 + 1.4733e-3*T-4.8008e-6*T^2
endfunction

function cp=cpash(T) // Cinzas
    cp = 1.0926 + 1.8896e-3*T-3.6817e-6*T^2
endfunction

function cp=cpwater(T) // água
    cp = 4.0195 + 0.57672e-3*T-0.08304e-6*T^2
endfunction

function cp=cpch(T) // Carboidrato
    cp = 1.5488+1.9625e-3*T-5.9399e-6*T^2
endfunction

// Propriedades Termofísica dos gases - cp [J/mol.K]

function y=cpsteam(T) // vapor água
    y = 8.314*(3.470+1.450*1e-3*T+0.121*1e5*T^(-2)) // J/(mol.K)
endfunction

function y=cpco2(T) // gás carbônico
    y = 8.314*(5.457+1.045*1e-3-1.157*1e5*T^(-2))
endfunction

function y=cpo2(T) //oxigênio
    y = 8.314*(3.639+0.506*1e-3*T-0.227*1e5*T^(-2)) // J/(mol.K)
endfunction

function y=cpn2(T) // nitrogênio
    y = 8.314*(3.280+0.593*1e-3*T+0.040*1e5*T^(-2)) // J/(mol.K)
endfunction

// Entalpia gerada na combustão
```

```

function hent=DHG(m, Ti, Tf) // m - massa GLP (g), Ti - temp do ar combustão (K),
Tf - temp da combustão (K)
    excesso = 0.30 // Ar de excesso igual a 30%
    nprop = (m*0.5)/44.097 // número de mols de propano (50% na mistura)
    nbut = (m*0.5)/58.123 // número de mols de butano (50% na mistura)
    no2R = (nprop*5 + nbut*6.5)*(1+excesso) // mols O2 reagente
    nn2R = no2R*(0.79/0.21)*(1+excesso) // mols n2 reagentes
    nco2p = nprop*3 + nbut*4 // mols CO2 produtos
    nh2op = nprop*4 + nbut*5 // mols de H2O formado
    no2p = (nprop*5+nbut*6.5)*excesso // mols O2 produtos
    nn2p = no2R*(0.79/0.21)*(1+excesso) // mols N2 produtos
    hreag =
no2R*integrate('cpo2(T)', 'T', Ti, 25+273.15)+nn2R*integrate('cpn2(T)', 'T', Ti, 25+273.15
)
    hprod =
nco2p*integrate('cpcO2(T)', 'T', 25+273.15, Tf)+nh2op*integrate('cpsteam(T)', 'T', 25+27
3.15, Tf) + no2p*integrate('cpo2(T)', 'T', 25+273.15, Tf) +
nn2p*integrate('cpn2(T)', 'T', 25+273.15, Tf)
    hent = hreag + hprod -2043119*nprop -2657336*nbut // energia em Joule/g ou
kJ/kg
endfunction

```

// Biscoito ao Leite: Composição - BISCUIT BAKING TECHNOLOGY

```

FLOUR = 100 // kg - com 8% proteína, 15% umidade - 77% Carboidrato
SUGAR = 29.5 // kg - com 0,3% umidade e 99,7% Carboidratos
FAT = 19.5 // kg
MILK = 2.35 // kg - 1,5% Lipídeos, 52,0% Carboidratos, 36,2% de Proteína, 4%
de água, 3,6% minerais (ash)
ASH = 0.58 + 1.1 // kg - Bicarbonato e Sal
WATER = 13.33 // kg
TOTAL = FLOUR + SUGAR + FAT + MILK + ASH + WATER // kg

```

// Cálculo das frações mássica

```

XWATER = (WATER + FLOUR*0.15 + SUGAR*0.003 + MILK*0.04) / TOTAL
XCH = (FLOUR*0.77 + SUGAR*0.997 + MILK*0.52) / TOTAL
XPR = (FLOUR*0.08 + MILK*0.362) / TOTAL
XFAT = (FAT + MILK*0.015) / TOTAL
XASH = (ASH + MILK*0.036) / TOTAL

```

// Capacidade de produção

```

mba = 1800 // massa de biscoito assado kg/h
xba = 0.97 // sólidos do biscoito assado 97% e 3% água
mbi = mba*xba/(1-XWATER) //cálculo de massa de biscoito no início (kg/h)
mae = mbi - mba // massa de água evaporada (kg/h)

```

// Consumo de energia

```

// Energia para evaporar água em kJ (DH = 2257 kJ/kg) e aquecer até 285 graus
Es = mae*2257 + (mae/18.04)*integrate('cpsteam(T)', 'T', 100+273.15, 285+273.15)
// kJ/h

```

// Energia para Aquecer o Biscoito de 40 C até 100 graus C

```

Ti = 40 + 273.15 // temperatura inicial em Kelvin

```

```

Teb = 100 + 273.15 // temperatura de ebulição da água
Eai =
mbi*(XWATER*integrate('cpwater(T)','T',Ti,Teb)+XCH*integrate('cpch(T)','T',Ti,Teb)+
XPR*integrate('cpper(T)','T',Ti,Teb)+XFAT*integrate('cpfat(T)','T',Ti,Teb)+XASH*integr
ate('cpash(T)','T',Ti,Teb)) // kJ/h

// Cozer o Biscoito de 100 graus C até 180 graus C
Tf = 180 + 273.15 // temperatura final do biscoito em Kelvin
Eaf =
mbi*(0.03*integrate('cpwater(T)','T',Teb,Tf)+XCH*integrate('cpch(T)','T',Teb,Tf)+XPR*
integrate('cpper(T)','T',Teb,Tf)+XFAT*integrate('cpfat(T)','T',Teb,Tf)+XASH*integrate('c
pash(T)','T',Teb,Tf)) // kJ/h

EC = Es + Eai + Eaf // Energia total no processo de cozimento (kJ/h)

// cálculo da massa de gás para aquecer no início da evaporação
TGE = 300 + 273.15 // Temperatura dos gases de entrada (K)
TGS = 320 + 273.15 // Temperatura dos gases de saída (K)
mi = 1
F = 1
while abs(F)>1e-5
    F = DHG(mi,TGE,TGS)+Eai
    DF = (DHG(mi+0.001,TGE,TGS)+Eai-F)/0.001
    mi = mi - F/DF
end

// Cálculo da massa de gás para secar
TGE = 480 + 273.15 // Temperatura dos gases de entrada (K)
TGS = 500 + 273.15 // Temperatura dos gases de saída (K)
ms = 1
F = 1
while abs(F)>1e-5
    F = DHG(ms,TGE,TGS)+Es
    DF = (DHG(ms+0.001,TGE,TGS)+Es-F)/0.001
    ms = ms - F/DF
end

// Cálculo da massa de gás para cozer o biscoito de 100 para 180 graus C
TGE = 480 + 273.15 // Temperatura dos gases de entrada (K)
TGS = 500 + 273.15 // Temperatura dos gases de saída (K)
mc = 1
F = 1
while abs(F)>1e-5
    F = DHG(mc,TGE,TGS)+Eaf
    DF = (DHG(mc+0.001,TGE,TGS)+Eaf-F)/0.001
    mc = mc - F/DF
end

mtg = mi + ms + mc // massa de gás (kg/h)
disp(mtg,'Consumo de gás (kg/h)=')

```