



Revista Eletrônica Multidisciplinar Pindorama
do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia – IFBA
Nº 01 – Ano I – Agosto/2010 – www.revistapindorama.ifba.edu.br

Tratamento de Compostos Orgânicos Voláteis pela Técnica da Incineração Catalítica

Prof. MSc. Richard Jojima Nagamoto

Professor do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia – IFBA
richard.nagamato@gmail.com

Prof. Dr. Georges Kaskantzis Neto

Professor e Pesquisador do Departamento de Engenharia Química da Universidade Federal do Paraná - UFPR
kaska@ufpr.br

Profª. Drª. Nina Waszczynskyj

Professora Sênior do Departamento de Engenharia Química da Universidade Federal do Paraná - UFPR
ninawas@ufpr.br

Profª. MSc. Katielle Rosalva Voncik Córdova

Professora Colaboradora UNICENTRO / PR
kvcordova@iq.com.br

Resumo:

Os Compostos Orgânicos Voláteis (VOC's) constituem-se em uma importante classe de poluentes atmosféricos. O presente trabalho tem como objetivo estudar a redução dos VOC's originados no processamento do café. Os resultados mostram que os principais VOC's, provenientes do processo de torrefação do café, são integralmente convertidos a monóxido de carbono e água pela técnica da incineração catalítica.

Palavras-chaves: Incineração catalítica. Compostos orgânicos voláteis. VOC's. Café. Torrefação.

Introdução

A problemática da poluição atmosférica tem sido crescente nas últimas décadas devido ao crescimento populacional e industrial. Um dos setores industriais responsáveis pela contaminação do ar atmosférico é a indústria de processamento e torrefação de café. Os odores emitidos durante o processamento da matéria-prima é alvo de constantes reclamações da comunidade circunvizinha, fazendo com que esse setor industrial adote soluções viáveis tecnicamente para a redução da contaminação do ar.

Neste sentido, o presente trabalho tem como objetivo estudar o processo de torrefação do café, identificar os principais compostos voláteis orgânicos e avaliar, teoricamente, a técnica da incineração catalítica para a redução da contaminação atmosférica associada a percepção do aroma e odor de café. Inclui as etapas de análises físico-químicas do café verde, a torrefação do café em escala laboratorial, a simulação do processo de torrefação do café e a incineração catalítica do gás residual gerado no processo.

1. Problemática da Poluição Industrial

Grande parte da população está exposta aos poluentes, que podem ocasionar o aparecimento de câncer, bronquites crônicas, entre outras enfermidades causadas por poluentes químicos.

A contaminação atmosférica pode ser definida, como sendo uma condição que é desenvolvida quando certas substâncias já presentes na atmosfera alcançam concentrações acima do seu nível normal. Estas substâncias pode ser um composto químico natural ou artificial, apresentado na natureza na forma de gases, gotas, ou partículas sólidas.

Os contaminantes atmosféricos dividem-se em dois grupos básicos, os primários quando procedentes das fontes emissoras e, os secundários, originados por transformação química entre os contaminantes primários (CORNWELL, 1991).

1.1. Compostos Voláteis orgânicos (VOC's)

Os VOC's são uma classe importante de poluentes atmosféricos, comumente encontrados na atmosfera ao nível do solo em todos os centros urbanos e industriais.

São definidos como compostos orgânicos cujos vapores podem reagir fotoquimicamente na atmosfera formando névoa, popularmente chamado de "smog" (JENNINGS, 1984). Segundo HARRISON, (1995) "VOC" é um composto volátil orgânico cuja pressão de vapor a 20°C é menor que 101,3 kPa e maior que 0,13 kPa.

Os compostos voláteis orgânicos estão presentes na atmosfera como resultado de atividades humanas e dos processos biogênicos.

1.1.1 Influência dos Poluentes na atmosfera

Os hidrocarbonetos biogênicos e de origem industrial são ativamente envolvidos na química da atmosfera e as consequências das emissões destes compostos podem ser rapidamente resumidas (HARRISON, 1995):

- reagem rapidamente com ozônio e radicais hidroxila, formando, entre outros produtos, CO, e impactam diretamente na capacidade oxidante da troposfera;
- em áreas de alta concentração de NO_x, podem contribuir para a formação de ozônio em escalas regionais influenciando, portanto, o processo de formação de oxidantes fotoquímicos;
- podem contribuir significativamente no aumento do efeito estufa;
- podem produzir ácidos orgânicos e contribuir na acidificação de áreas continentais remotas e rurais;
- estão envolvidos na geração de nitratos orgânicos, através do sequestro e subsequente reações com o NO_x e;
- podem conduzir para a formação de aerossóis orgânicos e portanto, contribuir para a diminuição da visibilidade em escala regional.

1.2 Técnicas de Tratamento

1.2.1 A adsorção

Adsorção é um dos principais processos para a remoção de poluentes de correntes gasosas e líquidas contaminadas com VOC's. A adsorção ocorre através da transferência de massa do poluente de uma fase gasosa ou líquida para um sólido poroso devido a existência de um gradiente de concentração (ALLOWAY; AYRES,1993).

Os sólidos porosos chamados de adsorventes apresentam uma grande área superficial, necessária para a ocorrência do fenômeno. O carvão ativo, por exemplo, tem uma área superficial na ordem de 500 - 1500 m²/g, dependendo do tipo e estado de ativação (ALLOWAY; AYRES,1993).

1.2.2 A absorção

A absorção é uma operação na qual um ou mais componentes de uma mistura gasosa são separados por contato com um líquido absorvente. Os absorvedores são projetados para promover o contato entre o gás contaminado e o líquido absorvente (JENNINGS, 1984).

As unidades de absorção operam através do contato do gás e solvente líquido, promovendo a difusão molecular dos componentes na interface. A absorção é a difusão seletiva ou completa de gases e vapores e seu acúmulo em líquidos absorventes.

A absorção física é usada para se obter alta qualidade do solvente recuperado, como no caso de misturas de solventes solúveis em água. O processo pode ser aplicado para compostos aromáticos, alifáticos, hidrocarbonetos halogenados, álcoois, cetonas, ésteres e glicóis.

Na absorção química, as substâncias a serem removidas da corrente de gás reagem com o líquido para formar produtos não-voláteis ou apenas compostos voláteis.

1.2.3 A Condensação

No processo de condensação os vapores são resfriados abaixo do ponto de orvalho e então passam para o estado líquido. A condensação ocorre quando a pressão parcial de um poluente na corrente de gás é igual à pressão de vapor da substância pura a uma dada temperatura de operação.

A condensação é do tipo direto ou indireto. Na condensação por contato direto, o fluido de resfriamento e o condensado são misturados e combinados e, no tipo indireto, o fluido de resfriamento e o vapor/condensado trocam calor por alguma área de superfície associada ao equipamento, sem se misturarem. O processo de condensação é usada para a pré-separação e recuperação de substâncias orgânicas (BAUMBACH, 1996).

1.2.4. Separação por membrana

A separação por membranas é baseada na capacidade de certos materiais serem permeáveis seletivamente por diferentes gases ou vapores. Isto causa um efeito de separação, em casos ideais, o que permite selecionar os componentes (BAUMBACH, 1996).

Basicamente, a corrente de gás é conduzida através de membranas onde as substâncias podem permear rapidamente e acumular além desta. A corrente parcial do gás carregada com solvente é conduzida para a unidade de condensação onde o solvente é retirado na forma líquida.

Quando comparada com outras técnicas de recuperação de solventes, o processo de membranas apresenta uma importante vantagem; a possibilidade de operar a baixas temperaturas, em torno de 200°C (PAGÉ, 1998).

1.2.5 Tratamento Biológico

No biofiltro o fluxo de poluentes atravessa um material biologicamente ativo, é absorvido e subseqüentemente transformados pelos microrganismos. (BAUMBACH, 1996).

Os compostos voláteis orgânicos contendo cloro, nitrogênio ou enxofre também podem ser degradados por esta técnica.

1.2.6 Incineração Térmica

A incineração térmica destrói as emissões de VOC's por oxidação térmica gerando dióxido de carbono, água e outros produtos de combustão (JENNINGS, 1984).

1.2.7. A Incineração Catalítica

As misturas devem conter concentrações de VOC abaixo dos 25% do LEL e quantidade suficiente de oxigênio para incinerar o VOC e o combustível auxiliar (KASKANTZIS, 1995).

A oxidação catalítica de poluentes gasosos é interessante porque necessita de menor quantidade de combustível auxiliar em comparação com a incineração térmica. Essa menor quantidade depende da natureza do gás poluente na corrente.

Durante o processo de incineração, o controle da concentração de VOC, temperatura e vazão são importantes para a manutenção da integridade física do catalisador e a operação segura do equipamento.

Altas concentrações de VOC's na incineração catalítica provocam elevadas liberações de calor no sistema, o que pode destruir o catalisador (HARRISON, 1995).

A eficiência da incineração depende de três fatores (JENNINGS, 1984):

- temperatura: - de 300 a 450°C para catalisadores baseados em metais preciosos;
 - de 200 a 300°C para catalisadores baseados em óxidos metálicos.
- velocidade espacial: vazões a serem tratadas/volume do catalisador
 - 30000 a 40000 h⁻¹ para catalisadores baseados em metais preciosos;
 - 10000 a 15000 h⁻¹ para catalisadores baseados em óxidos metálicos.
- concentração: deve situar-se entre 25 e 50% do limite inferior de explosividade (LEL) (KASKANTZIS, 1995).

A variação da concentração do VOC no ar, na mesma temperatura de entrada do gás, influencia os perfis da temperatura do gás na direção axial e radial no leito do catalisador.

Os catalisadores empregados são preparados com metais nobres do grupo da platina e impregnados sobre suportes cerâmicos ou metálicos conforme divulgam os trabalhos de Keith (1990) e Kenneth (1990).

O leito catalítico é constituído de uma estrutura na forma de painel ou favos de mel, onde o catalisador é depositado. Grande parte dos catalisadores opera na temperatura máxima de 650°C, quando começa a volatilização dos elementos ativos do catalisador com grande perda de atividade e redução de sua vida útil (HECK,1988).

As principais vantagens do processo de incineração catalítica são as altas eficiências de controle, baixo consumo de energia auxiliar e baixos custos de operação comparada com a oxidação térmica.

Nos compartimentos de altas temperaturas de entrada do gás, o efeito da concentração sobre a conversão é menor do que nas regiões de baixas temperaturas de entrada do gás. O efeito mais importante devido ao aumento da concentração é o acréscimo da temperatura do gás e do leito de catalisador.

Muitos gases contendo poluentes combustíveis de processos industriais estão em temperaturas baixas, por isso, são usados como pré-aquecedores para elevar a temperatura para que o catalisador seja realmente efetivo. A eficiência da incineração catalítica está na ordem de 95% a 98% (KASKANTZIS, 1995).

A queda de pressão no incinerador catalítico é muito baixa, na ordem de décimos de polegadas de coluna d'água. Os custos de operação são relativamente baixos, com exceção do custo de manutenção do catalisador. Os custos do catalisador dependem do tipo de gás que está sendo tratado. Em alguns casos, o gás deve sofrer uma limpeza, ficando livre de particulados antes de entrar no incinerador.

A deposição de particulados no leito do catalisador diminui a área disponível para a ação catalítica. O tempo de vida útil de um catalisador pode variar entre 3 e 5 anos, quando não apresentar deposição de partículas em seu leito. O catalisador utilizado na incineração catalítica é também um resíduo sólido gerado que pode ser enviado para o fabricante para regeneração. Na incineração térmica e na absorção não há geração de resíduos sólidos. Os leitos catalíticos são suscetíveis a venenos

catalíticos (P, Sb, Mn, S) implicando na necessidade de troca frequente do catalisador.

2. As espécies e variedades de café

2.1 *Coffea Arábica*

A espécie *Coffea Arábica* tem grande significado econômico para as Américas e demais regiões que a cultivam. Seu produto é de qualidade superior em relação ao aroma e sabor e o de maior aceitação em todos os mercados. Em torno de 75% da produção mundial exportável de café são desta espécie e apenas 25% de *C. canephora* (TOLEDO,1998).

Assim como as diversas variedades da espécie *C. arabica* receberam a denominação geral de café Arábica, os cultivares da espécie *C. canephora* recebem a designação genérica de Robusta.

No Brasil, as maiores lavouras são formadas com sementes do café "Nacional" ou "Comum", derivadas das sementes inicialmente introduzidas no país (TOLEDO,1998). Estas, provenientes das variedades, arábica e canephora.

2.2 *Coffea robusta*

O café da variedade robusta é mundialmente conhecido pela condição de adaptar-se a variadas condições climáticas. Os principais cultivares *C. canephora* são: "Kouillou"(Conillon), "Guarani", "Robusta", "Laurentii", "Oka", "Uganda", "Crassifolia", "Bukobensis", "Ambrio" e "Cazengo".

É produzido em menores quantidades do que as outras espécies no Brasil, Equador e Guatemala. O café robusta concorre com os cafés de maior qualidade como o *C. arabica*, tendo em vista a maior aceitação no mercado internacional devido ao menor custo quando utilizado para a produção de café solúvel (TOLEDO, 1998).

2.3 OS COMPOSTOS VOLÁTEIS DO CAFÉ E INTENSIDADE DE ODOR

Segundo De Maria; Moreira; Trugo (1999), vários compostos heterocíclicos tem sido identificados no café torrado, alguns com impacto no aroma do café. **Clarke e Macrae** (1988) identificaram ao redor de setecentos compostos voláteis no café torrado, sendo que a maioria está presente em quantidades menores que 1 parte por milhão (ppm).

Os VOC's presentes no café torrado englobam diferentes classes químicas de substâncias orgânicas, tais como: aldeídos, mercaptanas, compostos cíclicos, furanos, pirazinas, tiazóis, oxazóis e diversos compostos contendo enxofre e nitrogênio (CLARKE E MACRAE, 1988).

Apesar da grande quantidade de VOC's presente no café torrado, o aroma é resultado de uma combinação destes e das condições do processo de torrefação. (CLARKE E MACRAE, 1988).

Segundo DE Maria; Moreira; Trugo (2000) bem como Dart & Nursten (1995), os aldeídos estão presentes em altas concentrações no café verde. No café torrado são encontrados o metanal e etanal que conferem um aroma pungente, de frutas e floral, são rapidamente perdidos por volatilização e oxidação no café torrado fresco.

A auto-oxidação de lipídeos resulta na formação de aldeídos voláteis como o hexanal, (Z)-2-nonenal e o (E)-2-nonenal que são oriundos da quebra de hidroperóxidos de lipídeos. Quando os lipídeos são expostos ao aquecimento em atmosfera de oxigênio, estes se decompõem em produtos secundários, dentre os quais os aldeídos (DE MARIA; MOREIRA;TRUGO, 2000).

Alguns aldeídos como o metional e o 2-metil-propanal tem sua origem relacionada à degradação de Strecker, assim como a reação de Maillard também é considerada como uma via de produção de aldeídos (DE MARIA; MOREIRA;TRUGO 2000).

Segundo DE Maria; Moreira; Trugo (2000) observou-se que a adição de (E)-2-nonenal ao café solúvel forneceu uma nota de madeira e bebida fresca e reduziu as notas ácidas e adstringentes menos desejáveis, este composto está presente no café torrado.

Os compostos sulfurosos são de grande importância no aroma de café torrado, apesar de estarem presentes em baixas concentrações. Estes compostos possuem características de odor marcante apesar dos baixos valores de limiares de detecção,

que é da ordem de 10 a 4000 partes por bilhão (ppb). O furfurithiol confere um aroma de café torrado fresco quando presente em concentração de 0,01 a 0,5 ppb (DART & NURSTEN, 1995).

Os tiazóis são compostos heterocíclicos contendo em seu anel átomos de nitrogênio e enxofre. Segundo Dart & Nursten (1995), essa classe de compostos é responsável por uma grande variedade de aromas, predominando o aroma de nozes. São formados via reação de Maillard entre metionina, cisteína, cistina e açúcares redutores ou em reações intermediárias de Maillard (DE MARIA ; MOREIRA;TRUGO , 1999).

Segundo De Maria; Moreira; Trugo (1999), os furanos são compostos heterocíclicos encontrados em grande quantidade no café torrado e incluem funções como aldeídos, cetonas, ésteres, álcoois, éteres, ácidos e tióis. Aproximadamente cem furanos já foram identificados no café torrado os furanos encontrados em maior quantidade, são mostrados na Tabela 1.

Tabela 1. Os furanos presentes no café torrado

Furano	Faixa de concentração (mg/kg)
Furil-2-metanol	90-135
2-furfural	55-70
2-metil-tetraido-3-furanona	10-16
2-acetil-furano	6-12
Acetato de furila	3,5-5,5
1-(2-furil)-3-propanona	2,5-4,0
4-hidroxi-2,5-dimetil-diidro-3-furanona	109
	57
3-hidroxi-4,5-dimetil-pentaidro-2-furanona	1,47
	0,63
5-etil-3-hidroxi-4-metil-diidro-2-furanona	0,16
	0,085
5-etil-4-hidroxi-2-metil-diidro-3-furanona	17,3
	14,3 (robusta)

Fonte: DE MARIA; MOREIRA;TRUGO (1999)

Os furanos originam-se da degradação de glicídios presentes no café verde. Existem também evidências que são formados mediante a degradação de terpenos (DE MARIA; MOREIRA;TRUGO 1999).

Segundo DE MARIA; MOREIRA; TRUGO (1999), a participação de diversos polissacarídeos como precursores de furanos no café torrado, representa cerca de 40% a 50% em peso dos sólidos solúveis no café verde.

O glicídio de menor massa molecular presente no café verde é a sacarose. A sua concentração média está na faixa de 5% a 8% e de 3% a 5% em peso no café arábica e robusta, respectivamente.

Cerca de setenta pirróis identificados no café torrado foram identificados em meados da década de 60, são compostos característicos presentes nos alimentos processados termicamente. Os pirróis são formados a partir da reação de Maillard, da degradação de Strecker, da pirólise de aminoácidos ou da degradação da trigonelina que serão explicados adiante.

A composição total de proteínas no café torrado varia pouco em relação ao café verde. Os aminoácidos livres é que formam as proteínas, desta forma a composição total no café verde é de cerca de 9% a 12%. Embora os aminoácidos livres representem uma pequena porção do nitrogênio protéico e não são precursores de aroma. (DE MARIA; MOREIRA;TRUGO, 1999)

Os oxazóis são compostos heterocíclicos contendo um átomo de nitrogênio e outro de oxigênio, o mecanismo de formação dos oxazóis é pouco conhecido, apesar de serem formados exclusivamente por tratamento térmico, possuem um aroma doce e semelhante ao de nozes (DE MARIA; MOREIRA;TRUGO 1999).

Cerca de vinte e nove oxazóis e vinte e sete tiazóis foram identificados no café torrado, sendo que, nenhum destes compostos foram identificado como um componente de impacto para o aroma de café (DE MARIA; MOREIRA;TRUGO 1999).

Os compostos voláteis contendo um átomo de enxofre, como os tiofenos, contribuem significativamente para o aroma de café torrado, no entanto, estes compostos estão presentes em concentrações muito baixas , dificultando o estudo quantitativo e a avaliação de suas propriedades sensoriais (DE MARIA; MOREIRA;TRUGO 1999).

A formação dos tiofenos no café está relacionada com a presença de aminoácidos sulfurosos, que degradam durante a torrefação e interagem com os açúcares redutores e intermediários da reação de Maillard, resultando na presença de compostos voláteis sulfurosos. Os tiofenos apresentam um aroma característico

de cebola, embora seus ésteres, aldeídos e cetonas apresentem aroma doce, de caramelo e nozes (DART & NURSTEN, 1995).

As pirazinas são compostos aromáticos contendo átomos de nitrogênio e estão presentes nos alimentos submetidos a tratamento térmico. As metoxi-pirazinas, são encontradas no café verde e são degradadas durante a torrefação.

As pirazinas contribuem para as características sensoriais dos alimentos, esses componentes apresentam propriedades peculiares, sendo considerados aromatizantes importantes para a indústria alimentícia (DE MARIA; MOREIRA; TRUGO, 1999).

As pirazinas podem ser geradas diretamente pela reação de Maillard, por degradação de Strecker ou ainda por pirólise de hidroxí-aminoácidos.

As piridinas são encontradas em alimentos submetidos a atividade microbiana ou a tratamento térmico e, a sua quantidade no café torrado depende do grau de torrefação. (De MARIA; MOREIRA; TRUGO, 1999).

Segundo De Maria; Moreira; Trugo (1999), as piridinas apresentam propriedades sensoriais peculiares, sendo associadas a odor desagradável e característico presente nos alimentos. Estes compostos são responsáveis pelo odor desagradável do café torrado velho. Esta classe possui notas verdes, picantes e adstringentes (DART & NURSTEN, 1995).

3 Material e Métodos

3.1 Análises Físico-Químicas

A matéria prima utilizada é uma mistura de café *arábica* e *robusta* utilizada para a fabricação de café instantâneo granulado. As amostras foram mantidas em local fresco e seco, a temperatura ambiente e acondicionadas em recipientes hermeticamente fechados.

Foram realizadas as determinações, todas em triplicata, de umidade, cinzas, lipídios, proteínas, cafeína e sacarose segundo as metodologias descritas nas Normas Analíticas do Instituto Adolfo Lutz (Adolfo Lutz, 1985; 2005).

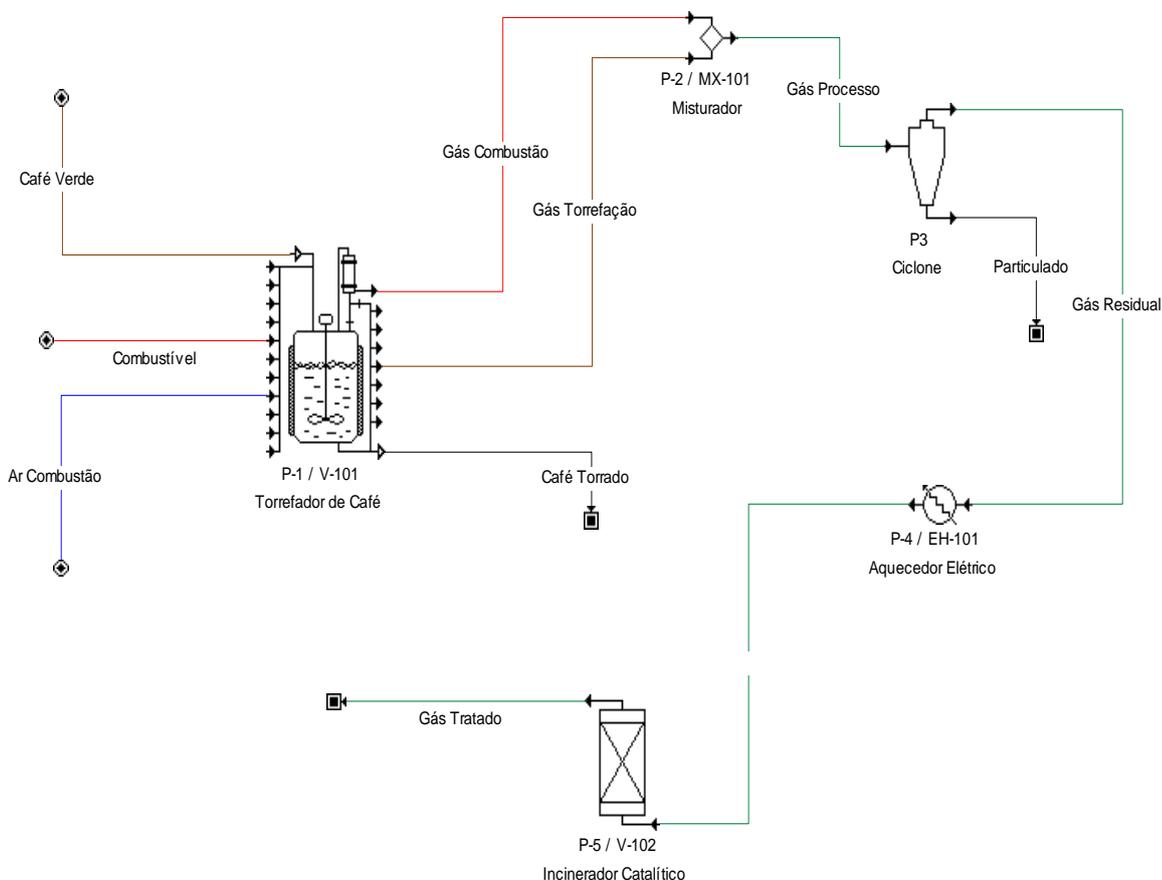
A torrefação das amostras de café verde foi realizada em um torrefador em escala laboratorial com capacidade de 100 g em cada câmara de torra.

As condições operacionais de torrefação foram selecionadas a partir dos trabalhos experimentais e de informações fornecidas pelos fabricantes de torrefadores industriais de café.

3.2 Simulação do Processo de Torrefação

Para a simulação do processo de torrefação do café verde e incineração catalítica dos gases de exaustão foi utilizada a versão acadêmica do simulador de processo SuperPro Designer, versão 4.53, INTELLIGEN INC., NJ, EUA, instalado no laboratório de informática do departamento de Engenharia Química da UFPR.

A Figura 1 mostra o fluxograma do processo de torrefação do café verde e incineração catalítica dos gases de exaustão, que inclui um incinerador catalítico de VOC's. O processo é formado por um Torrefador de café (P1), Divisor de corrente (P2), Misturador (P3), Ciclone (P4), Aquecedor elétrico (P5) e um Incinerador catalítico (P6).



O torrefador de café (P1), com capacidade máxima de 240 kg, realiza a torra do café verde na temperatura de 240°C em 17 minutos e as condições adotadas na simulação são as mesmas utilizadas no torrefador de café em escala laboratorial. A corrente de gás residual proveniente do torrefador é separada no divisor de correntes para uma descrição detalhada da composição do gás de torrefação. Em seguida, o gás residual é enviado ao ciclone para remoção do material particulado. Após esta etapa, o mesmo é aquecido até a temperatura necessária para a conversão catalítica dos VOC's em CO₂ e H₂O. Finalmente o gás residual é introduzido no incinerador catalítico, onde ocorre a conversão dos VOC's acompanhada de liberação de calor.

Os dados inseridos no simulador para entrada do torrefador são mostrados na Tabela 2.

Tabela 2. Dados de entrada do torrefador para a simulação do processo.

Componente	Carga (kg/batelada)	Composição (% peso)
Café Verde	240,00	52,17
Combustível	10,00	2,18
Ar de combustão	213,22	45,65
TOTAL	460,00	100,00

Fonte: Nagamoto, 2001.

Os dados experimentais das análises físico-químicas do café, utilizados para a simulação do processo, são mostrados na Tabela 3.

Tabela 3. Análise físico-química do café utilizado nos processos de torrefação

Composto	Café Verde	Café torrado
Umidade (% peso)	9,54	2,22
Cinzas (% peso)	3,41	3,82

Massa volatilizada 17,17
(media)(%)

Fonte: Nagamoto, 2001.

Segundo EPA (1995), os principais VOC's presentes no gás de torrefação são os tóxicos e os que conferem odor característico do processo de torrefação. Os VOC's tóxicos encontrados são o acetaldeído, ácido acético, acroleína e o formaldeído. A Tabela 4 mostra os fatores de emissão apresentados no relatório EPA (1995).

Tabela 4. Fatores de emissão para processos de torrefação de café.

Composto	Fator de emissão (kg/ton)
Material particulado	2,0000
Monóxido de carbono	0,7400
Dióxido de nitrogênio	0,5000
VOC _{TOTAIS}	0,8750
Acetaldeído	0,0075
Ácido acético	0,4100
Acroleína	0,0145
Formaldeído	0,0910

Fonte: EPA, 1995.

A tabela 5 mostra os valores dos fatores de emissão dos VOC's responsáveis pelo odor de café torrado.

Tabela 5. Valores dos fatores de emissão adotados para os VOC's_{ODOR}

Composto	Fator de emissão (kg/ton)
Dimetilamina	0,020
Furano	0,112

Guaiacol	0,025
Metanol	0,050
Pirazina	0,070
Piridina	0,035
Pirrol	0,020
Tiofeno	0,020

Fonte: EPA, 1995.

De acordo com a tabela 4, o valor do fator de emissão para os VOC's totais adotados neste trabalho foi de 0,875 kg/ton de café, deste tem-se ainda a quantidade do grupo de VOC's tóxicos na ordem de 0,523 kg/ton e de VOC's responsáveis pelo odor é da ordem de 0,352 kg/ton de café processado.

A partir das informações mostradas nas tabelas 4 e 5, estabeleceu-se a composição quantitativa e qualitativa do gás gerado no processo de torrefação do café verde. Cabe ressaltar que esta composição, apesar de simplificada, inclui os principais representantes das diferentes classes químicas de compostos voláteis geralmente presentes nos gases de saída do processo de torrefação.

Uma vez estabelecida a composição do gás de torrefação, foram selecionadas as operações unitárias e parâmetros de operação utilizados para a redução do material particulado e dos VOC's presentes no gás de saída do torrefador.

O incinerador catalítico é formado por um leito fixo de partículas de catalisador esféricas contendo 0,125% em peso de paládio suportado em alumina. O gás residual aquecido na temperatura de 400 °C entra no incinerador e os VOC's são convertidos em dióxido de carbono e água.

Os trabalhos de Yao (1980), revelam que a oxidação de VOC's em catalisadores de metais nobres é de ordem zero em relação a concentração de oxigênio e, varia, na faixa de 0,6 a 1,4 em relação a concentração de VOC's. O estudo de Kaskantzis (1995), sobre incineração catalítica de VOC's em escala piloto, determinou que para diferentes classes de VOC's (cetonas, alcoóis, aldeídos, fenóis

e hidrocarbonetos), na faixa de concentração de 300 a 3000 ppm em ar, faixa de velocidade espacial de 30.000 a 85.000 h⁻¹ e temperatura de entrada do gás residual superior a 400 °C, a conversão dos VOC's em CO₂ e H₂O é superior a 95%.

Para a operação contínua e isotérmica do incinerador catalítico, visando a proteção do catalisador contra a ocorrência de pontos quentes e sinterização térmica, foi estabelecido no simulador que a temperatura máxima dos gases de saída não deve ser superior a 550 °C

4 Resultados e discussão

As análises físico-químicas tiveram como objetivo fornecer os parâmetros para a simulação do processo de torrefação do café e determinar quais os compostos que sofrem maior variação de massa durante o processo de torrefação. A Tabela 6 apresenta os resultados obtidos a partir da análise físico-química das amostras de café verde e torrado.

TABELA 6. Resultados da análise físico-química do café verde e torrado

Composto	Café Verde (% peso)	Café Torrado (% peso)
Lipídios	15,65	16,04
Proteínas	10,11	10,89
Cinzas	3,41	3,82
Umidade	9,54	2,22
Cafeína	0,68	0,67
Glicose	1,07	1,10
Sacarose	9,48	3,35

A Tabela 6 mostra que a maior variação de massa que ocorreu durante a torrefação, conduzido em escala de laboratório, está associada à umidade e aos açúcares. Os resultados mostram que houve uma redução de 76,7% em peso da quantidade de umidade inicial da amostra durante o processo de torra. No trabalho

de Amboni (1997), a variação de umidade do café durante a torra foi da ordem de 85%, o que este próximo com o valor encontrado neste estudo. Os resultados obtidos indicam também que ocorreu uma variação de significativa de massa, da ordem de 57,8%, dos açúcares totais das amostras.

Os dados mostram ainda que a quantidade de lipídeos encontrado nas amostras torradas é maior que a encontrada no café verde, corrobora com os dados divulgados por DART e NURSTEN (1985). Apesar da variação não ser significativa, este fato pode ser provavelmente atribuído a perda de água e portanto, a concentração maior dos lipídeos nas amostras.

Cabe salientar que os demais compostos analisados são sofrem variação significativa de massa nas amostras de café verde em relação ao torrado, o que está de acordo com os trabalhos de DART & NURSTEN (1985), SALDAÑA (1997) e AMBONI (1997).

Conforme mostram os resultados das análise físico-químicas, a maior parte da variação de massa volatilizada durante a torrefação está associada a umidade e pirólise dos açúcares encontrados na amostra original. Dessa forma estima-se que os principais compostos gerados durante o processo de torrefação são água, dióxido de carbono e furanos, uma vez que, estes compostos são os produtos gerados durante a torrefação, através das reações de Maillard e Strecker conforme citado anteriormente.

Cabe salientar que outros compostos voláteis não menos importantes também são gerados durante o processo de torrefação o que confere o aroma característico de café. Porém, estima-se a quantidade deste compostos voláteis presente nos gases de exaustão do processo de torrefação estarão presentes em menor quantidade. O teor de cinzas e cafeína das amostras obtidos neste estudo, encontram-se próximos dos valores reportados na literatura.

Os dados gerados mostram que os compostos que apresentam a maior concentração na entrada do incinerador são o ácido acético, furano, formaldeído e pirazina, portanto, demandam maior comprimento de leito de catalisador para reduzir a concentração no gás tratado. E que a conversão destes compostos em água, dióxido de carbono e nitrogênio é da ordem de 99,98%.

O metanol e a pirazina, apesar de apresentarem diferentes valores de concentração na entrada do incinerador, ambos necessitam de 5,4 metros de leito

de catalisador para obter uma conversão de 99,99% em água, dióxido de carbono e nitrogênio.

O pirrol, dimetilamina e tiofeno necessitam de 4,8 metros de leito de catalisador para reduzir sua concentração na corrente de gás tratado.

Importante ressaltar que, para todos os VOC's, na distância de 2,55 metros de comprimento, a partir da entrada do incinerador, a conversão é da ordem de 99,3%.

Diante do exposto é possível afirmar que, apesar da concentração e do comprimento do leito de catalisador serem distintos para os compostos estudados, o nível de conversão obtido ao longo de 2,5 metros é provavelmente suficiente para a remoção do odor característico do processo de torrefação do café.

Conclusão

Os resultados obtidos com as análises físico-químicas possibilitaram a caracterização da matéria-prima e do produto de torrefação e forneceram informações para a simulação do processo de torrefação de café. A partir destes dados pode-se concluir que:

- o uso de dados experimentais na simulação de processos permite que o modelo teórico do processo e os resultados da simulação sejam mais próximos da realidade;
- o uso do simulador de processo SuperPro Designer possibilitou a simulação do processo de torrefação do café e incineração catalítica dos VOC's presentes no gás residual gerado no processo;
- a eficiência da incineração catalítica, para todos os compostos estudados, é da ordem de 99%. - o gás de torrefação tratado pela técnica da incineração catalítica provavelmente não deve possuir odor característico de café torrado.

Referências Bibliográficas

- ALLOWAY, B. J. & AYRES, D. C. **Chemical principles of environmental pollution**. London, Chapman & Hall, 1993, 291p.
- AMBONI, R. D. M. C. **Utilização de métodos avançados de microscopia e análise sensorial para detecção de fraudes em café torrado e moído**. Florianópolis, Universidade Federal de Santa Catarina, 1997. 108p. (Dissertação de Mestrado)
- BAUMBACH, G. **Air quality control**. New York, Springer, 1996, 490p.
- CLARKE, R. J., MACRAE, R. **Coffee**. New York, Elsevier Applied Science Publishers LTD, 1988. 383p.
- CORNWELL, D. A. & DAVIS, M.L. **Introduction to environmental engineering**. 2 ed. New York, McGraw-Hill, Inc, 1991, 822p.
- DART, S. K.; NURSTEN, H. E. **Coffee chemistry**. London, Applied Science Publishers, 1985. 223p. Vol 1.
- DE MARIA, C. A. B.; MOREIRA, R. F. A.; TRUGO, L. C. Componentes voláteis do café torrado. Parte 1: compostos heterocíclicos. **Química Nova**, 22(2):209-217, 1999.
- EPA - ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Coffe roasting - final report**. U.S.A. 1995.
- FARRAUTO, R. YU, T. and SHAW, H. 1992. **Catalytic oxidation of trichloroethylene over PdO calysts**.AC Symposium Series 45, 141-152.
- HARRISON, R. M. & HESTER, R. E. **Volatile organic compounds in the atmosphere**. Bath, The Royal Society of Chemistry, 1995, 140p.
- HECK, R. M. **Air pollution control**. APCA Annual Meeting and exhibition,1988, Texas, june 19, pp30-36.
- IAL-Instituto Adolfo Lutz- Métodos físicos-químicos para análise de alimentos. 4 ed. Brasília. Ministério da Saúde, 2005. 1018p.
- JENNINGS, M. S. PALAZZOLO, M.A. **Catalytic incinerator for control of volatile organic compounds emissions**. New Jersey, Noyes Publications, 1984, 215p.
- KASKANTZIS, G. N. & MOURA, J. C. **Estudo da incineração catalítica de compostos voláteis orgânicos em planta piloto**. Tese Doutorado, Campinas, Maio, 1995.

- KEITH, J. H. **Catalyst for volatile organic compounds control.** Incineration conference. San Diego, California, May 14-18. 1990
- KENNETH, R. B. **Use of catalyst for VOC control.** New England, Environmental Expo, April 10-12.1990
- NAGAMATO, R. J. **Tratamento de compostos voláteis orgânicos do café pela técnica da incineração catalítica.** Dissertação de mestrado, Curitiba, Junho, 2001.
- PAGÉ, T. **Characterization and controlo f odours and VOC in the process industries.** 1998.
- SALDAÑA, M. D. A.; MAZZAFERA, P. & MOHAMED, R. S. **Extração dos alcalóides: cafeína e trigonelina dos grãos de café com C supercrítico,** Campinas, 17: 1997
- TOLEDO, J. L. B. **Classificação e degustação do café.** Brasília, SEBRAE, 1998. 91p.
- YAO, Y., 1980.**Oxidation of alkanes over noble metal catalysts.**Ind. Eng. Chem. Rod. Res. Dev., 19, 293.

Publicado, em 22 de agosto de 2010, na www.revistapindorama.ifba.edu.br