

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO DE QUÍMICA E BIOLOGIA
CURSO DE TECNOLOGIA EM QUÍMICA AMBIENTAL

RODRIGO FELIZ

**QUANTIFICAÇÃO DA REDUÇÃO DO CONSUMO DE ÁGUA E DE
PERDAS NA PRODUÇÃO DE WAFER COM ADIÇÃO DE UMA
PREPARAÇÃO ENZIMÁTICA**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CURITIBA
2013

RODRIGO FELIZ

**QUANTIFICAÇÃO DA REDUÇÃO DO CONSUMO DE ÁGUA E DE
PERDAS NA PRODUÇÃO DE WAFER COM ADIÇÃO DE UMA
PREPARAÇÃO ENZIMÁTICA**

Trabalho de Conclusão apresentado
como requisito parcial para a conclusão
do Curso de Tecnologia em Química
Ambiental da Universidade Tecnológica
Federal do Paraná.

Orientadora: Prof.^a Maria Teresa
Garcia Badoch.
Coorientadora: Prof.^a Marlene Soares.

CURITIBA
2013

RODRIGO FELIZ

QUANTIFICAÇÃO DA REDUÇÃO DO CONSUMO DE ÁGUA E DE PERDAS NA PRODUÇÃO DE WAFER COM ADIÇÃO DE UMA PREPARAÇÃO ENZIMÁTICA

Trabalho de Conclusão de Curso aprovado como requisito parcial à obtenção do grau de TECNÓLOGO EM QUÍMICA AMBIENTAL pelo Departamento Acadêmico de Química e Biologia (DAQBI) do Câmpus Curitiba da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, pela seguinte banca examinadora:

Membro 1 – PROF^a. DR^a. VALMA MARTINS BARBOSA
Departamento Acadêmico de Química e Biologia, UTFPR

Membro 2 – PROF. DR. JULIO CESAR RODRIGUES DE AZEVEDO
Departamento Acadêmico de Química e Biologia, UTFPR

Orientadora – PROF^a. DR^a. MARIA TERESA GARCIA BADOCH
Departamento Acadêmico de Química e Biologia, UTFPR

Coordenadora de Curso – PROF^a. DR^a. VALMA MARTINS BARBOSA

Curitiba, 26 de setembro de 2013.

RESUMO

FELIZ, Rodrigo. QUANTIFICAÇÃO DA REDUÇÃO DO CONSUMO DE ÁGUA E DE PERDAS NA PRODUÇÃO DE WAFER COM ADIÇÃO DE UMA PREPARAÇÃO ENZIMÁTICA. Trabalho de Conclusão de Curso (Tecnologia em Química Ambiental) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2013.

A empresa de aditivos alimentares Granotec do Brasil criou a preparação enzimática *Summer Fast Wafer* que afirma reduzir a adição de água na massa (estimativa: 10%) e de perdas na produção de wafer. Tem-se como objetivo quantificar estes dois parâmetros através de testes industriais, com e sem redução da temperatura de assamento comparando cor, textura (crocância) e umidade. Os resultados foram (média de duas indústrias) de 8,7% na redução do consumo de água e de 20,2% nas perdas totais. Desta maneira, 16,2 m³ de água e 10,5 ton de resíduos orgânicos deixariam de ser descartados por mês para ambas as indústrias. Sem alterações na temperatura do forno, a qualidade do produto foi superior. E com uma redução de 15 °C na temperatura do forno, a qualidade se manteve praticamente constante. Isto representa uma redução de consumo de gás natural de 1,21 kg/h, ou seja, evitaria que 1.128 kg de CO₂ fossem liberados para a atmosfera em um mês de produção de 117 kg/h de wafer.

Palavras-Chave: Redução de Água. Redução de perdas de wafer. *Summer Fast Wafer*. Emissão de gás carbônico do forno de wafer.

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – RESULTADOS DA REDUÇÃO DE ÁGUA E DOS PARÂMETROS DE QUALIDADE DOS TESTES DA INDÚSTRIA 01.....	12
TABELA 2 – RESULTADOS DAS PERDAS GERADAS (KG) DOS TESTES DA INDÚSTRIA 01.	14
TABELA 3 – RESULTADOS DA REDUÇÃO DE ÁGUA E DOS PARÂMETROS DE QUALIDADE DOS TESTES DA INDÚSTRIA 02.	14
TABELA 4 – RESULTADOS DAS PERDAS GERADAS (KG) DOS TESTES DA INDÚSTRIA 02.	15
TABELA 5 – COMPOSIÇÃO QUÍMICA DOS INGREDIENTES DA MASSA DE WAFER.....	17
TABELA 6 – COMPOSIÇÃO QUÍMICA (%) CALCULADA DE CADA MASSA/PRODUTO.	17
TABELA 7 – PERCENTUAL E PESO DOS INGREDIENTES DE UMA BATELADA DE 50 KG DE FARINHA COM E SEM A REDUÇÃO DE ÁGUA.....	18
TABELA 8 – DIFERENÇA DA ENTALPIA DE CADA ELEMENTO DURANTE O AQUECIMENTO DA MASSA SEM O ADITIVO.	20
TABELA 9 – DIFERENÇA DA ENTALPIA DE CADA ELEMENTO DURANTE O AQUECIMENTO DA MASSA COM O ADITIVO.	20
TABELA 10 – DIFERENÇA DA ENTALPIA DE CADA ELEMENTO DURANTE O AQUECIMENTO DA MASSA APÓS O ASSAMENTO.	20
TABELA 11 – COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO GÁS NATURAL.	21
TABELA 12 – VOLUME DE ENTRADA E SAÍDA DOS GASES DA CÂMARA DE COMBUSTÃO DO FORNO..	22
TABELA 13 – CALOR LIBERADO PELOS GASES DE COMBUSTÃO.	23
TABELA 14 – RESULTADOS DAS VAZÕES DE COMBUSTÍVEL DO FORNO E DA ESTIMATIVA DA REDUÇÃO DA TEMPERATURA DO FORNO.	24
TABELA 15 – CONSIDERAÇÕES E RESULTADOS DAS EMISSÕES DOS GASES DE COMBUSTÃO DOS DOIS CASOS.	24

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – FOTO DOS WAFERS COM E SEM O ADITIVO DA INDÚSTRIA 01 PARA COMPARAÇÃO DE CORES.	13
FIGURA 2 – FOTO DAS PLACAS DE WAFER DOS TESTES 01 E 02 DA INDÚSTRIA 02.	14
FIGURA 3 – DIAGRAMA DE BLOCO DA ETAPA DE ASSAMENTO DO WAFER COM E SEM O SFW.....	19
FIGURA 4 – GRÁFICO DA QUANTIDADE DE CALOR LIBERADO PELOS GASES DE COMBUSTÃO EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA DE SAÍDA.	23

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	8
PARTE EXPERIMENTAL.....	9
Indústria 01.....	10
Indústria 02.....	10
Análises de Qualidade.....	11
Umidade	11
Cor.....	11
Textura	11
RESULTADOS E DISCUSSÃO	12
Indústria 01.....	12
Indústria 02.....	03
CONCLUSÕES.....	15
REFERÊNCIAS	16
ANEXOS.....	17
CÁLCULO DA REDUÇÃO DA EMISSÃO DE CO ₂ DO FORNO.....	17
– Composição química da massa crua.....	17
– Balanço de massa	18
– Balanço de energia	19
– Poder calorífico	21
– Perda de energia pelos gases de combustão	21
– Vazão de combustível	23
– Vazão de gás carbônico.....	24

QUANTIFICAÇÃO DA REDUÇÃO DO CONSUMO DE ÁGUA E DE PERDAS NA PRODUÇÃO DE WAFER COM ADIÇÃO DE UMA PREPARAÇÃO ENZIMÁTICA

Rodrigo Feliz*

Maria Teresa Garcia Badoch

Departamento de Química e Biologia – Universidade Tecnológica Federal do Paraná – CEP 80230-901 – Curitiba – PR.

*email: felizaus@hotmail.com

MEASUREMENT OF THE REDUCTION OF WATER CONSUMPTION AND LOSSES IN WAFER PRODUCTION WITH ADDITION OF AN ENZYME PREPARATION – The company of food additives Granotec do Brasil has created the enzyme preparation Summer Fast Wafer (SFW), which estimate to reduce 10% of the water addition and loss in wafer production. The objective was to analyze the influence of the addition of the SFW in relation of these two parameters by industrial testing, and also evaluate the quality of the product and the possibility of a reduction in the oven temperature. The results showed (average of two industries) a reduction of 8.7% of water and 20.2% of losses. With the same temperature, the final product quality improved. And with the reduction of 15 °C the quality remained constant. That represents a reduction of 1,21 kg/h of natural gas consumption or the release of 1,128 kg of CO₂ could be avoided with a production of 117 kg/h of wafer.

Keywords: Water reduction. Reduction of wafer losses. Summer Fast Wafer. Emission of carbon dioxide from a wafer oven.

INTRODUÇÃO

A produção de aditivos para farinha de trigo começou no Brasil em meados dos anos 90. Atualmente estes ingredientes são quase indispensáveis para produtos derivados do trigo, tanto para pequenas como para grandes indústrias. Os aditivos em questão podem ser compostos apenas por um ingrediente (glúten, emulsificante, enzima, oxidante, etc.), podem ser preparações enzimáticas (duas ou mais enzimas) ou um pré-mix (mistura variada deles). Estes ingredientes ou misturas são desenvolvidos de acordo com o que o mercado de trabalho demanda, por exemplo, pães mais dourados, bolos mais macios ou biscoitos mais crocantes¹.

A empresa *Granotec do Brasil*, em parceria com a produtora de enzimas *Novozymes*, criou a preparação enzimática *Summer Fast Wafer* (SFW) que reduz a quantidade de água na receita e de perdas/resíduos na produção de biscoitos tipo wafer, além de melhorar a qualidade do produto. Ela foi desenvolvida pela necessidade de otimizar o processo de fabricação mais efetivamente que os outros aditivos.

As preparações enzimáticas que as indústrias de wafer utilizam são, em grande parte, baratas e simples, contendo no máximo duas enzimas, além de muitas serem excessivamente diluídas. Isto porque as pequenas e médias indústrias demandam aditivos de baixo custo, uma vez que o valor agregado deste tipo de biscoito é baixo. Com isso acabam sendo prejudicadas e induzidas a dosar grandes quantidades de diluentes (amido) sem necessidade. Sendo assim, criou-se a necessidade de desenvolver um aditivo mais concentrado e mais completo e que atenda todas as demandas de qualidade deste tipo de produto. O aditivo em questão é constituído pelas enzimas: α -amilase, protease e xilanase. Não há uma quantificação padronizada da redução de água na massa e nem das perdas geradas durante o processo. Estima-se, apenas, que o consumo de água pode ser reduzido em até 10%¹.

A α -amilase acelera o processo da hidrólise do amido quebrando sua cadeia nas ligações glicosídicas α -1,4 disponibilizando gradativamente polissacarídeos menores e açúcares livres, como dextrinas, maltose e glicose. Eles servirão de reagentes para a reação de Maillard, dourando alimentos com o aquecimento². Por este motivo abre-se a possibilidade de reduzir o tempo de assamento ou a temperatura do forno de wafer. Isto implicaria em um grande apelo de responsabilidade ambiental pela redução da emissão de gás carbônico para a atmosfera.

As proteases rompem as ligações da rede proteica formando aminoácidos e, desta maneira, liberando água no meio. Isto possibilita a redução do tempo de assamento pela redução de adição de água na massa. Sua aplicação é indicada para produtos que requerem massas menos fortes que a panificação, sendo ideal na manufatura de biscoitos. Outros benefícios são reatados como menor quebra dos biscoitos e maior uniformidade de textura e dimensões³.

As xilanases são enzimas especializadas em degradar o polissacarídeo hemicelulose em xilose. Presume-se que o glúten se complexa naturalmente com pentosanas, fração da hemicelulose⁴. Em biscoitos a xilanase tem a função de desfazer esta rede e desvencilhar o glúten das fibras de hemicelulose, otimizando desta maneira a ação da protease quando juntas⁵. Estudos realizados em conjunto com a empresa *Novozymes* apontam para resultados como: diminuição da umidade final em aproximadamente 0,4%; e aumento da crocância em 20%. Isto mostra que a água pode ser mais facilmente expulsa no assamento, possibilitando uma redução do tempo ou temperatura de assamento¹.

As indústrias que representam a maior parte do mercado nacional são, nesta ordem, Bauducco, Marilan, Aymoré e Parati, totalizando um faturamento de cerca de R\$ 400 milhões⁶. A produção de wafer no Paraná foi de 18.400 ton no ano de 2005, portanto, considerando que 75 L de água e 50 kg de farinha de trigo rendem 130 kg de wafer recheado segundo dados industriais, foram utilizados cerca de 10.615 m³ de água no Estado⁷. Com a estimativa de 10% de redução do consumo de água, caso metade desta produção utilize o aditivo, 530 m³ de água poderiam ser economizados naquele ano.

Parte das perdas geradas no processo de fabricação de wafer, como retalhos, é reprocessada, com isso há a possibilidade de contaminação do alimento. Outra parte é destinada à ração animal, mesmo não sendo o tipo ideal de alimento para este fim. E o restante (contaminado ou queimado) é descartado como resíduo orgânico. Segundo informações de uma indústria em particular, as perdas podem totalizar mais de 10% da sua produção. Relacionando este dado com a produção de wafer do ano de 2005 no Paraná, 552 ton de resíduos deixariam de ser descartados ou reprocessados caso todas as indústrias de wafer fizessem uso da preparação enzimática. Além de evitar gastar a energia requerida no reprocesso.

Recomenda-se que a adição deste tipo de alimento na ração de animais seja evitada. Isto porque, além de não ser o alimento ideal para animais, existe um alcalóide no chocolate (Teobromina) que apenas 100mg desta substância por kg do animal pode causar uma intoxicação⁸.

Segundo o fabricante Haas, líder de fornos de wafer plano recheado, o combustível mais utilizado é o gás natural. Apesar dos fornos serem automatizados, os desperdícios gerados por eles é um problema para a indústria. O combustível do forno gera o principal gasto na linha de biscoitos, por isso é de grande interesse que ele seja reduzido. Além disso, deve-se ressaltar a importância de aumentar a eficiência na produção, pelo fato deste recurso não ser renovável. Não existem estudos que correlacionam a utilização deste aditivo com a redução de emissão de gases do efeito estufa ou do consumo de combustível.

O motivo inicial para a realização deste trabalho foi realizar um estudo para a disciplina de Estágio Obrigatório. Porém, por interesse próprio e de professores este assunto foi direcionado para a disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso, com a possibilidade de ser aplicado em indústrias.

O objetivo do presente trabalho foi de analisar a influência da adição de uma preparação enzimática na receita de biscoitos em relação à adição de água na formulação e perdas na produção, além de avaliar a possibilidade de reduzir a temperatura do forno.

PARTE EXPERIMENTAL

Além do objetivo principal, foram estipulados objetivos secundários para detalhar melhor o método de alcançá-los.

- Levantar dados de consumo de água e de perdas em indústrias.
- Realizar a aplicação do aditivo em duas indústrias selecionadas.
- Quantificar a redução do consumo de água na massa de wafer.
- Quantificar a redução das perdas geradas.
- Avaliar a viabilidade de reduzir a temperatura do forno.
- Calcular a redução da emissão de gás carbônico pela redução da temperatura do forno.
- Comparar a qualidade dos produtos com e sem o aditivo e com e sem a redução da temperatura no assamento do forno.

Para atingir estes objetivos propostos foram selecionadas duas indústrias para o estudo e garantir que os resultados fossem o mais próximo possível do real. Elas foram nomeadas conforme a ordem cronológica dos testes, ou seja, para a primeira Indústria 01 e para a segunda Indústria 02. Os testes foram realizados nos dias 12 e 14 de Setembro de 2012, respectivamente.

Foi escolhida a dosagem máxima do aditivo, pois assim facilita a comparação entre os resultados. Portanto, para que não corresse o risco de faltar material, uma amostra de 100 g de SFW foi levada para cada indústria.

Indústria 01

Os testes da primeira Indústria foram realizados no dia 12/09/12 das 9:00 as 16:00. Em um dia normal de produção, uma batelada contém um saco de farinha de 50 kg, 76 L de água e os outros ingredientes, que não alteram a avaliação do teste.

Cada batelada demora no mínimo 30 min, foi então estimado que pudessem ser feitas 10 bateladas neste período. Portanto, no laboratório da empresa, foram pesados em uma balança analítica 6,25 g de SFW em 10 copinhos descartáveis. A partir disto foram realizadas as seguintes etapas:

- Interrupção da produção para a remoção das perdas geradas até o momento;
- Coleta de amostras das placas de wafer para análise de cor;
- Coleta de amostras do biscoito wafer para análise de textura;
- Reativação da produção com a adição da preparação enzimática juntamente à farinha;

Para avaliar o volume de água que pode ser reduzido, deve-se analisar a viscosidade da massa para que não prejudique no assamento do forno nem na qualidade do wafer. A empresa em questão não possui um controle de análises da viscosidade da massa, portanto o masseiro controla o ponto da massa observando os vórtices gerados ao bater a massa. Foi estimado uma redução de 6 L de água para inicializar os testes.

- Realização de teste com redução de 7,8% de água que representa 6 L por batelada (pouco viscosa);
- Realização de teste com redução de 10,5% de água que representa 8 L por batelada (viscosidade ideal);
- Repetição deste mesmo teste (seis vezes);
- Coleta das amostras de biscoitos e placas de wafer durante todos os testes;
- Interrupção da produção para coleta e pesagem dos desperdícios gerados;
- Reativação da produção sem o aditivo e sem redução de água.

Indústria 02

Esta indústria produz os biscoitos conforme surgem as demandas, ou seja, sua produção não é contínua. Por isso, estes testes foram propositalmente coincidentes com uma demanda agendada para o dia 14/09/12 das 10:00 as 18:00. A quantidade de biscoitos que deveriam ser produzidos era o

equivalente a 5 bateladas de massa. Portanto foram pesados em uma balança semi-analítica 5,13 g de SFW em quatro copos descartáveis, pois o primeiro teste foi o branco.

Esta indústria possui a análise de controle de viscosidade Copo Ford. Ela funciona basicamente enchendo completamente o viscosímetro, um copo com um orifício na parte inferior, com o fluido. Ao escorrer todo o conteúdo marca-se o tempo, conhecido como tempo de escoamento (t_e), que representa a viscosidade do fluido. A empresa utiliza como padrão um tempo de 35 a 40 s.

Em um dia normal de produção uma batelada contém 41 kg farinha (metade nacional, metade importada) e 58 L de água e os outros ingredientes, que não alteram a avaliação do teste. Com base nisso foram realizadas as seguintes etapas:

- Realização do teste branco a uma temperatura de assamento de 170°C;
- Realização de teste com uma redução de água de 6,8% que representa 4 L por batelada;
- Coleta de amostras das placas de wafer para análise de cor;
- Realização de teste com redução da temperatura de assamento de 170°C para 155°C;
- Realização de mais dois testes com a mesma redução de temperatura;
- Interrupção da produção para coleta de amostras e pesagem dos desperdícios gerados.

Análises de Qualidade

Umidade

Esta análise foi realizada seguindo a metodologia de umidade da American Association of Cereal Chemists (AACC – 44-15).

Uma amostra da placa de wafer (10 g) de cada teste foi coletada e triturada. Em seguida estas amostras foram levadas para o laboratório de análises da indústria para permanecerem em uma estufa a 130 °C para evaporar toda a água presente. Após 1h ou até peso constante a amostra é removida da estufa e sua umidade é medida.

Esta análise foi realizada em duplicata após o resfriamento das placas coletadas. Cada indústria realizou esta análise em seu próprio laboratório.

Cor

Esta análise foi realizada seguindo a metodologia criada pela *Granolab* com base no Manual de Colorimetria Minolta®.

A análise de cor, ou colorimetria, mede diretamente a cor de uma amostra e a quantifica através dos parâmetros “l”, “a” e “b”. O parâmetro “l” representa a cor branca e preta, ou seja, quanto maior o valor medido mais a cor tende para o branco e quanto menor mais tende para o preto. Os valores positivos de “a” representa a cor vermelha e valores negativos a cor verde. O parâmetro “b” representa o amarelo quando positivo e azul quando negativo. Estes valores são mensurados em números através da refletância.

Esta análise é realizada através do posicionamento do aparelho chamado Colorímetro sobre uma superfície plana, e após pressionar o botão, o aparelho incide uma luz que, ao ser refletida, é captada por fotosensores e a cor é medida. O aparelho deve ser posicionado de forma a não incidir nenhuma luz externa.

As amostras coletadas da Indústria 01 foram pacotes de wafer embalados. Portanto, neste caso, os biscoitos foram unidos a fim de formar uma superfície plana grande o suficiente realizar a análise.

Já as amostras da Indústria 02 foram coletadas na forma de placas planas inteiras, que facilitou a análise. A cor foi medida nos dois lados do centro de cada placa em duplicata.

Textura

Esta análise foi realizada seguindo a metodologia de texturometria da American Association of Cereal Chemists (AACC – 74-09).

O Texturômetro mensura a textura de alimentos sólidos pela força aplicada até a sua ruptura. Isto é feito através de um “braço” mecanizado com sensores que, após cortar a amostra, gera um gráfico da pressão exercida pelo tempo. São medidos dois parâmetros: Dureza (g) e Trabalho de Cisalhamento (g.s). A Dureza representa a resistência máxima que o alimento ofereceu até o rompimento, ou seja, o pico do gráfico gerado. E o Trabalho de Cisalhamento representa a resistência total que o alimento ofereceu durante todo o tempo da sua ruptura.

Para a Indústria 01 foi considerado apenas o Trabalho de Cisalhamento como parâmetro, pois suas amostras eram biscoitos constituídos de três placas. Desta maneira é possível analisar integralmente a crocância ao decorrer da “mordida”. Já a Indústria 02 levou apenas em consideração a Dureza, pois as amostras (plaquetas de wafer) possuíam apenas uma camada.

Foram analisadas oito amostras escolhidas aleatoriamente de cada pacote. Os valores da crocância de cada teste foram obtidos pela média dos oito dados coletados.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Indústria 01

Os resultados obtidos dos testes e das análises da Indústria 01 estão descritos na Tabela 1. A umidade padrão utilizada nesta empresa é de 0,7 – 2%. Apenas o Teste 01 foi realizado sem a presença do aditivo, os demais possuem o SFW nas suas composições. Os resultados das análises de textura e cor são uma média de 5 repetições para maior confiabilidade.

Foi considerado que uma variação menor do que 5% não é significativa para qualquer parâmetro.

Como pode ser observado na Tabela 1, a redução máxima de água na massa de wafer desta indústria foi de 8 L, ou seja, uma redução de 10,5%, que é um resultado superior ao estimado. Isto representa uma economia de cerca de 16 m³ de água por mês.

A umidade do primeiro teste foi superior a todos os outros pelo fato de ter sido adicionado a quantidade padrão de água. O segundo teste apresentou a mesma umidade final, pois a liberação de água no meio por hidrólise compensou a redução de água na formulação. Já os demais testes tiveram uma média de 1% de umidade, o que significa que houve uma redução de 20,2% na umidade final do produto com o SFW. Isto aconteceu pelo fato da umidade inicial ser menor e de não ter sido alterada as condições de produção, como temperatura ou tempo de assamento.

A textura do wafer padrão apresentou uma resistência menor ao corte em relação aos outros testes, ou seja, houve um aumento na crocância. Esta diferença foi significativa, atingindo valores 38,6% maiores em relação ao padrão. Isto já era esperado, uma vez que a umidade final foi reduzida além de eliminar pontos de quebra na placa de wafer, como pequenos grumos de glúten e fibras.

Tabela 1. Resultados da redução de água e dos parâmetros de qualidade dos testes da Indústria 01.

Testes	Água adicionada (L)	Umidade da placa (%)	Textura (g.s)	Cor (l; a; b)
01	76	1,3	2546	73,4 / 4,2 / 23,2
02	70	1,3	3116	68,4 / 7,4 / 26,0
03	68	0,9	3311	70,5 / 6,9 / 26,4
04	68	1,1	4026	69,4 / 6,4 / 25,1
05	68	1,1	3334	68,6 / 7,2 / 25,7
06	68	0,9	3549	69,9 / 7,0 / 25,8
07	68	1,0	3584	68,1 / 6,2 / 26,2
08	68	1,1	3762	69,3 / 6,7 / 25,5
09	68	0,9	3545	68,6 / 7,5 / 26,9



Figura 1. Foto dos wafers com e sem o aditivo da Indústria 01.

A média das medições da cor das placas de wafer com o aditivo, em relação ao indicador “I”, apresentou um valor 5,9% menor do que o Teste 01; o parâmetro “a” foi 64,6% superior ao teste branco; e o indicador “b” aumentou seu valor em 11,9%. Isto significa que a cor destas placas tendeu mais para o amarelo, para o vermelho e para o preto. Este resultado já era esperado, uma vez que, com a presença da alfa-amilase, são gerados diferentes tipos de açúcares que auxiliam na reação de *Maillard* que representa uma cor de caramelo. A Figura 01 representa esta diferença de cores.

O controle de perdas da Indústria 01 é realizado através da pesagem da massa transbordada das formas de assamento ou Bolinha, da quebra das placas de wafer ou Casquinha, das falhas geradas na etapa de adição do recheio que o operador remove manualmente ou Recheio, das falhas que o operador não consegue remover e seguem para o túnel de resfriamento ou Túnel, das perdas da etapa de corte do wafer ou Serra e das quebras na etapa de embalagem ou Falha.

A empresa forneceu dados de perdas de três turnos, no caso, 67 bateladas por dia. As perdas de cada parâmetro foram adaptadas para serem proporcionais as 8 bateladas realizadas com o SFW, sendo assim possível uma comparação de dados.

Em todas as etapas do processo foi observada uma redução das perdas.

Todas as perdas geradas, com exceção do que entra em contato com o chão e da Bolinha, são reprocessadas e adicionadas no recheio do wafer. Portanto, com a adição da preparação enzimática, em torno de 7,7 ton de massa assada deixariam de ser reprocessadas, e que 2,5 ton de Bolinha deixaram de ser descartadas por mês, no caso, 2010 bateladas. Considerando as perdas totais, a média desta redução foi de 28,8%.

Indústria 02

Os resultados obtidos dos testes e das análises da Indústria 02 estão descritos na Tabela 3. A umidade padrão utilizada nesta empresa é de 1 – 2,5% e o tempo de escoamento (viscosidade da massa) é de 35 – 40 s. O Teste 01 foi realizado sem a presença do aditivo. Para este teste os resultados das análises de textura e cor são uma média de 10 repetições para maior confiabilidade.

Como pode ser observado, a redução máxima de água na massa de wafer desta indústria foi de 4 L, ou seja, uma redução de 6,9%, que é um resultado inferior ao estimado. Isto equivale a uma economia de aproximadamente 1195 L de água por mês de produção.

A umidade do Teste 02 foi reduzida em 9,1%, isso porque a temperatura do forno foi mantida a mesma e a quantidade inicial de água foi reduzida. Já a média da umidade dos demais testes foi de 2,13%, ou seja, ela se manteve constante em relação ao branco. Isso pode ser explicado pela redução da temperatura do forno, que reduziu a taxa de evaporação da água do alimento, mantendo a umidade constante.

Foi considerada uma redução da temperatura do forno de 15°C, que foi validado pelos Testes 03, 04 e 05 desta indústria.

Tabela 2. Resultados das perdas geradas (kg) dos testes da Indústria 01.

Bateladas	SFW	Bolinha	Casquinha	Recheio	Túnel	Serra	Falha	Total
67	Não	518	127	28	50	209	244	1176
8	Não	61,9	15,2	3,3	6,0	25,0	29,1	140,4
8	Sim	52	10	3	4	21	10	100
Redução de perdas (%)	-	15,9%	34,1%	10,3%	33,0%	15,8%	65,7%	28,8%

Tabela 3. Resultados da redução de água e dos parâmetros de qualidade dos testes da Indústria 02.

Testes	Água adicionada (L)	Tempo de escoamento (s)	Temperatura do forno (°C)	Umidade da placa (%)	Textura (g)	Cor (l; a; b)
01	58	35	170	2,2	2421	76,8 / 2,1 / 24,4
02	54	35	170	2,0	2563	72,4 / 5,9 / 27,9
03	54	35	155	2,1	2454	72,6 / 4,5 / 25,4
04	54	36	155	2,1	2395	72,9 / 4,6 / 25,4
05	54	36	155	2,2	2463	73,4 / 4,0 / 26,1

Como a quantidade de água inicial da massa com o aditivo é menor, ao manter a umidade final constante entende-se que menos água foi desprendida e, portanto, menos energia/combustível foi requerido.

A textura do wafer dos três últimos testes também não apresentaram variações significativas na resistência ao corte. Este fato pode ser comprovado pelo mesmo motivo da constância da umidade, uma vez que estes dois parâmetros estão diretamente relacionados. Por isso é possível observar no Teste 02 um leve aumento na crocância (5,9%) e uma leve redução na umidade.

**Figura 2.** Foto das placas de wafer dos Testes 01 e 02 da Indústria 02.

A cor das placas de wafer do Teste 02, em relação ao indicador “l”, apresentou um valor 5,7% menor do que o Teste 01; o parâmetro “a” mais que duplicou; e o indicador “b” aumentou seu valor em 14,3%. Isto significa que a cor destas placas tendeu mais para o amarelo, para o

vermelho e para o preto. Este resultado já era esperado, uma vez que, no Teste 02 a temperatura do forno foi mantida e a umidade inicial reduzida. A Figura 02 representa esta diferença de cores.

Além disso, foi observado que a média das cores dos Testes 01, 02 e 03, em relação ao indicador “l”, apresentou um valor 5,0% menor do que o Teste 01; o parâmetro “a” praticamente duplicou; e o indicador “b” aumentou seu valor em 5,1%. Isto significa que a cor destas placas tendeu mais para o amarelo, para o vermelho e para o preto, porém com menos intensidade.

Era esperado que estes parâmetros, assim com a umidade e a textura, se mantivessem constantes em relação ao padrão, contudo é possível notar que houve uma tendência significativa para o dourado escuro.

Resumindo, a média da umidade e da crocância dos Testes 03, 04 e 05 não variou em relação ao Teste 01, contudo, mesmo com a redução da temperatura, a cor tendeu mais para o dourado. Isto significa que, se as indústrias tiverem a intenção de manter o mesmo padrão de cor do produto, a temperatura do forno pode ser reduzida ainda mais com a presença do SFW.

O controle de perdas da Indústria 02 é realizado através da pesagem da quebra das placas ou Retalho, que são reprocessadas e adicionadas no recheio e da massa transbordada das formas de assamento junto com tudo que entra em contato com o chão ou Borréia.

Tabela 4. Resultados das perdas geradas (kg) dos testes da Indústria 02.

Bateladas	SFW	Retalho	Borréia	Total
46	Não	81,6	361	443
4	Não	7,1	31,5	38,6
4	Sim	5,1	29	34,1
Redução de perdas (%)	-	28,2%	7,8%	11,6%

A empresa forneceu os dados de perdas de 1 semana de produção, ou seja, 46 bateladas de massa. Para que possam ser comparados, os valores do Retalho e da Borréia foram proporcionalmente transformados para o equivalente a 4 bateladas. Assim, foi possível comparar a redução de perdas com a presença do SFW.

Assim como na Indústria 01, foi observado que ambos os parâmetros de perdas foram reduzidos com a presença da preparação enzimática. Contudo a redução de Retalhos gerados foi significativamente maior que a de Borréia, indicando um possível aumento da resistência das placas. Considerando as perdas totais, a média desta redução foi de 11,6%, ou seja, em um mês de produção 150 kg de Retalho seriam reduzidos e 183 kg de Borréia poderiam não ser descartados.

Foi observado que a etapa de corte gera uma grande quantidade de pequenas partículas de wafer, chamado de “farelo”, que são descartados por entrar em contato com o chão. Além disso, boa parte das plaquetas possuíam defeitos/quebras. Já com a presença do aditivo, tanto a geração de “farelo” como de quebras, foram claramente reduzidas, porém a empresa não possui um controle das perdas geradas nesta etapa.

O volume total de redução de perdas foi consideravelmente menor que da primeira indústria, pelo fato da produção ser realizada apenas conforme surgem demandas.

CONCLUSÕES

Com o trabalho realizado é possível verificar que, apesar da redução do consumo de água na elaboração de massas de wafer com a adição do SFW ter sido menor que a estimativa, isto representa um volume considerável de água que poderia ser economizada. A redução média das

duas indústrias foi de 8,7%, ou seja, 16,2 m³ de água poderiam ser economizados em apenas um mês.

A redução média das perdas totais de ambas as indústrias foi de 20,2%. Com base nisto, 10,5 ton de resíduos orgânicos deixariam de ser reprocessados ou descartados. Este é um valor representativo, apesar de não haver dados similares disponíveis para comparação. Considerando que esta quantidade de resíduos fosse traduzida em peso de wafer e que cada pacote de 150 g custasse R\$ 2,00, cerca de R\$ 420.000,00 poderiam ser faturados em um mês.

Caso as indústrias utilizem o aditivo sem alterar a temperatura do processo, a umidade inicial e final reduziriam; a crocância (pressão exercida até a ruptura) aumentaria; e a cor tenderia mais para o dourado escuro.

Os testes realizados na Indústria 02 comprovam que com uma redução de 15 °C no assamento estas qualidades se mantêm constantes, com exceção da cor que tenderia levemente a mais para o dourado.

Através de cálculos teóricos presentes no Anexo, caso uma indústria escolhesse reduzir a temperatura do forno em 15 °C, concluiu-se que ela poderia economizar 1,21 kg/h de combustível, caso seja o gás natural, e 1,57 kg/h de gás carbônico deixariam de ser liberados para a atmosfera ao produzir 117 kg/h de placas de wafer. Em apenas um mês com este ritmo de produção, cerca de 1,12 ton de CO₂ deixariam de ser liberados para o meio ambiente.

Desta forma, a importância da aplicação desta preparação enzimática na indústria de wafer seria o aumento da qualidade do produto juntamente com uma economia de água de perdas, além de reduzir a emissão de CO₂. Tem-se assim a possibilidade de produzir uma nova linha menos poluidora de biscoitos de alta qualidade e com um maior valor agregado.

REFERÊNCIAS

1. GRANOTEC. *Treinamentos*. Granotec do Brasil S.A. e Granolab do Brasil S.A. Curitiba, 2009.
2. MATHEWSON, P.R. *Enzymes*. St. Paul: Minnesota – Estados Unidos, 1998.
3. POPPER, L. *Enzymes – Best Friends of Fluor*. Muehlenchemie GmbH: Ahrensburg – Alemanha, 2002.
4. MADEIROS, L. A. *Xilanases de Penicillium chrysogenum: produção, purificação, caracterização e aplicação no pré-branqueamento de polpa celulósica de pseudocaulo de bananeira frutífera*. São Paulo, 2007.
5. KRUGER, J.E.; LINEBACK, D.; STAUFFER, C.E. *Enzymes and their role in cereal technology*. American Association of Cereal Chemists – USA, 1987.
6. <http://br.nielsen.com/site/index.shtml>, acessada em Maio de 2012.
7. http://www.fiepr.org.br/para-empresas/conselhos/agroindustria_alimentos/uploadAddress/Relat%C3%B3rioWafers0306.pdf, acessada em Maio de 2012.
8. ALVES, C. *Os animais e o chocolate*. Charneca de Caparica – Portugal, 2012.
9. BITTENCOURT, C. *Notas de aula de Projeto de Implantação de uma Agroindústria do curso de Engenharia de Alimentos da PUC-PR*. Curitiba, 2009.
10. http://www.comgas.com.br/conheca_sociedade/escola/composicao.asp, acessada em Março de 2013.
11. SÁNCHEZ, C.G. *Tecnologia da gaseificação*. Faculdade de Engenharia Mecânica – UNICAMP – SP, 2003.
12. HIMMELBLAU, D. M. *Engenharia Química Princípios e Cálculos*. 6ª Edição. Universidade do Texas – EUA, 1998.
13. TOLEDO, R. T. *Fundamentals of Food Engineering*. 3ª Edição – Springer, USA, 2006.

ANEXOS

CÁLCULO DA REDUÇÃO DA EMISSÃO DE CO₂ DO FORNO

Neste tópico foi considerado um exemplo hipotético de uma indústria de wafer de médio porte para a realização dos cálculos. Foram também estimados alguns dados para a obtenção dos principais parâmetros que diferem no processo com e sem o aditivo: diferença nas composições das massas; diferença da quantidade de energia utilizada no assamento; diferença da vazão de combustível e da emissão de gás carbônico.

– Composição química da massa crua

Para o cálculo da composição química da massa crua de wafer é necessário que se saiba as composições aproximadas de seus ingredientes. As matérias-primas que foram escolhidas são as mais comuns utilizadas na produção da placa de wafer: farinha de trigo, água, sal, bicarbonato de sódio, lecitina de soja e gordura vegetal.

Tabela 5. Composição química dos ingredientes da massa de wafer.

Composição Química (%)	Farinha branca	Água	Sal	Gordura palma	Lecitina de sódio	Bicarbonato de sódio
Carboidrato	75	-	-	-	-	-
Proteína	10	-	-	-	-	-
Lipídeo	-	-	-	100	100	-
Fibras	2	-	-	-	-	-
Umidade	12	100	-	-	-	-
Cinzas	1	-	100	-	-	100

Para este caso teórico foi considerado que os ingredientes da massa do biscoito consistem da composição indicada na Tabela 5.

Tabela 6. Composição química (%) calculada de cada massa/produto.

	Massa Crua	Massa Crua SFW	Wafer
Carboidratos	29,5	31,3	79,80
Proteínas	3,93	4,17	10,64
Gorduras Totais	1,43	1,52	3,87
Fibra Alimentar	0,79	0,79	2,13
Umidade	63,7	61,4	1,50
Cinzas	0,76	0,79	2,07
Xs	0,364	0,386	0,985

Já a Tabela 6 mostra a composição da massa crua padrão, da massa crua com o aditivo e uma redução de 10% na quantidade de água e do wafer assado com a umidade final padronizada em 1,5%.

Tabela 7. Percentual e peso dos ingredientes de uma batelada de 50 kg de farinha com e sem a redução de água.

Ingredientes	Composição (%)	Batelada (kg)	Composição SFW (%)	Batelada SFW (kg)
Gordura de palma	0,90	1,1	0,95	1,1
Lecitina de soja	0,55	0,7	0,57	0,7
Sal	0,17	0,2	0,18	0,2
Farinha de trigo	40	50	41,7	50
Água	59	75	56,3	67,5
Bicarbonato de sódio	0,20	0,3	0,21	0,3
Total	100	127,3	100	119,8

Com base nas receitas das Indústrias 01 e 02 foi desenvolvida uma nova formulação, servindo como um padrão para a realização dos cálculos. A redução de água foi considerada a mesma citada anteriormente, ou seja, 10%. Foi calculada a nova composição para a massa com a redução da adição de água (Tabela 7).

As composições químicas da massa do wafer com e sem o aditivo foram calculadas através da composição e da porcentagem de cada ingrediente que as compõe.

O cálculo da redução da necessidade de energia foi baseado na diferença do teor de umidade das massas, por isso foi considerado que a umidade final do wafer (U_f) seria mantida constante. Além disso, o interesse das indústrias é de não reduzir o peso do wafer por motivos de conveniência.

Foi, portanto, calculada a composição do wafer assado a partir do seu teor de sólidos (X_s), que é constante, e da massa crua.

– Balanço de massa

Para a obtenção das vazões de massa (M), vapor (V) e de produto (P) de cada caso foi considerado que são produzidas 20 bateladas por turno de 8h.

Os valores de M foram obtidos através do peso total de uma batelada de massa que está descrito na Tabela 7. Já a vazão da Produção de placas de wafer foi calculada com base no teor inicial e final de sólidos, uma vez que o vapor eliminado é praticamente apenas água. Os valores de V são a diferença entre M e P .

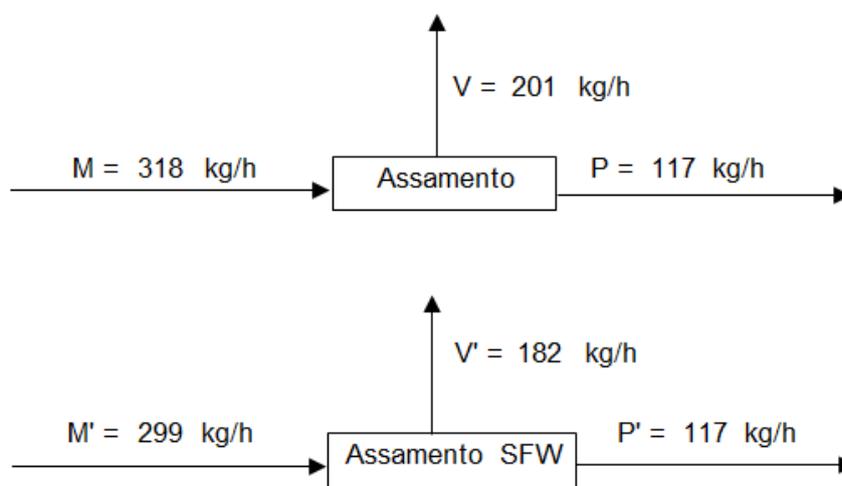


Figura 3. Diagrama de bloco da etapa de assamento do wafer com e sem o SFW.

A Figura 3 ilustra o balanço de massa na etapa de assamento do wafer com e sem o SFW. Fica claro que a diferença das vazões do vapor que deve ser eliminado do sistema é representativa.

– Balanço de energia

Este tópico mostra como foi realizada a obtenção da energia necessária para o assamento da massa de wafer dos dois casos. Para fins de cálculos foi considerado que toda a água é evaporada pelo calor latente ao atingir 100 °C e que a temperatura inicial da massa é de 25 °C.

Durante os testes realizados na Indústria 01 foi medida a temperatura da placa de wafer na saída do forno, que foi de cerca de 150 °C. Portanto foi estipulado que a placa aquece ainda mais após a evaporação da água até esta temperatura.

$$Cp_{proteina} = 2,008 + (1,209.10^{-3}T) - (1,313.10^{-6}.T^2) \quad (1)$$

$$Cp_{lipideo} = 1,984 + (1,473.10^{-3}T) - (4,801.10^{-6}.T^2) \quad (2)$$

$$Cp_{Carboidrao} = 1,549 + (1,962.10^{-3}T) - (5,934.10^{-6}.T^2) \quad (3)$$

$$Cp_{minerais} = 1,092 + (1,889.10^{-3}T) - (3,682.10^{-6}.T^2) \quad (4)$$

$$Cp_{agua} = 4,176 + (9,086.10^{-5}T) - (5,473.10^{-6}.T^2) \quad (5)$$

$$Cp_{fibras} = 1,846 + (1,831.10^{-3}T) - (4,651.10^{-6}.T^2) \quad (6)$$

Onde: T = Temperatura da massa/produto (K)⁹.

Para que seja possível realizar diretamente os cálculos das entalpias (H) e pelo fato da temperatura ser variar durante o processo, as equações 1 a 6 foram integradas em relação à dT, obtendo novas equações (7 a 12).

$$H_{proteina} = 2,008.T + (1,209.10^{-3} \cdot \frac{T^2}{2}) - (1,313.10^{-6} \cdot \frac{T^3}{3}) \quad (7)$$

$$H_{lipideo} = 1,984.T + (1,473.10^{-3} \cdot \frac{T^2}{2}) - (4,801.10^{-6} \cdot \frac{T^3}{3}) \quad (8)$$

$$H_{Carboidrao} = 1,549.T + (1,962.10^{-3} \cdot \frac{T^2}{2}) - (5,934.10^{-6} \cdot \frac{T^3}{3}) \quad (9)$$

$$H_{minerais} = 1,092.T + (1,889.10^{-3} \cdot \frac{T^2}{2}) - (3,682.10^{-6} \cdot \frac{T^3}{3}) \quad (10)$$

$$H_{agua} = 4,176.T + (9,086.10^{-5} \cdot \frac{T^2}{2}) - (5,473.10^{-6} \cdot \frac{T^3}{3}) \quad (11)$$

$$H_{fibras} = 1,846.T + (1,831.10^{-3} \cdot \frac{T^2}{2}) - (4,651.10^{-6} \cdot \frac{T^3}{3}) \quad (12)$$

Com base na Tabela 6 da composição centesimal e nas novas equações, foram obtidas as entalpias de cada elemento. Em seguida foi realizada uma média ponderada de cada substância para obter a entalpia de aquecimento da massa para os dois casos (Hm e Hm').

A diferença entre estes dois resultados representa a energia necessária para aquecer 1 kg de massa crua de 25 para 100°C (ΔHm).

O calor latente representa o calor necessário para evaporar apenas a água que contém nas massas em questão. Portanto a quantidade de energia por quilo requerida para realizar esta mudança de fase é constante e igual a $Ql = 2256 \text{ kJ/kg}$.

O calor necessário para aquecer a placa de wafer após a evaporação da água (ΔHp) foi calculado da mesma maneira que o ΔHm .

$$Q_N = \Delta Hm.M + Ql.V + \Delta Hp.P \quad (13)$$

Onde:

Q_N = calor total necessário para o assamento (kJ/h);

ΔHm = Calor necessário para aquecer a massa (kJ/h);

M = Vazão da massa (kg/h);

Ql = Calor latente de evaporação (kJ/h);

V = Vazão de Vapor (kg/h);

ΔHp = Calor necessário para aquecer a placa de wafer (kJ/h);

P = Vazão do produto (kg/h).

O calor total necessário para assar o produto foi obtido pela soma do calor de aquecimento até 100°C , da evaporação da água da massa e do aquecimento da placa até cerca de 150°C , mostrado pela equação 13. Este parâmetro é válido caso não existam perdas, como na prática isto não é possível, foram considerados dois tipos de perdas: por condução (estimado) e pela liberação dos gases de combustão.

Tabela 8. Diferença da entalpia de cada elemento durante o aquecimento da massa sem o aditivo.

	Carboidrato	Proteína	Lipídeo	Fibra	Água	Minerais	Hm (kJ/kg)
$^\circ\text{C}/\text{Teor}$	0,295	0,039	0,014	0,008	0,637	0,005	-
25	39,3	50,6	50,0	46,7	104,4	27,9	81,3
100	163	206	204	192	416	117	326,1
						$\Delta Hm =$	244,8

Tabela 9. Diferença da entalpia de cada elemento durante o aquecimento da massa com o aditivo.

	Carboidrato	Proteína	Lipídeo	Fibra	Água	Minerais	Hm (kJ/kg)
$^\circ\text{C}/\text{Teor}$	0,313	0,042	0,015	0,008	0,614	0,005	
25	39,3	50,6	50,0	46,7	104,4	27,9	79,7
100	163	206	204	192	416	117	320,2
						$\Delta Hm' =$	240,4

As Tabelas 8 e 9 mostram os resultados do calor necessário para aquecer a massa crua de 25°C até 100°C com e sem a redução da adição de água.

Tabela 10. Diferença da entalpia de cada elemento durante o aquecimento da massa após o assamento.

	Carboidrato	Proteína	Lipídeo	Fibra	Água	Minerais	Hp (kJ/kg)
$^\circ\text{C}/\text{Teor}$	0,803	0,107	0,039	0,021	0,015	0,014	
100	162,7	206,4	204,2	192,2	416,2	117,5	172,8
150	248	313	309	292	621	181	262,8
						$\Delta Hp =$	89,9

Pelo fato da umidade final ter sido considerada constante, a composição e consequentemente a quantidade de energia para aquecer o wafer de 100°C até 150°C foi a mesma para os dois casos.

Considerando uma perda de energia do forno por condução de 20%, os valores do calor do forno resultaram em $Q_F = 6,50.10^{05}$ kJ/h para a massa sem o aditivo e $Q_F' = 5,92.10^{05}$ kJ/h com o aditivo.

– Poder calorífico

Para que seja possível estimar uma redução de emissão de gás carbônico a energia deve provir de uma combustão. Portanto o combustível escolhido para os cálculos foi o gás natural, comumente utilizado em indústrias de biscoitos.

Tabela 11. Composição química do gás natural¹⁰.

C	0,703
H	0,217
O	0
S	0
W (H ₂ O)	0
Cinzas	0
CO ₂	0,015
N ₂	0,007

Através da composição do gás natural na Tabela 11 pode ser calculado o Poder Calorífico Superior (PCS) e, em seguida, o Poder Calorífico Inferior (PCI) pelas equações 14 e 15 respectivamente.

$$PCS = 33900.C + 141800.(H - \frac{O}{S}) + 9200.S \quad (14)$$

$$PCI = PCS - 2440.(9.H + W) \quad (15)$$

Onde:

H, C, O, S e W são as quantidades em kg de substância por kg de combustível do hidrogênio, carbono, oxigênio, enxofre e água, respectivamente¹¹.

Com base no tipo do combustível e na sua constituição, foram obtidos os valores poder calorífico superior de $PCS = 5,87.10^{04}$ kJ/kg e poder calorífico inferior de $PCI = 5,35.10^{04}$ kJ/kg.

– Perda de energia pelos gases de combustão

Utilizando os valores da Tabela 11 é possível determinar os volumes de cada gás liberado e do volume de ar necessário para realizar a combustão.

Para que o processo de combustão seja completo, o ar que entra na câmara de combustão deve estar em excesso. Este excesso é necessário para garantir que todo o combustível seja consumido. No entanto, enquanto o excesso de ar ajuda na combustão, ele também aumenta a perda de energia pela liberação de gases de combustão. Sendo assim, a quantidade ótima de excesso de ar é aquela que mantém as perdas energéticas a um valor mínimo considerado de 20%. A umidade do ar média (U_{ar}) foi considerada de 0,03 kg/kg¹².

$$\boxed{Var = 0,0885.(C + 0,37.S) + 0,265.H} \quad (16)$$

$$\boxed{Vt = Var.(1 + \% Excesso)} \quad (17)$$

$$\boxed{V_{CO_2} = 1,866.C} \quad (18)$$

$$\boxed{V_{H_2O} = 11,1.H + 1,24.W + 1,24.Var.Uar} \quad (19)$$

$$\boxed{V_{N_2} = 0,79.Var + 0,8.N} \quad (20)$$

$$\boxed{V_{SO_2} = 0,7.S} \quad (21)$$

$$\boxed{V_{exc} = Vt - Var} \quad (22)$$

Onde: Var = Volume estequiométrico de ar necessário para a combustão (m³/kg);

Vt = Volume total de ar para a combustão (m³/kg);

V_{CO₂} = Volume de CO₂ emitido na combustão de um quilo de gás natural (m³/kg);

V_{H₂O} = Volume de H₂O emitido na combustão de um quilo de gás natural (m³/kg);

V_{N₂} = Volume de N₂ emitido na combustão de um quilo de gás natural (m³/kg);

V_{SO₂} = Volume de SO₂ emitido na combustão de um quilo de gás natural (m³/kg).

Foram calculados os respectivos volumes de cada gás pelas equações 16 – 22¹³ e os valores são mostrados na Tabela 12.

Tabela 12. Volume de entrada e saída dos gases da câmara de combustão do forno.

	Gás	Volume (m ³ /kg)
Entrada	Ar	12,9
	Ar Total	15,4
Saída	CO ₂	1,38
	N ₂	10,17
	H ₂ O	3,11
	Ar Excesso	2,57

Calor é pedido pelos gases de combustão que são liberados pela chaminé. Tais gases não condensam, somente reduzem suas temperaturas por calor sensível. A Figura 4 informa as quantidades de calor carregadas pelos gases de combustão, em função da temperatura de saída.

Estima-se que a temperatura de saída dos gases é de aproximadamente 250°C. Sendo assim, foram lidos no gráfico os valores do calor perdido em kJ/m³ para serem multiplicados pelos valores da Tabela 12 e desta forma obter o calor emitido em kJ/kg de combustível.

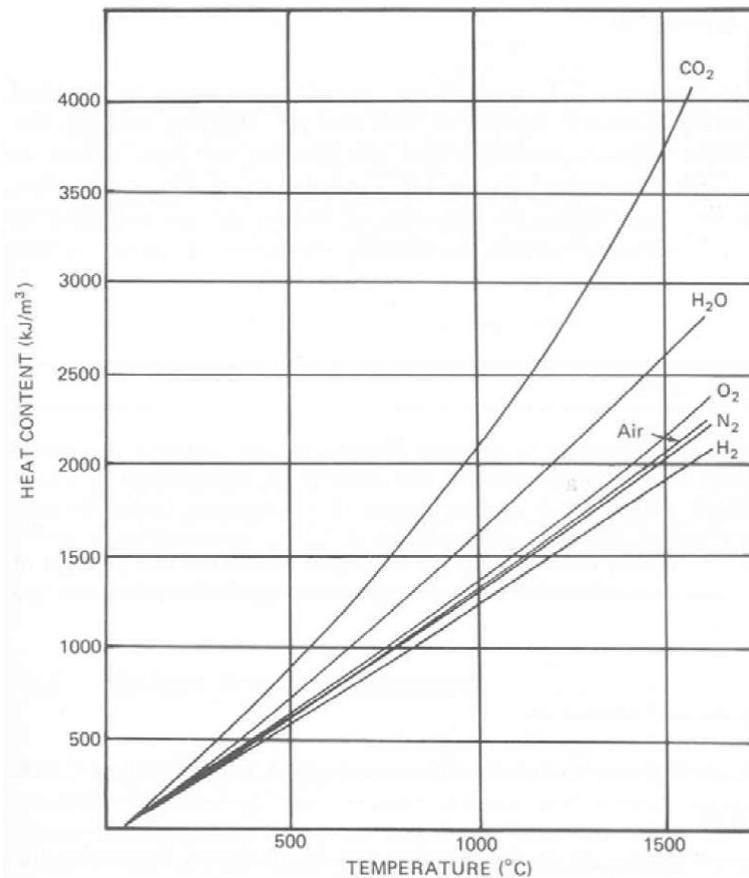


Figura 4. Gráfico da quantidade de calor liberado pelos gases de combustão em função da temperatura de saída.

Pelo fato do gás natural não conter enxofre, o gás dióxido de enxofre foi removido da Tabela 13. Portanto a perda total de energia pela liberação dos gases de combustão é de $Q_{GC} = 5.497$ kJ/kg de gás natural.

Tabela 13. Calor liberado pelos gases de combustão.

Gás	H (kJ/m ³)	Q_{GC} (kJ/kg)
CO ₂	500	691
N ₂	300	3051
H ₂ O	320	964
Vexc	300	772

– Vazão de combustível

Em seguida foi possível calcular o valor de calor líquido (Q_{liq}), que nada mais é que a quantidade de energia fornecida pela combustão levando em consideração as perdas. Por isso este valor é constante para os dois casos.

$$Q_{liq} = PCI - Q_{GC} \quad (23)$$

$$m_{GN} = \frac{Q_F}{Q_{liq}} \quad (24)$$

Onde: Q_{liq} = Calor líquido de combustão (kJ/kg);

PCI = Poder Calorífico Inferior do gás natural (kJ/kg);
 Q_{GC} = Perda de calor pelos gases de combustão (kJ/kg);
 Q_F = Calor do forno necessário para o assamento (kJ/h);
 m_{GN} = Vazão mássica do gás natural (kg/h).

Pelo fato da perda de energia por condução já ter sido considerada no Q_F , o cálculo do calor líquido se resume a equação 23. Logo após, a vazão mássica de combustível foi obtida através da equação 24¹² como mostra a Tabela 14.

Tabela 14. Resultados das vazões de combustível do forno e da estimativa da redução da temperatura do forno.

	Q_F (kJ/h)	Q_{liq} (kJ/kg)	m_{GN} (kg/h)	T_F (°C)
Padrão	$6,50 \cdot 10^{05}$		13,5	170
SFW	$5,92 \cdot 10^{05}$	$4,80 \cdot 10^{04}$	12,3	154,8
Redução (Δ)	$5,81 \cdot 10^{04}$	-	1,21	15,2

A redução do consumo do combustível foi de $\Delta m_{GN} = 1,21$ kg/h, que é um valor representativo considerando que esta linha de produção opera muitas vezes 24 horas por dia. No caso de uma indústria que produz 117 kg/h de placas de wafer 30 dias por mês, 871 kg de gás natural seriam economizados em um mês.

A temperatura dos fornos de wafer varia em torno de 170°C, com base nisso foi calculada a temperatura de assamento proporcional ao novo Q_F . A redução da temperatura do forno calculada foi de cerca de 15°C. Este valor seria a representação em graus Celsius da redução do consumo de combustível. Por isso, a partir do Teste 03 da Indústria 02, foi estipulado que esta seria a redução da temperatura de assamento. A Indústria 01 não permitiu que fosse alterada a temperatura do processo.

– Vazão de gás carbônico

As vazões mássicas dos gases de combustão foram calculadas a partir do volume de cada gás que é gerado na queima de um quilo de gás natural e da vazão de combustível.

Alguns dados são necessários para a conversão da vazão volumétrica para mássica, como descrito na Tabela 15. Foi considerado que os gases de combustão são emitidos a $T_{GC} = 300$ °C. A densidade dos gases foi calculada pela equação dos gases ideais de Clapeyron.

Tabela 15. Considerações e resultados das emissões dos gases de combustão dos dois casos.

Gás	P (atm)	R (L.atm/ K.mol)	T_{GC} (K)	MM (g/mol)	D (kg/m ³)	m (kg/h)	m_{SFW} (kg/h)
CO ₂				44	0,936	17,5	15,9
N ₂	1	0,082	573	28	0,596	82,0	74,7
H ₂ O				18	0,383	16,1	14,7
Vexc				28,8	0,613	21,3	19,4

Conclui-se que a redução da emissão de gás carbônico, pela redução de consumo de combustível, foi de $\Delta m_{CO_2} = 1,57$ kg/h. Isto evitaria que 1128 kg de CO₂ fossem liberados para a atmosfera em um mês, considerando uma produção de 117 kg/h de placas de wafer.