



Federação das Indústrias do Estado da Bahia

SENAI CIMATEC

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MODELAGEM
COMPUTACIONAL E TECNOLOGIA INDUSTRIAL**

Doutorado em Modelagem Computacional e Tecnologia Industrial

Tese de doutorado

**Eficiência em processos de combustão: Novos
métodos de análise na formação de fuligem**

Apresentada por: Jefferson Willes Gomes de Souza
Orientador: Marcelo Albano Moret Simões Gonçalves
Co-orientador: Alex Álisson Bandeira Santos

Dezembro de 2016

Jefferson Willes Gomes de Souza

Eficiência em processos de combustão: Novos métodos de análise na formação de fuligem

Tese de doutorado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Modelagem Computacional e Tecnologia Industrial, Curso de Doutorado em Modelagem Computacional e Tecnologia Industrial do SENAI CIMATEC, como requisito parcial para a obtenção do título de **Doutor em Modelagem Computacional e Tecnologia Industrial**.

Área de conhecimento: Interdisciplinar

Orientador: Marcelo Albano Moret Simões Gonçalves
SENAI CIMATEC

Salvador
SENAI CIMATEC
2016

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca do Centro Universitário SENAI CIMATEC

S719e Souza, Jefferson Willes Gomes de

Eficiência em processos de combustão: novos métodos de análise na formação de fuligem / Jefferson Willes Gomes de Souza. – Salvador, 2016.

65 f. : il. color.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Albano Moret Simões Gonçalves.

Coorientador: Prof. Dr. Alex Álisson Bandeira Santos.

Tese (Doutorado em Modelagem Computacional e Tecnologia Industrial) – Programa de Pós-Graduação, Centro Universitário SENAI CIMATEC, Salvador, 2017.

Inclui referências.

1. Fractabilidade. 2. Caos. 3. Distância de Hamming. 4. DFA. I. Centro Universitário SENAI CIMATEC. II. Gonçalves, Marcelo Albano Moret Simões. III. Santos, Alex Álisson Bandeira. IV. Título.

CDD: 658. 4062

Nota sobre o estilo do PPGMCTI

Esta tese de doutorado foi elaborada considerando as normas de estilo (i.e. estéticas e estruturais) propostas aprovadas pelo colegiado do Programa de Pós-graduação em Modelagem Computacional e Tecnologia Industrial e estão disponíveis em formato eletrônico (*download* na Página Web:

http://ead.fieb.org.br/portal_faculdades/dissertacoes-e-teses-mcti.html ou solicitação via e-mail à secretaria do programa) e em formato impresso somente para consulta.

Ressalta-se que o formato proposto considera diversos itens das normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), entretanto opta-se, em alguns aspectos, seguir um estilo próprio elaborado e amadurecido pelos professores do programa de pós-graduação supracitado.

Faculdade de Tecnologia SENAI CIMATEC


Doutorado em Modelagem Computacional e Tecnologia Industrial

A Banca Examinadora, constituída pelos professores abaixo listados, leu e aprovou a Tese de doutorado, intitulada "Eficiência em processos de combustão: proposta de novos métodos de análise na formação de fuligem", apresentada no dia 09 de dezembro de 2016, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Título de Doutor em Modelagem Computacional e Tecnologia Industrial.

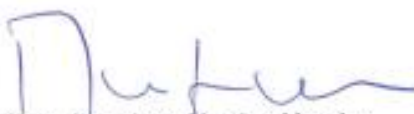
Orientador:


Prof. Dr. Marcelo Albano Moret Simões Gonçalves
SENAI CIMATEC

Coorientador:


Prof. Dr. Alex Álisson Bandeira Santos
SENAI CIMATEC

Membro Interno:


Prof. Dr. Davidson Martins Moreira
SENAI CIMATEC


Membro Interno:


Prof. Dr. Ivan Costa da Cunha Lima
SENAI CIMATEC

Membro Externo:


Prof. Dr. Thadeu Josino Pereira Penna
UFF

Membro Externo:


Prof. Dr. Hermes Alves Filho
UERJ

Dedico este trabalho a minha mãe Cleuza (in memoriam) pelos ensinamentos os quais
tenho imensa gratidão.

Agradecimentos

À minha mãe (in memoriam) pela criação e dedicação durante sua vida à minha formação e aprendizagem;

À minha esposa Ana Carolina, pelas palavras de conforto, incentivo, correções e infinita sabedoria;

Ao meu amigo, pai e orientador Marcelo Moret por compartilhar seus conhecimentos e ser um dos maiores contribuidores para esta conquista;

Ao meu orientador Alex Álisson pela gentileza em disponibilizar os dados para realização desta pesquisa, pela sabedoria e imensa paciência;

Ao Amigo e professor José Carlos pela experiência, maturidade e por ter sido o precursor da minha formação acadêmica;

À minha família, em especial os meus irmãos Mécia, Cinho e Kleber que sempre estiveram ao meu lado e me ajudaram a todo tempo;

Ao meu cunhado Valdeci, que me ajudou em um dos momentos mais difíceis da minha vida e que, com seu incentivo, sempre permitiu acreditar em mim mesmo.

Ao meu cunhado Chico pela simplificação nos momentos de dúvida;

Aos professores do programa de doutorado;

Ao professor Hernane Pereira, pela experiência, incentivo e por ter cedido gentilmente o modelo da dissertação em Latex;

Aos amigos e colegas do doutorado;

Ao amigo e irmão Aloísio Nascimento, pelas incansáveis correções e discussões;

Ao amigo e colega Leandro pela paciência, correção revisão do Latex;

Ao amigo e irmão Marcelo Carvalho (Spiv), pelo conhecimento e ajuda incondicional;

Aos amigos Celso e Gama pelos bons momentos de celebração da nossa amizade e pelas longas horas de diálogos filosóficos;

Aos professores da banca examinadora pela participação e enriquecimento deste trabalho;

À Fapesb pelo incentivo financeiro (bolsa) parcial;

À ANP, FINEP e o programa PRH55 pelo incentivo financeiro.

Salvador, Brasil
Outubro de 2016

Jefferson Willes Gomes de Souza

Resumo

Neste trabalho, avaliou-se a eficiência no processo de combustão controlada e enriquecida com oxigênio, nas proporções 21%, 23% e 25%, usando dois combustíveis Acetileno (AC) e Gás Natural (GN) nos padrões espaços-temporais e auto afinidade gerada por uma evolução do sistema. Usou-se dois métodos de análises na eficiência durante o processo de combustão, o primeiro é a distância de Hamming (Hd), técnica usada para avaliar a evolução dinâmica de um sistema e o segundo método é conhecido por Detrended Fluctuation Analysis (DFA), cuja série temporal avalia a auto afinidade e correlação de longo alcance. Para o combustível AC na concentração de 21% de oxigênio, a Hd mostrou-se inicialmente um estado transiente, denotando que esse processo de combustão se comporta como um autômato de Wolfram, indicando assim um aumento significativo na oxidação da chama e formação de fuligem. Na análise do DFA verificou-se um comportamento auto afim bem definido para os dois gases. Constatou-se que comportamentos sub-difusivos podem estar associados a um regime turbulento e ineficiente.

Palavras-chave: Fractalidade, Caos, Processo de Combustão, DFA, Distância de Hamming.

Abstract

The present work refers to an experimental study of the efficiency applied at the combustion process. Where were evaluated the thermal radiation from two fuels, natural gas (NG) and acetylene (AC) enriched with oxygen at 21%, 23% and 25%, during a combustion process. For purpose of study the efficiency during the combustion process, it was used two methods. The first is the hamming distance (HD), this technique is used to evaluate the dynamic evolution of a system. The second one is Detrended Fluctuation Analysis (DFA), method that is able to characterize long-term correlations in time series and self affinity properties. In this work, it was found for the AC fuel at the concentration of 21% oxygen, the HD shows a transient state, that indicates that its behavior works as an automaton Wolfram, thus indicating a significant increase in the oxidizing flame and soot formation. In case of the DFA method, the study showed that sub-diffusive behavior could be associated with a turbulent and inefficient regime. Finally, the results suggest that these methods can be used as an interesting tool to obtain the behavior in a combustion process.

Keywords: Fractality, chaos, combustion process, DFA, Hamming distance.

Sumário

1	Importância da pesquisa	1
1.1	Motivação	1
2	Preâmbulos	2
2.1	Métodos de enriquecimento usando oxigênio e aquisição de dados experimentais	4
2.2	Geometria Fractal e Autômatos Celulares	11
2.3	Método de Análise na formação de Fuligem	18
2.3.1	O Método Detrended Fluctuation Analysis (DFA)	18
2.3.2	O Método distância de Hamming (Hd)	21
2.4	Aquisição de dados teóricos	23
3	Artigos publicados	25
4	Considerações finais	44
4.1	Conclusões	44
4.2	Trabalhos Futuros	46
	Referências	47

Lista de Tabelas

Lista de Figuras

2.1	Metodologia de enriquecimento com O_2 , (SANTOS, 2010).	5
2.2	Processo de combustão controlada.	7
2.3	Visão geral do dispositivo experimental, onde: (1) Aquisição de dados; (2) Rotômetros; (3) Sinal de tensão; (4) Fotodetectores; (5) Chama; (6) Feixe de laser; (7) analisador de gases; (8) Pré-misturador Ar/O ₂ , (SANTOS, 2010).	8
2.4	Vista da câmara de combustão. Em destaque os orifícios 1, 5 e 7 dos 10 orifícios no total, o qual o era inserido um sinal de laser e capturado pelos fotodetectores, (SANTOS, 2010).	9
2.5	Vista geral dos fotodetectores, (SANTOS, 2010).	10
2.6	Vista do laser sobre a bancada em um sistema mecânico que permite uma medição automática dos 10 pontos (orifícios), (SANTOS, 2010).	11
2.7	Série temporal da medida obtida pela aquisição de dados para o GN 23% com grau de equivalência 0.7.	11
2.8	Esta figura, conhecida como gravuras de M. C. Escher, inicia-se com uma pequena forma estrutural onde observa-se que a semelhança para diferentes níveis permanece inalterada.	13
2.9	Construção do Tapete de Sierpinski em três estágios: (a) Quadrado sólido; (b) Primeiro estágio, figura inicial geradora; (c) Segundo estágio; (d) Terceiro estágio.	14
2.10	Modelo de uma célula de Autômato Celular e suas respectivas vizinhanças. Fonte: (MIRANDA et al., 2008).	15
2.11	Modelo bidimensional de um autômato de Von Neumann interagindo com sua vizinhança, (SARKAR, 2000).	16
2.12	Série temporal da medida obtida pela aquisição de dados para o AC 21% com grau de equivalência $\varphi = 1.0$	19
2.13	(A): Malha de pontos em que a simulação é realizada, mostrando dois obstáculos geradores de turbulência, e as secções (S_0 , S_1 e S_2), em conjunto com os pontos dos eixos M_0 a M_4 ; (B) Estado do fluxo turbulento com resolução em tamanho de 5,5; (C) Estado instantâneo do fluxo turbulento com exibição de tamanho 3,5; (D) Estado instantâneo do fluxo turbulento em alta resolução (no modo de sólido).	24

Lista de Siglas

DFA	Detrended Flutuactions Analysis
Hd	Distância de Hamming
CA	Autômato Celular
AC	Acetileno
GN	Gás Natural
OEC	Chama Enriquecida com Oxigênio
LES	Larg Eddy Simulation

Importância da pesquisa

A formação de fuligem é um fator importante para verificação da eficiência em um processo de combustão. Entre as técnicas utilizadas para melhorar o processo de combustão está a avaliação da formação de fuligem, e o seu estudo aprofundado tem trazido melhorias importantes principalmente na esfera ambiental. É em virtude dessa importância, que faremos um tratamento estatístico utilizando um método de análise de flutuações em séries temporais não estacionárias e um método matemático que avalia a evolução dinâmica de um sistema sob a ótica da teoria dos autômatos celulares.

1.1 Motivação

A motivação do trabalho parte do interesse:

- Na utilização de métodos que avaliam a eficiência no processo de combustão e transferência de calor;
- Na redução da emissão de gases poluentes e conseqüentemente na redução do impacto ambiental da atividade humana com a combustão;
- Manutenção da utilização de combustíveis fósseis.

Preâmbulos

Compreender a reação de combustão vinculada à radiação térmica no processo de formação de fuligem (partículas formadas durante o processo de combustão) constitui um conteúdo de grande interesse para as indústrias, principalmente as do ramo da siderurgia de vidros e outras [Santos \(2010\)](#), pois este recurso interfere diretamente na eficiência e na economia de combustível, já que no processo de combustão é liberada uma grande quantidade de energia na forma de calor e luz. A formação de fuligem tem uma participação importante no processo de combustão, pois através da sua formação é possível conhecer e, conseqüentemente, melhorar a eficiência térmica nos queimadores, elevando, com isso, a economia de combustível. Nesta relação, quanto mais eficiente o processo, menor será a formação de poluentes.

As aplicações com uso de Chama Enriquecida com Oxigênio (OEC) visam obter uma melhor eficiência na produção de fuligem (material sólido produzida por combustão de combustíveis fósseis) e, portanto, uma melhor transferência de calor durante a combustão, o que acarreta numa redução de poluentes durante este processo. Dessa forma, o enriquecimento da chama aumenta sua temperatura e promove a formação de fuligem e de oxidação, isso pode diminuir emissões de poluentes. Processos envolvendo OEC, podem ser vistos no trabalho de [Wang et al. \(2002\)](#), onde os autores apresentam um modelo de dinâmica dos fluidos que inclui uma descrição detalhada na formação de fuligem no processo de combustão.

Nesse sentido, os estudos crescentes a respeito das tecnologias de enriquecimento da chama com oxigênio e conhecimentos sobre a formação de fuligem associada à radiação térmica, tornam-se áreas de grande interesse nas indústrias siderúrgicas que envolvem processos de combustão onde toda ou qualquer reação é liberada uma grande quantidade de energia na forma de calor e conseqüentemente luz. Como o principal objetivo de uma combustão é obter o máximo de calor possível e produzir o mínimo de gases poluentes, faz-se necessário então que essa produção seja feita de forma econômica com o intuito de maximizar o rendimento na combustão, a fim de se obter um potencial energético com o mínimo de dissipação. Para isso necessita-se obedecer a relação ar-combustível, proporcionando uma mistura perfeita dessa relação. A relação, ar-combustível, tem influência decisiva na formação de fuligem e radiação durante a combustão, ([WANG et al., 2002](#)).

Durante o processo de combustão, a formação de partículas, denominadas proporciona um aumento na transferência de calor por radiação térmica. Motores desregulados também favorecem a formação excessiva de fuligem (partículas de carbono) na chama, sua pre-

sença em grandes quantidades na atmosfera pode causar problemas respiratórios e sua compreensão torna-se um dos aspectos essenciais para os progressos nas técnicas de instrumentação de seu controle. É válido salientar que a fuligem surge a partir de um sistema caótico (chama de combustão) e como todo sistema caótico não permite uma observação precisa, devido a inúmeras variáveis do sistema, o seu processo de entendimento torna-se lento. Sua importância pode ser benéfica ou prejudicial. Um exemplo seria a inalação destes compostos que podem causar problemas respiratórios pela absorção de materiais cancerígenos, Santos (2010). Por outro lado, a formação de fuligem aumenta a transferência de calor por radiação térmica da chama, tornando indispensável sua presença em operações destes sistemas de combustão. Os estudos sobre os mecanismos da formação de fuligem foram iniciados com o intuito de identificar os elementos que podem ser utilizados para o controle durante a sua formação. O oxigênio mostra-se como um dos possíveis oxidantes da fuligem. Como é um gás com inúmeras utilidades na indústria, constitui como um possível aditivo, (JR, 2010).

Evidentemente, existem os parâmetros físicos que influenciam diretamente no processo de formação de fuligem e estes parâmetros são conhecidos como temperatura, pressão e regimes da chama. A temperatura é o parâmetro mais importante na formação de fuligem, pois sua medida gera influência direta sobre as taxas de reação que produzem os precursores da fuligem. A pressão está relacionada com a tendência na formação de fuligem, pois quanto menor a pressão menor a tendência de formação de fuligem, Glassman (1989). A pressão também é uma grandeza que interfere na taxa de reação do processo de nucleação, que acontece na medida em que a pressão diminui. Quanto ao regime da chama, os processos estão divididos em chamas difusas e pré-misturas, um exemplo conhecido de aplicação da chama difusa é a vela. As duas chamas podem operar em regime laminar ou turbulento. A formação de fuligem varia de acordo com o tipo de chama. As chamas difusas produzem maior quantidade de fuligem do que as chamas pré-misturadas Santos, Torres e Pereira (2002), Santos, Torres e Pereira (2011). Dessa forma, quanto mais harmônica a união dos combustíveis com o oxigênio, mais eficiente será a combustão e a estequiometria fornece uma base na composição do combustível para calcular a quantidade necessária desses elementos para sua queima na reação durante a combustão.

Apesar de existirem estudos sobre os mecanismos de formação e controle de fuligem, a necessidade de uma compreensão mais detalhada torna-se importante para promover avanços tecnológicos e, conseqüentemente, realizar estudos sobre os impactos ambientais.

Este trabalho visa estudar a radiação produzida durante a combustão das queimas de dois combustíveis distintos, a saber, acetileno (AC) e gás natural (GN). Durante o experimento foram utilizadas diferentes concentrações de oxigênio enriquecido na câmara de combustão instrumentalizada com analisador de gases, detectores de fuligem e de radiação térmica,

Santos, Torres e Pereira (2002), Santos, Torres e Pereira (2011). Como objetivo principal, propõe-se avaliar a eficiência da combustão enriquecida com dois comburentes, AC e GN usando métodos estatísticos para verificar a auto afinidade (propriedade fractal), e a estabilidade de evolução temporal desse sistema dinâmico, conhecido como autômato. Sendo assim, investiga-se a influência do teor de oxigênio no processo de combustão controlada na série temporal na formação de fuligem em chamas confinadas, avaliando a correlação temporal dessas medidas. Foram utilizados dois métodos que se mostraram eficientes na avaliação do processo de combustão em uma câmara controlada. O primeiro é o método Detrended Fluctuation Analysis (DFA), Peng et al. (1994), o qual analisa a fractalidade desse processo. O DFA será utilizado com a finalidade de diagnosticar o comportamento da flutuação da radiação a partir da variação da intensidade da voltagem medida em uma câmara de combustão. O segundo método é chamado distância de Hamming, Hamming (1950), utilizado inicialmente para diagnosticar erros em códigos binários. A Hd pode ser usada para estudar a estabilidade de uma evolução temporal de um sistema, dito autômato, (WOLFRAM, 2002).

Na próxima seção será apresentado o problema experimental deste trabalho.

2.1 Métodos de enriquecimento usando oxigênio e aquisição de dados experimentais

O oxigênio exerce um papel fundamental nos processos de combustão que utilizam o ar como elemento comburente. Por outro lado, o ar é uma mistura aproximada de 79% de nitrogênio (N_2) e (21%) de oxigênio (O_2), em volume. Na realidade, é o oxigênio que faz o papel de comburente na reação de oxidação de combustão com ar, onde os combustíveis são queimados através de uma reação exotérmica que libera energia para ser aproveitada em processos industriais, comerciais ou domésticos. É nesse sentido que processos de enriquecimento com uso de oxigênio têm sido utilizados para enriquecer chamas em câmaras de combustão controladas. Neste experimento o método utilizado para enriquecimento no processo de combustão teve como princípio adição de oxigênio na corrente de ar admitida no queimador, conforme a figura 2.1.

Esse procedimento está fundamentado na avaliação do efeito do enriquecimento causado na chama (formação de fuligem e oxidação), Santos, Torres e Pereira (2002), Santos, Torres e Pereira (2011). Para o sistema que opera com a adição direta de oxigênio na corrente de ar mostrado na figura 2.1, a fração molar, que mede a quantidade de matéria em número de mol, é dada da seguinte forma:

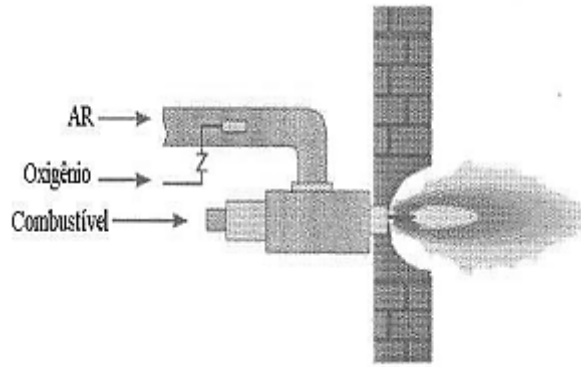


Figura 2.1: Metodologia de enriquecimento com O_2 , (SANTOS, 2010).

$$\Omega = \frac{\rho}{\rho'} \quad (2.1)$$

Onde ρ significa a fração do O_2 em volume do oxidante e ρ' é o volume total do oxidante.

Para maior entendimento, por exemplo, o ar atmosférico possui $\Omega = 0.21$ ou 21% de oxigênio, uma corrente de ar enriquecida com oxigênio a 15%, significa dizer que neste caso o ar possui um valor de 0.36 ou 36% do mesmo. A relação ar/combustível ou combustível/ar admitida em uma combustão, para uma determinada condição de funcionamento, é expressa pela relação:

$$\varphi = \frac{A/C_{estequimetrico}}{A/C_{real}} \quad (2.2)$$

onde φ é conhecido como razão de equivalência, A é a quantidade de ar e C é a quantidade de combustível no processo de queima. A razão de equivalência mede a razão entre ar-combustível e seu produto define as características da combustão, na forma:

$\varphi < 1$ - Mistura com excesso de ar ou mistura pobre (em combustível);

$\varphi = 1$ - Mistura estequiométrica;

$\varphi > 1$ - Mistura com excesso de combustível ou mistura rica.

A queima foi executada em uma câmara de combustão, e a chama foi estudada em três condições distintas:

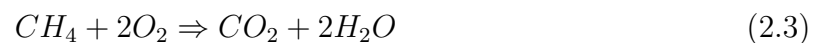
1. Com o uso de ar como oxidante, em cinco razões de equivalência (φ);
2. Com o uso de ar enriquecido com oxigênio e teor de 23% (2% de enriquecimento) como oxidante, em cinco razões de equivalência;
3. Com o uso de ar enriquecido com oxigênio e teor de 25% (4% de enriquecimento) como oxidante, em cinco razões de equivalência.

O modelo para avaliar um processo de combustão baseia-se, fundamentalmente, nas leis da termodinâmica, na conservação de energia ou no rendimento da máquina térmica (câmara de combustão controlada) na qual o processo poderá ser analisado. A eficiência, nesse estudo, está relacionada com a formação de fuligem na combustão.

A quantidade de oxigênio, teoricamente, fornece informação importante para combustão completa. Na prática, a medida que relaciona a quantidade de ar na combustão é muito difícil de se obter, pois em uma reação de combustão real, por mais controlada que seja, sempre existem outros elementos químicos participantes no reagente que não são contabilizados na reação do processo. Isso acaba alterando os cálculos e, por muitas vezes, não se obtém uma reação desejada.

Durante o processo, a combustão pode ser completa ou incompleta:

1. Na combustão completa, tomemos como exemplo o gás de metano (CH_4), temos:



2. Incompleta



3. Incompleta (formação de fuligem)



Observando as equações 2.3, 2.4 e 2.5 no produto, há formação de elementos contendo carbono CO_2 , CO , C e a quantidade de oxigênio no reagente define a medida necessária no produto com interação com o carbono, i. e., o maior consumo de oxigênio se dá na

combustão completa e na combustão incompleta (menor quantidade de oxigênio) com formação de monóxido de carbono e fuligem. Dessa forma, se usarmos somente ar teórico há uma grande probabilidade do combustível não queimar totalmente produzindo CO ao invés de CO_2 . A consequência disso é que a quantidade de calor liberada normalmente é menor.

Na verdade, para uma reação completa e com o máximo de potencial energético, deve-se garantir que o adicional de ar, no cálculo estequiométrico, de cada molécula de combustível encontre o número necessário de moléculas de oxigênio para completar sua combustão. Define-se excesso de ar como a quantidade de ar fornecida além da teórica.

Por outro lado, deve-se tomar muito cuidado com a quantidade de ar a ser inserida na combustão (ar teórico). Pois a quantidade de ar que não participa da queima tende a resfriar a chama, contribuindo negativamente na reação. Dessa forma, quanto maior o volume de gás na combustão, maior será a perda de calor e conseqüentemente menor eficiência na combustão. No entanto, o excesso de ar aumenta, em grandes proporções, as chances de todo combustível na reação ser queimado. Isso explica por que as indústrias sempre trabalham com excesso de ar.

É válido também salientar que o teor de ar a ser inserido na combustão depende do combustível a ser queimado e do equipamento de queima. Sendo menor para combustíveis gasosos e maiores para combustíveis sólidos e líquidos. A figura 3.4 representa a relação entre ar-combustível e as perdas nos gases de exaustão. Podemos observar que nos extremos, o processo passa por duas zonas: a) perdas de energia que se dá por combustíveis não queimados; b) e perdas de energia por excesso de ar onde o ar comburente acaba resfriando a chama.

A Figura 2.2 mostra, de uma maneira sucinta, como ocorre um processo de combustão em uma câmara controlada. A princípio são definidos os tipos de combustíveis e o controle da quantidade de oxigênio e ar na câmara. Durante o processo de combustão haverá saída de gases e cinzas (fuligem), que participam diretamente da eficiência do processo.

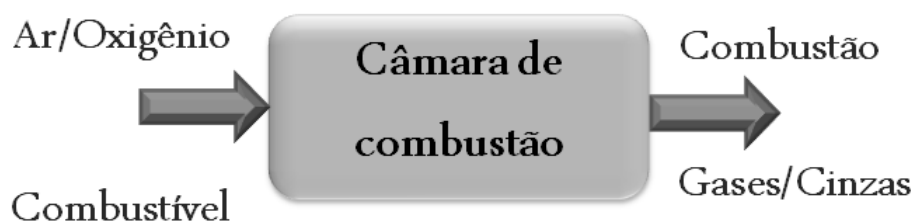


Figura 2.2: Processo de combustão controlada.

Na obtenção dos dados experimentais, usou-se um aparato experimental, cuja função é estudar os processos de combustão a partir de dados coletados. Este equipamento consiste

numa câmara de combustão agregada a um instrumento de análise de gases, fuligem e verificação de radiação térmica. A sua utilização encontra-se em vários setores da indústria, em especial nos ramos de petróleo e gás, petroquímica, siderurgia e automobilística.

Outro aspecto de importância é que o queimador utiliza o processo de combustão para a geração de energia, Santos (2010). Esse dispositivo experimental possui um queimador de dois tubos concêntricos de diâmetros diferentes onde uma chama é gerada na câmara. Através do tubo de menor diâmetro, escoam gás natural ou acetileno, enquanto que o ar puro ou o ar enriquecido com oxigênio escoam através do espaço delimitado pelos tubos interno e externo, conforme o dispositivo experimental representado na figura 2.3.

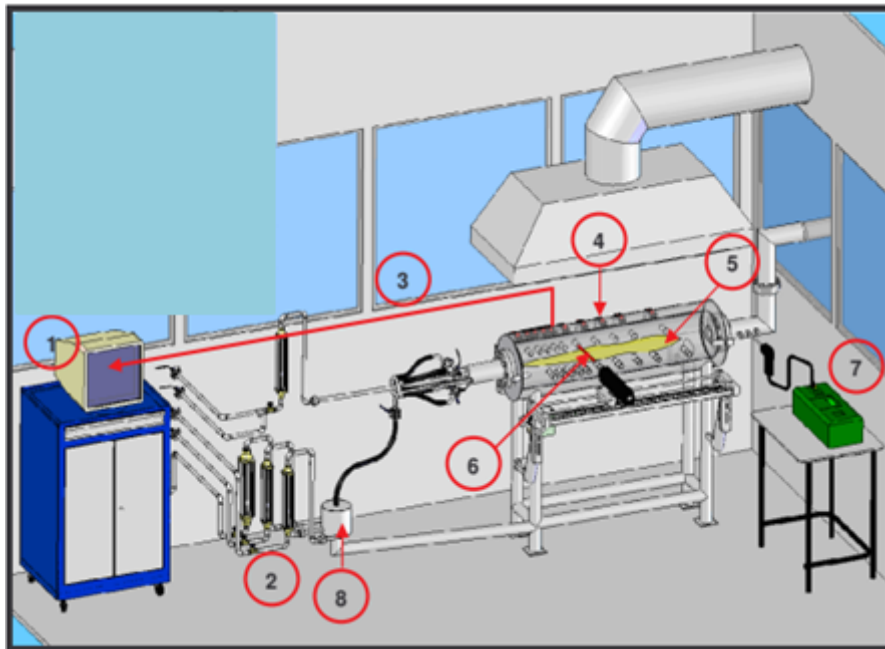


Figura 2.3: Visão geral do dispositivo experimental, onde: (1) Aquisição de dados; (2) Rotâmetros; (3) Sinal de tensão; (4) Fotodetectores; (5) Chama; (6) Feixe de laser; (7) analisador de gases; (8) Pré-misturador Ar/O₂, (SANTOS, 2010).

A chama foi parcialmente enriquecida com oxigênio, na proporção de 23% e 25% na presença de dois comburentes AC e GN, e testada com ar atmosférico, sem enriquecimento, com nível de 21%.

A câmara de combustão foi disposta horizontalmente. Foi feito um isolamento térmico com uma manta cerâmica. No corpo da câmara foram dispostos dez pontos para a medição da concentração da fuligem e radiação térmica. Possui também uma descarga de gases de exaustão para a atmosfera. A figura 2.4 apresenta o esquema da câmara de combustão em questão.

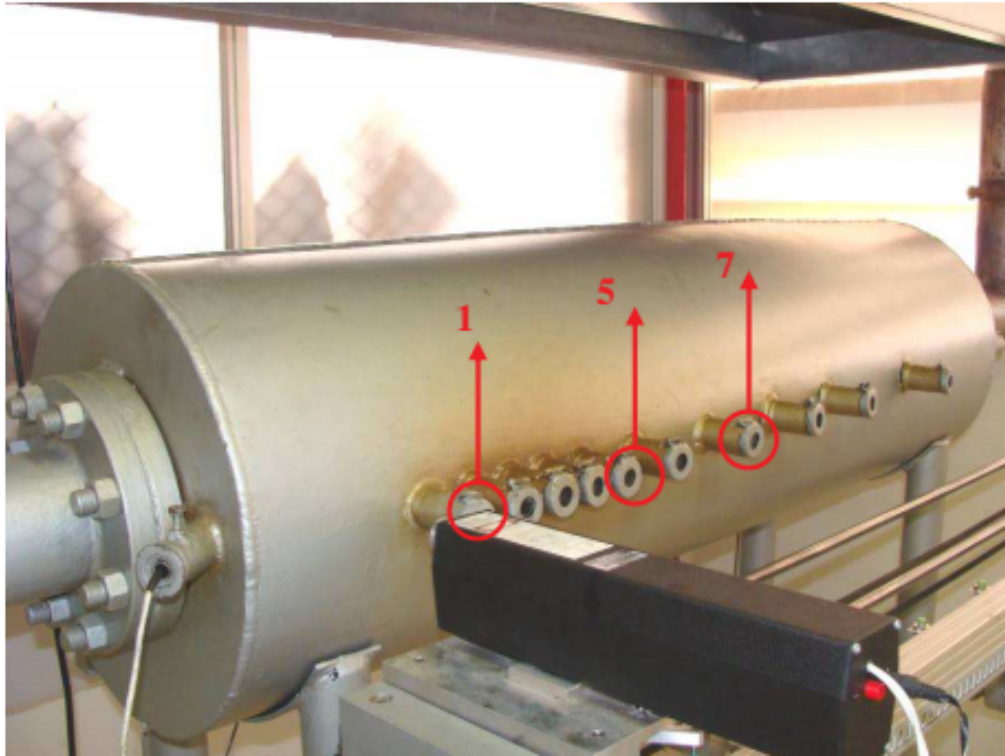


Figura 2.4: Vista da câmara de combustão. Em destaque os orifícios 1, 5 e 7 dos 10 orifícios no total, o qual o era inserido um sinal de laser e capturado pelos fotodetectores, (SANTOS, 2010).

Um sinal de laser, figura 2.3 (6), foi emitido na chama com o intuito de medir a concentração de partículas formadas durante o processo de combustão. A radiação emitida pelo laser foi quantificada pelo fotodetector que se encontrava fora da câmara, modelo descrito na figura 2.3 (4).

Santos (2010) afirma que fotodetectores são componentes eletrônicos que transformam um sinal de radiação (luz) em um sinal de tensão. Estes detectores têm o objetivo de medir o sinal do laser que atravessa a chama e sua medida está diretamente relacionada com a intensidade de luz absorvida, i. e., ao atravessar a chama, o laser sofre pequenos desvios e/ou absorção ao colidir com as partículas de fuligem durante a queima. Dessa maneira, essa absorção e/ou dispersão do raio laser emitido na chama, estavam diretamente relacionado com a densidade de formação de partículas de fuligem.

Os fotodetectores têm o objetivo de medir o sinal do laser que emerge da chama para o cálculo da intensidade de luz absorvida para a medida indireta da concentração da fuligem. A figura 2.5 mostra o conjunto de detectores que foram usados no experimento.

Assim, o sinal incidente máximo do laser foi obtido da leitura do sinal em aquisição de dados antes da formação da chama no queimador. O laser utilizado, mostrado na figura 6, para medir a concentração da fuligem na chama, possui uma potência de $3mW$. O laser

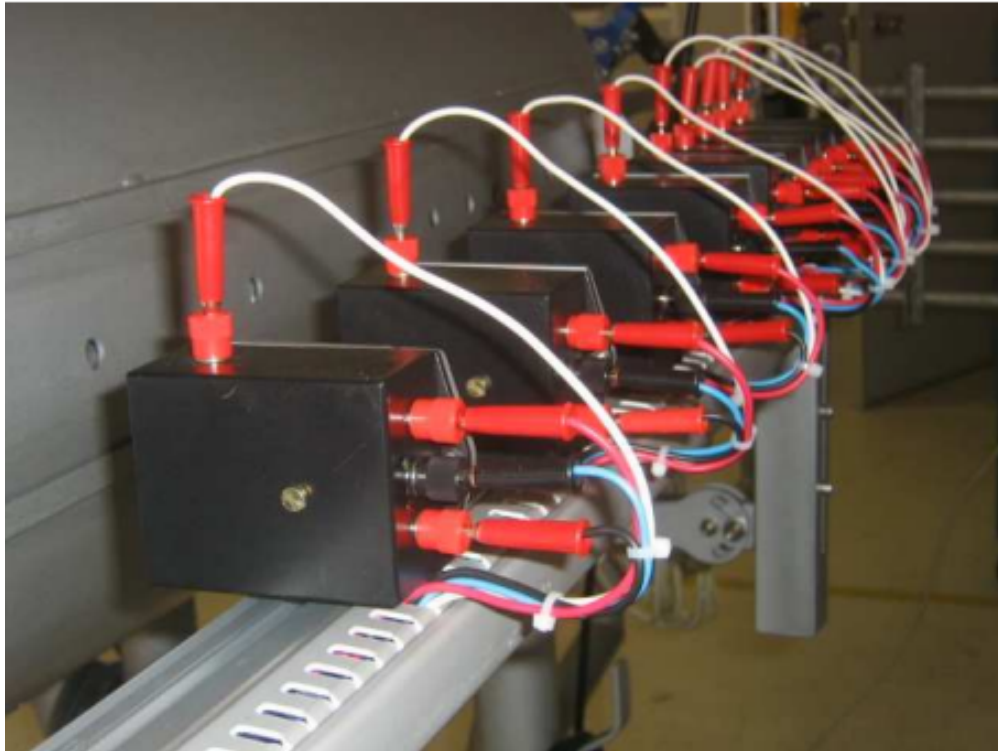


Figura 2.5: Vista geral dos fotodetectores, (SANTOS, 2010).

foi montado na bancada experimental permitindo seu movimento horizontal, através de um dispositivo mecatrônico controlado de forma automática, de sorte que fosse medida a concentração da fuligem ao longo do comprimento da chama confinada, cruzando o eixo vertical do queimador em dez pontos definidos (orifícios).

Conhecendo a intensidade inicial do laser, pôde-se constatar a diferença entre o sinal emitido e o sinal recebido, pois parte da radiação do laser foi absorvido ou sofreu espalhamento devido a formação de fuligem na queima, como mostra a série obtida no experimento com GN 23% para o primeiro orifício com grau de equivalência $\varphi = 0.7$, (figura 2.7). Com esses dados, foi possível observar a evolução temporal dessas informações e avaliá-las tanto pela Hd como DFA.

Na próxima seção serão apresentados os métodos utilizados para análise dos dados experimentais.



Figura 2.6: Vista do laser sobre a bancada em um sistema mecânico que permite uma medição automática dos 10 pontos (orifícios), (SANTOS, 2010).

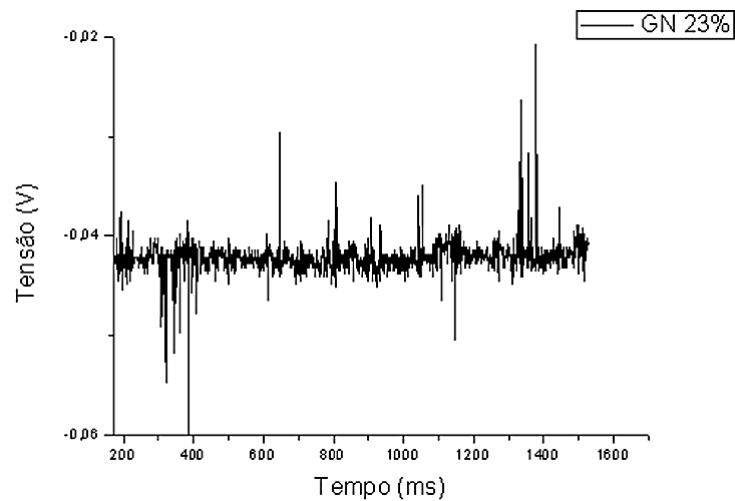


Figura 2.7: Série temporal da medida obtida pela aquisição de dados para o GN 23% com grau de equivalência 0.7.

2.2 Geometria Fractal e Autômatos Celulares

No ano de 1975 Mandelbrot, buscando compreender a forma real para descrever a geometria da natureza, [Mandelbrot \(1983\)](#), baseado em alguns teóricos matemáticos, percebeu que algumas figuras geométricas apresentavam uma auto similaridade na sua ampliação,

mantendo assim o mesmo comportamento geométrico para diferentes escalas.

Na geometria fractal, um conjunto espacial manifesta uma relação escalar entre o número de seus elementos constituintes e a sua classe de mensuração (tamanho, densidade e intensidade). Essa definição inclui fenômenos dinâmicos que podem ser espacialmente representados e, portanto, mensurados. Considera-se também fractal uma estrutura física que tem forma irregular ou fragmentada em todas as escalas de medida, sendo uma de suas características, o escalonamento ou invariância geométrica sob certas transformações. Essa característica é conhecida como auto similaridade.

Enquanto a geometria clássica fornece apenas uma primeira aproximação para a estrutura dimensional de alguns objetos, a geometria fractal pode ser utilizada para construir modelos capazes de representar os aspectos mais complexos das formas da natureza. A geometria fractal da qual falaremos aqui, que trata dos conjuntos e estruturas fractais, já ganhou domínio científico reconhecido, [Moreira \(1996\)](#). Teoricamente os fractais são formas geométricas com padrões complexos que se repetem infinitamente (invariância de escala), mantendo sua estrutura semelhante à original, conforme mostra a [figura 2.8](#).

Existem estruturas que não podem ser visualizadas em todas as escalas de ampliação, mas apresentam a característica de auto similaridade (também conhecida como auto afinidade ou auto afim), o que permite a possibilidade da análise sob o ponto de vista da geometria fractal. Para estas formas da natureza, a noção de auto afim deve ser vista cuidadosamente e necessita ser encarada como pequenas partes de uma mesma estrutura ou uma distribuição estatística idêntica. Uma característica fractal é dita auto afim quando um conjunto de sistemas de funções, ao ser alterado, ainda apresenta simetria escalar. Não obstante, o fator de redução pode ser diferente para algumas dimensões do fractal [Falco-ner \(2004\)](#), i.e., não mantém sua forma original em todas as escalas para um mesmo fator de alteração.

As principais propriedades que caracterizam os fractais são a auto semelhança, sua dimensão fracionada e a complexidade infinita. No entanto existem fractais que possuem características anisotrópicas em sua estrutura para diferentes níveis de escalas, ou seja, não mantém fixo as suas proporções originais em todas as suas direções quando ampliadas ou reduzidas. Ao sofrer transformações de uma escala para outra, verifica-se que o tamanho destas cópias não varia uniformemente em todas as direções do espaço, neste caso, os fractais são chamados de auto afins.

Assim, as teorias das trajetórias das partículas, montanhas, rios, plantas, insetos, células, estruturas geométricas dos cristais e proteínas, podem ser estudadas analisando sua fractalidade. Dessa maneira, a teoria dos fractais tornou-se uma ferramenta importante na investigação dos fenômenos naturais, mais precisamente, nos processos de medição e mo-

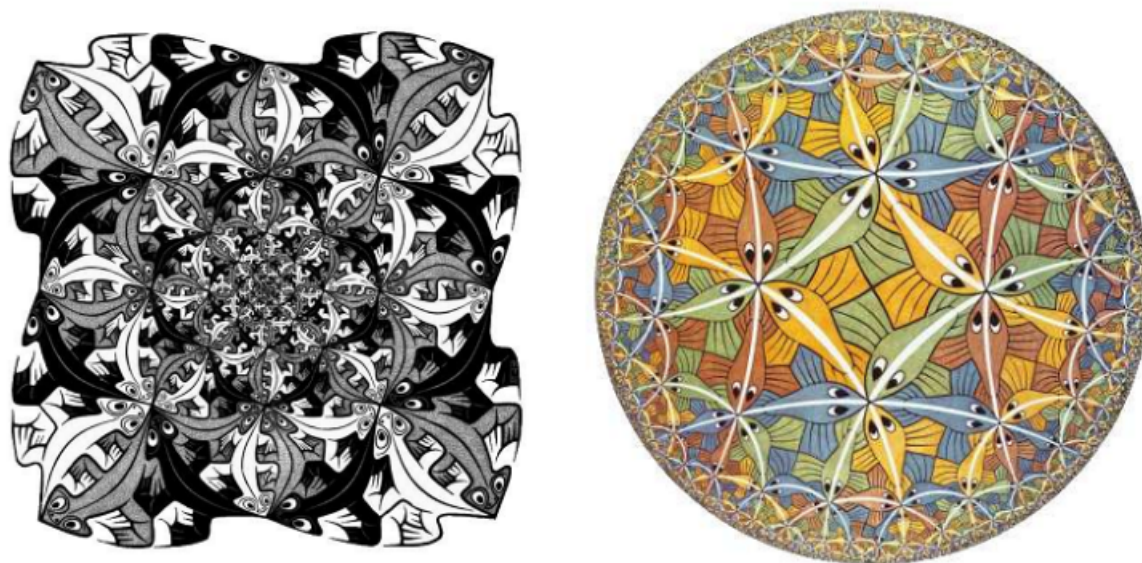


Figura 2.8: Esta figura, conhecida como gravuras de M. C. Escher, inicia-se com uma pequena forma estrutural onde observa-se que a semelhança para diferentes níveis permanece inalterada.

delagem dos objetos. No contexto atual, seu estudo envolve a maior parte das pesquisas, mesmo sendo uma teoria abstrata, esses conceitos têm levado grande parte das aplicações no meio científico e nas mais diversas áreas de conhecimento, [Moret et al. \(2003\)](#), [Zebende et al. \(2004\)](#), [Peng et al. \(1994\)](#), [Gleria, Matsushita e Silva \(2004\)](#), ([ASSIS et al., \(2008\)](#)).

A invariância por escala é conhecida como auto similaridade, conforme visto na figura 2.8, e apresenta o mesmo aspecto visual a qualquer escala que seja ampliada ou reduzida. A auto similaridade existe em figuras geradas por processos matemáticos em que, o conjunto total é formado por pequenas réplicas perfeitas delas mesmas, i.e, é formado a partir de um processo recursivo como é o caso, por exemplo, descrito na figura 2.9.

Note que a interação da mesma regra de construção, ou melhor, a repetição do procedimento ocorre infinitamente. Esse procedimento de construção da sequência interativa é conhecido como Tapete de Sierpinski. Inicia-se de um quadrado preenchido que é dividido em nove partes de quadrados iguais e retira-se o quadrado do meio. A 1ª interação é obtida a partir de uma aplicação da figura geradora a cada um dos quadrados.

No entanto, algumas estruturas apresentam auto similaridade apesar de não conseguir visualizar em todos os graus de ampliação, mesmo assim, são discutidas sobre o ponto de vista da geometria fractal. Isso ocorre quando uma porção menor do todo parece ter sofrido diferentes reduções de escala nas direções longitudinais e transversais. Esse escalonamento desigual resultará em distorções na réplica menor. Segundo [Falconer \(2004\)](#), uma característica fractal é dita auto-afim quando num conjunto de sistemas de funções, ao ser alterado, também há simetria escalar, mas o fator de redução pode ser diferente

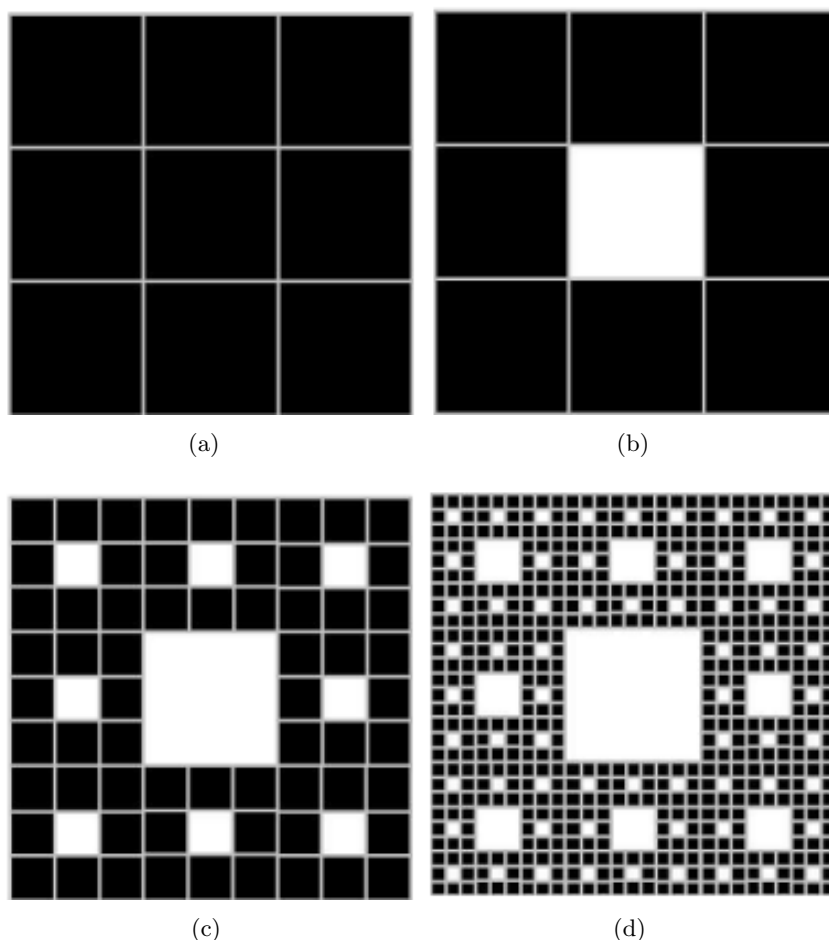


Figura 2.9: Construção do Tapete de Sierpinski em três estágios: (a) Quadrado sólido; (b) Primeiro estágio, figura inicial geradora; (c) Segundo estágio; (d) Terceiro estágio.

para algumas dimensões do fractal, i.e, não mantém sua forma original em todas as escalas para um mesmo fator de alteração de escala. De forma geral, na auto afinidade também há simetria escalar, mas o fator de redução deve ser diferente em algumas dimensões do fractal.

Por outro lado, algumas evoluções temporais são modelos matemáticos discretos no tempo, no espaço e nas variáveis dinâmicas, cujas evoluções são regidas por regras, no caso do Autômato Celular (CA). O CA pode ser definido como um conjunto de elementos idênticos, usualmente localizados em uma rede regular dimensional [Wolfram \(2002\)](#). Cada elemento pode possuir k estados que podem se alterar ao longo do tempo, como por exemplo, estados binários e outros. Os valores evoluem, em passos de tempo discretos de acordo com regras determinísticas que especificam os valores de cada célula em termos dos valores das células vizinhas, ou seja, cada unidade influencia outras unidades vizinhas enviando um sinal resposta de sua interação. A vizinhança para qualquer célula de uma rede é formada por um conjunto de células que podem ou não afetar seu estado e que pode ser definida a partir da dimensão do autômato e a geometria de suas ligações ([MIRANDA et](#)

al., 2008).

A principal característica dos CA é a facilidade com que podem ser implementados em virtude da simplicidade de sua formulação e o surpreendente retorno visual capaz de sugerir equilíbrios, órbitas, padrões complexos e estruturas organizadas como formações de ondas, entre outras (PEIXOTO; BARROS, 2004).

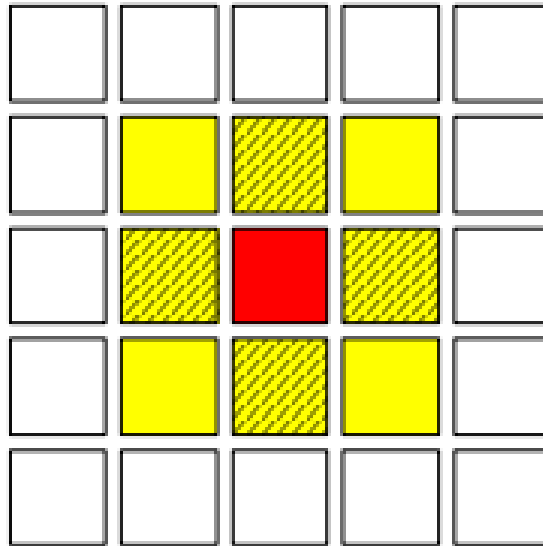


Figura 2.10: Modelo de uma célula de Autômato Celular e suas respectivas vizinhanças. Fonte: (MIRANDA et al., 2008).

A figura 2.10 representa um modelo de uma célula de um autômato. Na rede, a evolução do estado de uma célula no tempo t , assume estados definidos no tempo $t + 1$. Essa evolução segue regras definidas pelas Regras de Wolfram. Essas evoluções obedecem a um modelo simples tendo uma maior compreensão através das classes de Wolfram. Os autômatos celulares podem servir como modelos úteis para a descrição de sistemas complexos, tais como as características dos fractais. De fato, os autômatos celulares são sistemas complexos formados por unidades simples que interagem fortemente entre si e a medida em que o sistema evolui dinamicamente.

Os autômatos formulados por Neumann (1963) tinham como fundamento uma região bidimensional onde cada célula interage com sua vizinhança ortogonalmente, conforme descrito na figura 2.11.

A figura 2.11, mostra a auto reprodução de um autômato. Segundo Sarkar (2000), considera-se dois tipos de autômatos, o primeiro tipo é um autômato que, quando dada uma instrução, a célula reproduz a informação para construção de um outro autômato que é codificado, enquanto que o segundo copia as instruções de outro autômato, i. e., dada uma instrução a um autômato, este a executa para criar um autômato correspondente e, em seguida, o autômato requer uma instrução para operar e deixar de ser unidimensional,

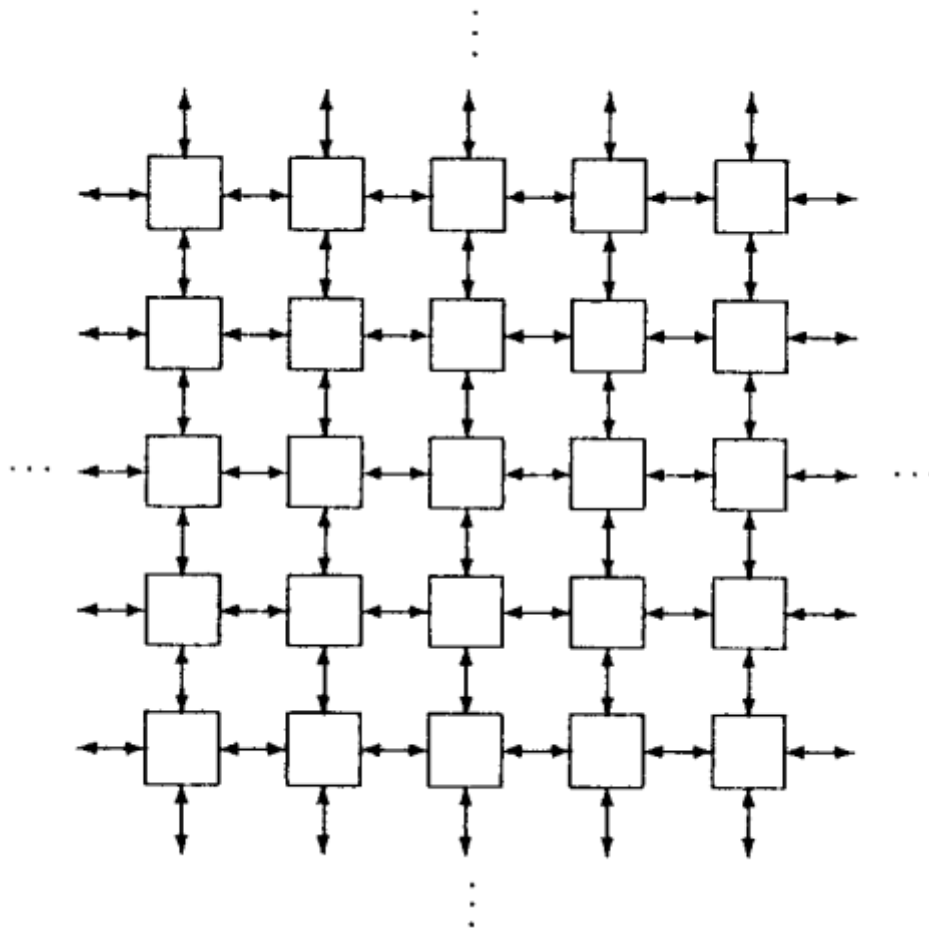


Figura 2.11: Modelo bidimensional de um autômato de Von Neumann interagindo com sua vizinhança, (SARKAR, 2000).

criando assim uma auto reprodução bidimensional. Esta descrição simples ignora a codificação e outros detalhes formais foram posteriormente formalizada por Neumann (1963), no qual descreve um espaço celular como sendo aquele em que cada célula pode estar em qualquer um dos estados possíveis durante a evolução.

Os autômatos de Wolfram (2002) são classificados em quatro classes com base nos padrões de uma evolução temporal que descrevem o comportamento dos CA desde um estado estável e homogêneo até padrões desordenados. As características de um autômato possuem propriedades fundamentais, Weimar (1997) e consistem em uma matriz de células. As evoluções se dão em passos discretos, cada célula é caracterizada por um conjunto finito de estados, toda célula evolui seguindo as mesmas regras e sua relação com sua vizinhança é local e uniforme.

Atualmente vários pesquisadores utilizam modelos de autômatos para simulação de diferentes tipos de aplicações, por exemplo, na biologia evolutiva, na dinâmica de reações químicas, nos sistemas dinâmicos físicos, na fluidodinâmica, comportamento de mercado,

evoluções epidemiológicas, [Miranda et al. \(2008\)](#) e espalhamentos geográficos, ([PEIXOTO; BARROS, 2004](#)).

De maneira empírica, Wolfram propõe uma classificação para os autômatos, que, através de estudos exaustivos, verificou-se que os padrões encontrados tendem a seguir uma característica qualitativa:

- Classe 1 - Autômatos cuja evolução temporal leva a um estado homogêneo no qual todas as células atingem um mesmo valor;
- Classe 2 - Autômatos cuja evolução temporal leva a um estado periódico no tempo e espacialmente não homogêneo, onde nem todas as células possuem o mesmo valor;
- Classe 3 - Autômatos que levam a um padrão caótico, desordenado evoluindo para um padrão não reconhecível;
- Classe 4 - Autômatos cuja evolução leva a estruturas localizadas complexas com evolução imprevisível, que pode se propagar, criar e/ou destruir outras estruturas e algumas vezes perdurar por longo tempo.

A existência de apenas quatro classes de padrões, implica na universalidade das evoluções dos autômatos celulares e a conclusão de que muitas de suas características, [Castro e Castro \(2015\)](#). Dessa maneira, essas classes possuem algumas implicações na evolução dinâmica do sistema:

Na classe 1, a resposta é simples, i. e, o estado inicial é independente, o sistema dinâmico evolui para um estado homogêneo.

Para Classe 2, os efeitos das interações (em particular uma célula) propagam-se numa distância finita. Dessa forma as variações ou mudanças das células afetam somente uma região finita da sua vizinhança. Em resumo, a definição do valor final depende somente do conjunto de valores finitos iniciais da célula. Esses autômatos podem ser vistos como autômatos que utilizam seus estados iniciais como características básicas de sua evolução. Por esta razão, autômatos celulares desta classe são utilizados em processos de imagens, para filtragem e/ou segmentação, pois podem selecionar e melhorar um determinado tipo de padrão de pixels, ([CASTRO; CASTRO, 2015](#)).

Para Classe 3, a propagação do dano afeta as células cada vez mais distantes no decorrer do tempo e sua dependência aumenta cada vez mais um número maior de células. Por exemplo, ao considerar um tempo infinito para um número infinito de valores iniciais.

Finalmente na classe 4, possui uma imensa complexidade no comportamento. Inicial-

mente sua característica desordenada no seu estado inicial produz um comportamento não definido e dependente de seus vizinhos em cada passo de sua evolução.

2.3 Método de Análise na formação de Fuligem

2.3.1 O Método Detrended Fluctuation Analysis (DFA)

O DFA já foi usado para a análise de séries temporais nas mais diversas áreas do conhecimento científico, por exemplo, mostra a mudança de comportamento na transição de fase líquido-vapor [Zebende et al. \(2004\)](#), no comportamento de sistemas astrofísicos [Moret et al. \(2003\)](#), [Zebende et al. \(2005\)](#), na dinâmica das variações da pressão arterial [Galhardo et al. \(2009\)](#), no comportamento de um sistema hidrovitário [Filho, Zebende e Moret \(2008\)](#), nas séries econômicas [Liu et al. \(1999\)](#), nos aspectos meteorológicos [Ausloos e Ivanova \(2001\)](#), [Koscielny-Bunde et al. \(1998\)](#), nas análises de proteínas [Figueirêdo et al. \(2010\)](#), nos batimentos cardíacos [Ashkenazy et al. \(2001\)](#), nas manchas solares [Moret \(2014\)](#), em sinais geométricos [Telesca e Hattori \(2007\)](#), na dispersão e evolução de incêndios [Telesca e Lasaponara \(2006\)](#), entre outras aplicações.

A Figura 2.12 mostra a série temporal obtida da análise do comportamento dinâmico da queima de AC 21% com grau de equivalência, $\varphi = 1.0$.

A Figura 2.12 apresenta informações que indicam uma flutuação na intensidade da radiação absorvida e esta se mostra sensível às condições iniciais, tais como, concentração do combustível, grau de equivalência, quantidade de oxigênio na mistura a ser queimada, entre outras.

Considerando a série temporal u_i , calcula-se a média temporal da série:

$$\langle u \rangle = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N u_i \quad (2.6)$$

Onde N é o número de células. Subtraindo a média dessa função temporal da série original, tem-se uma série integrada $Y(k)$:

$$Y(k) = \sum_{i=1}^j [u_i - \langle u \rangle] \quad (2.7)$$

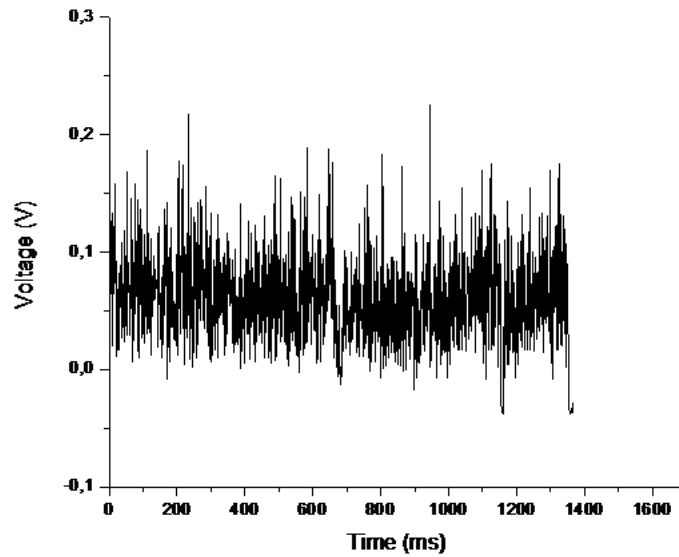


Figura 2.12: Série temporal da medida obtida pela aquisição de dados para o AC 21% com grau de equivalência $\varphi = 1.0$.

Resumidamente, o método DFA consiste em integrar os desvios da série temporal e calcular a flutuação para diferentes caixas de tamanho n , ou seja, calcula-se a função $F(n)$:

$$F(n) = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [Y(k) - Y_n(k)]^2 \right]^{1/2} \quad (2.8)$$

Onde $Y_n(k)$ é um polinômio ajustado pelo método dos mínimos quadrados. O significado em ajustar esse polinômio está na ideia de tirar a tendência local da série, que é uma característica do DFA. Finalmente a equação 2.8 representa uma função residual da diferença média entre a função integrada Y_k e a função polinomial ajustada $Y_n(k)$ que é definida em cada caixa de tamanho n previamente definida. O comportamento da dinâmica do sistema em cada caixa esta correlacionado com as outras caixas através de um coeficiente extraído da função $F(n)$ uma vez que $F(n) \sim n^\alpha$. Aplicando a propriedade de logaritmo pôde-se extrair o coeficiente de correlação α que avalia a série temporal através de uma lei de potência. Sendo assim, o DFA permite analisar a flutuação nas séries temporais em diferentes escalas.

A função $F(n)$ comporta-se como uma lei de potência, onde α é o expoente de correlação de longo alcance. De forma geral, a interpretação física do problema deve levar em consideração o comportamento do expoente de correlação de longo alcance, ou seja, $\alpha < 0.5$ - sinal anti-correlacionado ou anti-persistente; $\alpha = 0.5$ - sem correlação, ruído branco,

não apresenta memória; $\alpha > 0.5$ - apresenta correlações de longo alcance persistente; $\alpha = 1.0$ - ruído. Dessa forma:

- i) $\alpha < 0.5$ - sinal anti-persistente;
- ii) $\alpha = 0.5$ - sem correlação (ruído);
- iii) $\alpha > 0.5$ - sinal persistente;

O expoente $\alpha = 0.50$ revela que a sequência de dados é descorrelacionada, isso quer dizer que não se pode relacionar o comportamento passado com o comportamento da série no futuro, pois não existe memória no processo. O expoente $\alpha < 0.50$ indica uma expectativa anti-correlacionada, por exemplo, se a série estudada apresentar um comportamento anti-persistente e houver uma tendência de crescimento em dado tempo, isso implicará em uma tendência de redução na flutuação futura e vice-versa. Para o expoente maior que $\alpha > 0.50$ a série é dita persistente e o comportamento da flutuação em um tempo passado tende a continuar com a evolução temporal.

Para valores superiores do expoente de correlação de longo alcance ($\alpha > 1$) a dinâmica do sistema é caracterizada por ser não-estacionária (regime transitório ou condições transientes) Galhardo et al. (2009) e se aproxima mais de um caminhante aleatório. Resumidamente temos:

- i) $\alpha < 1.0$ - sinal sub-difusivo;
- ii) $\alpha = 1.5$ - sinal difusivo;
- iii) $\alpha > 1.5$ - sinal super-difusivo;

Por fim, o expoente $\alpha > 1$ sugere um passeio aleatório, estabelecendo, assim, o fenômeno da difusão (GALHARDO et al., 2009).

O fenômeno da difusão ocorre, em séries temporais, quando um sistema apresenta períodos tendendo à sazonalidade Galhardo et al. (2009), Filho, Zebende e Moret (2008) ou em momentos onde há um crescimento repentino nos valores medidos das grandezas físicas observadas. Estes eventos podem ser vistos ao analisar o aumento da demanda de passageiros em sistemas de navegação nos finais de semana e férias Zebende et al. (2004), explosões observados nos sistemas binários de raio-x, (MORET et al., 2003). Na medida em que ocorre um processo difuso, um conjunto de elementos e grandezas observáveis pode alterar-se constantemente (caráter aleatório) como energia, momento linear, pressão, número de moléculas ou átomos entre outros, (GALHARDO et al., 2009).

2.3.2 O Método distância de Hamming (Hd)

O método da Hd , consiste em estudar pequenas variações temporais no processo de formação de fuligem em chamas confinadas usando um método de medida, baseado nas teorias dos CA. Com intuito de estudar a física de sistemas dinâmicos, [Kauffman \(1969\)](#) incorporou um método de propagação de uma perturbação ou dano. Essas perturbações são modelos matemáticos simples capazes de explicar fenômenos físicos complexos a partir de uma evolução dinâmica conhecida como CA [Wolfram \(2002\)](#). Este método consiste basicamente no monitoramento da evolução temporal de duas ou mais configurações de um mesmo sistema, com diferentes condições iniciais, sujeitas a uma dinâmica específica e a um mesmo ruído térmico.

O modelo dos autômatos pode ser compreendido usando uma técnica de análise chamada Hd ou simplesmente dano. Hamming aplicou um parâmetro de medida com a finalidade de corrigir erros nos códigos de telecomunicações, [Hamming \(1950\)](#), e hoje esta técnica é usada também para medir a estabilidade de um autômato celular onde as classes de Wolfram podem ser descritas pela Hd . Esta técnica tem como fundamento estudar a estabilidade de um sistema dinâmico comparando a evolução conjunta do sistema original com sua réplica na qual foi introduzida uma perturbação em qualquer uma das células (a conversão do estado ativo para inativo). Comparando-se a trajetória das configurações original e perturbada, pode-se definir a distância da Hd entre elas. A Hd é o número total de células que diferem entre si, considerando os estados na configuração original e na réplica perturbada, dividido a soma destas diferenças pelo número total de células (N) conforme a equação 2.9. A Hd pode ser aplicada na comparação das sequências genômicas, onde as medidas de amostras de classes têm como base a Hd , [Pinheiro, Pinheiro e Sen \(2005\)](#), no problema do fluxo de custo mínimo, cujas modificações podem ser ponderadas usando a Hd [Jiang et al. \(2010\)](#), nos modelos de infecção, pois em alguns casos as regras de infecção de um indivíduo podem ser descritas por um autômato celular, assim os danos são descritos sob o aspecto da Hd [Pan et al. \(2006\)](#), nas técnicas para contadores binários [1960](#).

Para um AC unidimensional com N células, a distância de Hamming é dada por:

$$Hd = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |\sigma_i(t) - \beta_i i(t)| \quad (2.9)$$

Onde $\sigma_i(t)$ e $\beta_i(t)$ são os estados das células i no tempo t da configuração original e da réplica, respectivamente. Geralmente a fração Hd nos tempos iniciais é pequena e, considerando que o sistema é sensível às condições iniciais (características caótica), a perturbação pode levar o sistema a uma atração diferente da original propagando-se por

toda a sua extensão.

Como a chama era estacionária, uma vez que a concentração de ar, oxigênio e combustível era mantida constante, então a equação 2.9 pode ser entendida como a média da diferença entre os estados, $\sigma_i(t) - \beta_i(t)$, das células no tempo, i. e., a Hd indica como um evento no tempo t difere do evento no tempo $t + 1$. Como essa evolução se dá a cada passo, pode-se medir assim como será o comportamento dessa métrica a cada passo da anterior.

Dessa forma, a Hd pode explicar modelos de evoluções dinâmicas e, muitas vezes, complexas. Será feito um estudo usando a teoria dos autômatos com base na Hd para dois combustíveis usando OEC. A Hd pode apresentar quatro configurações associadas às quatro classes de Wolfram:

Classe I: A Hd desaparece com o passar do tempo. Portanto o atrator da dinâmica é estável a qualquer perturbação;

Classe II: A Hd permanece constante e pequena no tempo;

Classe III: A Hd cresce rapidamente com o tempo, atingindo um valor de equilíbrio geralmente alto. Ainda que o dano inicial seja mínimo, ele se propaga por toda a cadeia do Autômato Celular. Portanto as regras de classe III são instáveis;

Classe IV: A Hd apresenta um longo período transiente até que atinja o seu valor de equilíbrio. O crescimento da Hd é imprevisível. Além disso, o seu valor final pode variar muito, dependendo do tamanho e da localização do dano inicial. Assim, os autômatos pertencentes a IV classe, tem sua dinâmica marcada por longos períodos transientes caóticos, até que um atrator periódico estável seja finalmente atingido.

Para este estudo, analisou-se a estabilidade dos padrões espaços-temporais gerados por uma evolução do sistema com relação à pequenas perturbações, introduzidas em um estado inicial, que evoluem segundo uma regra simples conhecidas como as classe de Wolfram, do tipo CA, avaliados pela Hd.

2.4 Aquisição de dados teóricos

Nesta parte do trabalho, o estudo foi fundamentado na dinâmica dos fluidos, ramo da física que estuda o comportamento estático e dinâmico dos líquidos e gases. A compreensão de seu movimento real é muito complexa devido às diversas variáveis de estado, abrangendo um vasto conjunto de problemas que vão desde o estudo do escoamento de sangue nos capilares, até o escoamento de petróleo através de um oleoduto. Os fluidos são compostos de moléculas em movimento constante, onde ocorrem colisões frequentes. Para sua compreensão exata, deve-se considerar a ação de cada molécula ou grupo de moléculas em um escoamento, o que é, teoricamente, muito complicado.

Pode-se considerar, por exemplo, que surjam de uma distribuição conveniente da matéria, que denominamos de contínuo, ao invés de um aglomerado de moléculas discretas. Ou seja, no estudo dos fluidos, desprezam-se o espaçamento e atividade moleculares considerando-o como um meio contínuo que pode ser dividido infinitas vezes em partículas fluidas entre as quais se supõe não haver vazios.

Na necessidade de entender o comportamento do fluido, encontra-se a equação de Navier-Stokes. Esta equação é fundamental para mecânica dos fluidos. Trata-se de uma equação diferencial parcial não estacionária, não linear, de segunda ordem. Infelizmente suas soluções analíticas não podem ser apresentadas exceto para campos de escoamento muito simples. Sendo assim, a equação de Navier-Stokes foi resolvida usando a biblioteca OpenFOAM® [Weller et al. \(1998\)](#), uma biblioteca de código aberto, que usa o método dos elementos finitos, e escrita em linguagem C ++.

Foi definido teoricamente um campo de velocidades, no caso de um fluxo interno de um fluido newtoniano¹, incompressível, introduzido num canal cilíndrico que possuía duas obstruções. O fluido ao passar por essas obstruções sofrem vórtices no fluxo, sendo responsável por uma transição à turbulência. A definição de turbulência possui definições e características que vão da formação de turbilhões formados no fluido, o número de Reynolds e as variações da energia, momento e outros.

O estudo da turbulência é realizado por meio da análise da série temporal de auto-afinidade de velocidade usando o método DFA ([PENG et al., 1994](#)). Neste estudo comparou-se o comportamento das séries temporais do fluido com o regime turbulento de uma chama confinada em uma câmara de combustão controlada enriquecida com oxigênio, com diferentes concentrações, usando dois comburentes AC e GN. As medidas experimentais e as simulações são significativamente similares em seu comportamento auto-afim. A ideia central é verificar se o comportamento turbulento desse fluido tem, qualitativamente, alguma semelhança com o comportamento da chama durante o processo de combustão em

¹Fluidos para os quais a taxa de deformação é linearmente proporcional à tensão de cisalhamento.

uma câmara controlada usando enriquecimento de oxigênio.

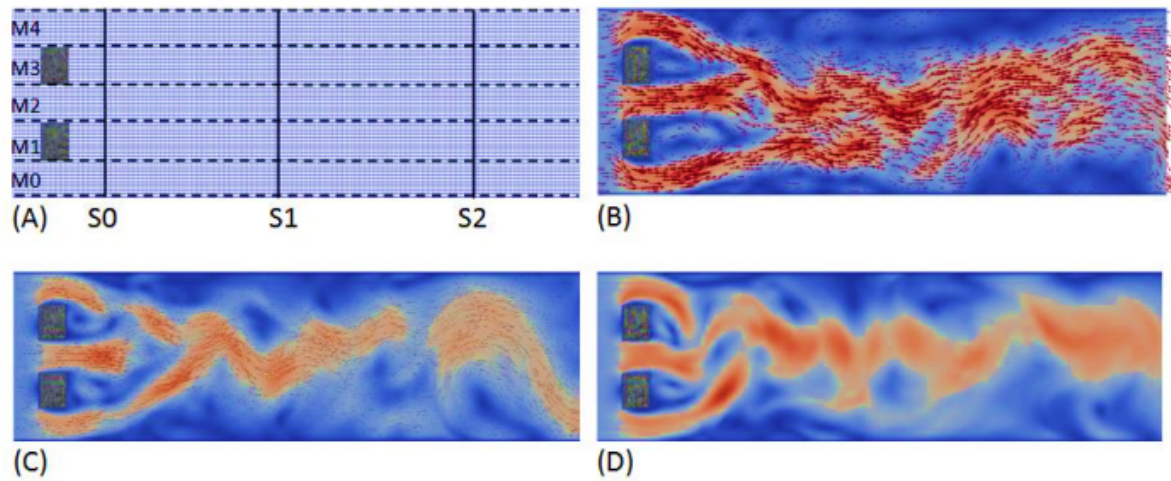


Figura 2.13: (A): Malha de pontos em que a simulação é realizada, mostrando dois obstáculos geradores de turbulência, e as secções (S_0 , S_1 e S_2), em conjunto com os pontos dos eixos M_0 a M_4 ; (B) Estado do fluxo turbulento com resolução em tamanho de 5,5; (C) Estado instantâneo do fluxo turbulento com exibição de tamanho 3,5; (D) Estado instantâneo do fluxo turbulento em alta resolução (no modo de sólido).

Para aplicação deste ensaio teórico foi usado o modelo Large Eddy Simulation (LES). O LES é um modelo de simulação para sistemas dinâmicos turbulentos e complexos. Este modelo foi utilizado para representar o regime turbulento de um fluxo interno mostrado na figura 2.13 com suas respectivas resoluções (A), (B), (C) e (D). No modelo (LES) foi utilizada a sub-malha Smagorinsky², em regime transitório, utilizando o agente de resolução pisoFoam, a fim de representar os estados caóticos e irregularidades de um fluido turbulento, caracterizado pelo número de Reynolds. A discretização do domínio usado (BlokMeshDict, de OpenFOAM®), para o fluxo, inicialmente laminar e, ao passar pelos obstáculos colocados intencionalmente posicionado na estrutura de malha, torna-se turbulento. A simulação permite a entrega de dados a partir do comportamento temporal da velocidade turbulenta em todo o comprimento da malha. Três secções (S_0 , S_1 e S_2) foram selecionadas a partir da posição após os obstáculos e, em cada secção, cinco pontos foram selecionados para analisar as distribuições de velocidade, estes pontos M_0 a M_4 , conforme a figura 2.13 (A).

No próximo capítulo serão apresentados os achados desta tese.

²Modelo proposto por Smagorinsky (1963), trata-se da hipótese do equilíbrio para pequenas escalas, ou seja, que a produção de tensões turbulentas sub-malha seja igual à dissipação sofrida.

Artigos publicados

O primeiro trabalho refere-se ao artigo publicado no ano de 2014, na revista científica *Physica A*, página 301 - 306, sob o título **A new proposal for analyzing combustion process stability based on the Hamming distance**. Neste artigo estudou-se a estabilidade do processo de combustão tendo como base uma aplicação original do método da distância Hamming. Discutiu-se a eficiência, pela formação de fuligem, no processo de combustão onde foi observado o comportamento caótico durante a queima de combustíveis AC e GN enriquecidos com O_2 nas proporções de 23% e 25%. Notou-se que o aumento de oxigênio na combustão torna o processo mais caótico e processos ineficientes tendem a um comportamento difuso sem uma regra pré-definida, dito classes de Wolfram.

No segundo trabalho, publicado no ano de 2015, na revista científica *Physica A*, página 268-272, sob o título **Fractal aspects in O_2 enriched combustion** estudou-se a estabilidade do processo de combustão durante a queima de dois combustíveis AC e GN enriquecidos com O_2 nas proporções de 23% e 25% e eficiência na sua queima avaliada pela formação de fuligem. Usou-se o método de análise temporal DFA para avaliar a correlação de longo alcance e autoafinidade nas séries estudadas. Observa-se que durante a combustão os gases não eficientes tendem a um comportamento subdifusivo enquanto que gases eficientes apresentam uma correlação persistente, indicando que o aumento de oxigênio na combustão tende a manter sua proporção de eficiência.

O terceiro trabalho publicado no ano de 2017, na revista científica *Physica A*, página 260-266, sob o título **Comparative Analysis on Turbulent regime: a self-affinity study in fluid flow by using OpenFoam CFD**, tem como objetivo estudar o campo de variação de velocidade no interior do tubo causado por um fluxo interno de um fluido newtoniano, que em princípio possuía um regime laminar e após passar por dois obstáculos, introduzidos no canal cilíndrico, sofreu vórtices em sua dinâmica de evolução. Instigou-se o campo de variação de velocidade em três posições distintas 2.13, com uso de um simulador OpenFoam CFD. Avaliou-se o comportamento das velocidades por uma série temporal pelo método de análise temporal DFA, a fim de investigar a correlação e autoafinidade nas séries estudadas. Concluiu-se que o comportamento das velocidades nas regiões mais afastadas tende a mudar a direção rapidamente devido às turbulências geradas nessas regiões, o que caracteriza, segundo o nosso trabalho, um comportamento sub difusivo. Resultado que corrobora com os estudos dos gases usados para avaliação da eficiência, pela formação de fuligem, em uma câmara de combustão controlada usando enriquecimento de O_2 na sua queima.



Contents lists available at ScienceDirect

Physica A

journal homepage: www.elsevier.com/locate/physa

A new proposal for analyzing combustion process stability based on the Hamming distance

J.W.G. Souza^{a,*}, H.B.B. Pereira^{b,a}, A.A.B. Santos^a, V. Senna^a, M.A. Moret^{c,a}^a Programa de Modelagem Computacional - SENAI CIMATEC, 41.650-010 Salvador, Bahia, Brazil^b Departamento de Educação - UNEB, 41.150-000 Salvador, Bahia, Brazil^c Universidade do Estado da Bahia - UNEB, 41.150-000 Salvador, Bahia, Brazil

HIGHLIGHTS

- We studied combustion process stability.
- We analyzed the stability based on the Hamming Distance.
- We discuss the combustion efficiency.
- We observe chaotic behavior in the process.

ARTICLE INFO

Article history:

Received 11 April 2014

Received in revised form 20 June 2014

Available online 5 July 2014

Keywords:

Hamming distance
Combustion process
Cellular automata

ABSTRACT

In this paper, the concentration of soot during controlled combustion is analyzed using two fuels: acetylene (AC) and natural gas (NG). The stability was evaluated within the spatio-temporal standards generated by the system evolution, which was based on the measuring technique known as the Hamming distance (Hd). It was observed that Hd presented a transient state for AC at a 21% oxygen concentration for small time units and achieved a medium equilibrium value ($Hd = 0.035$), showing a significant increase in flame oxidation during combustion and ideal soot formation. For NG, at all oxygen concentrations, there was a tendency toward flame oxidation and an increase in soot formation, which suggests that Hd oscillates without a defined value with small pulses over time, indicating a decrease in flame temperature.

© 2014 Elsevier B.V. All rights reserved.

1. Introduction

Understanding the combustion processes within soot formation (particles formed during the process of combustion) coupled with thermal radiation is important for steel industries. In this type of process, large quantities of energy are released in the form of heat and, consequently, light. Soot has an important role in the combustion process: its interaction allows knowing and consequently improving the thermal efficiency of the burners, thus increasing fuel economy.

The higher the process efficiency, the lower the NOX formation will be. Applications that use oxygen-enriched flame (OEF) aim to achieve higher efficiency in soot production and consequently better heat transfer and reduced pollution during the combustion process. Oxygen enrichment increases flame temperature, promotes soot formation and oxidation, and can decrease pollutant emissions.

* Corresponding author.

E-mail addresses: willes_10@hotmail.com, jwillesgs@gmail.com (J.W.G. Souza), hbbpereira@gmail.com (H.B.B. Pereira), alex.santos@fieb.org.br (A.A.B. Santos), valter.senna@gmail.com (V. Senna), mamoret@gmail.com (M.A. Moret).

<http://dx.doi.org/10.1016/j.physa.2014.06.057>

0378-4371/© 2014 Elsevier B.V. All rights reserved.

Wang et al. [1] presented a fluid dynamics model that included a detailed description of soot formation during the combustion process using OEF. The initial proposal of our work consists of studying small temporal variations in the soot formation process within confined flames using a measuring method known as the Hamming distance (Hd), which is based on the theory of cellular automata.

Cellular automata are simple mathematical models capable of explaining complex physical phenomena based on evolutionary dynamics. To study the physics of dynamic systems, Kauffman [2] considered a damage (perturbation) propagation method. This method essentially consists of monitoring the temporal evolution of two or more system configurations, given different initial conditions, subject to a specific dynamics and to the same thermal noise.

The stability analysis of the spatio-temporal patterns generated by the system's evolution relative to small perturbations, which are introduced in an initial state, evolve according to a simple rule known as cellular automata (CA)-type Wolfram class [3]. This automata model can be understood using an analysis technique called Hd or simply damage. Hamming applied a measurement parameter to correct the errors in telecommunication codes [4], and the same technique is used to measure the stability of cellular automata. This model has been employed in several scientific areas, for example, in biology, to explain how viral transmission of intraspecies evolutionary relationships occurs [5], and in chemistry, cellular automata can explain how molecules come together during a chemical reaction [6].

Because Hd can be used to explain evolutionary dynamics models and often complex models, a study using the theory of cellular automata will be performed considering Hd for two fuels using OEF. In this study, the combustion behavior of two enriched fuels will be analyzed using the theory of cellular automata evaluated by Hd.

2. Fractal geometry and cellular automata

A fractal geometry consists of a spatial set that expresses a scalar relationship between the number of its elements and its measuring class (size, density, or intensity). This definition applies to dynamic phenomena that can be spatially represented and hence measured. A physical structure with an irregular or fragmented shape at all measurable scales is also considered as a fractal, and scaling or geometric invariance under certain transformations is one of its characteristics. Scale invariance is known as self-similarity and presents the same visual aspect at any amplified or reduced scale.

Some structures present self-similarity but cannot be visualized at all scales, known as self-affine structures. Nevertheless, these structures are discussed under the scope of fractal geometry. For such natural forms, the concept of self-similarity should be considered carefully and should be seen as small parts belonging to the same structure or to an identical statistical distribution. A fractal characteristic is called self-affine if the set of system functions, when changed, still presents scalar symmetry. Notwithstanding, the reduction factor can be different for certain fractal dimensions [7] (i.e., it does not maintain the original form at all scales for the same altered scaling factor). However, certain temporal evolutions are discrete mathematical models in time, space, and dynamic variables whose evolutions are governed by rules, as in the case of CA.

A CA can be defined as a set of identical elements, usually located within a regular dimensional network [3]. Each element can have k states that can be altered over time, e.g., binary states. The values evolve in discrete time steps according to deterministic rules that specify the values in each cell in terms of the values of the neighboring cells. In other words, each unit influences the neighboring units by sending a response signal regarding its interaction. These evolutions obey a simple model that can be better understood through Wolfram classes, which can be described by Hd. CA may serve as useful models to describe complex systems, such as fractal characteristics. In fact, CA are complex systems composed of simpler units that interact strongly with each other as the system dynamically evolves. Wolfram automata [3] are categorized into four classes based on the temporal evolution patterns that describe the CA behavior, from a stable and homogeneous state to disordered patterns.

3. Model used

One technique used to study cellular automata stability consists of comparing the joint evolution of the original system to its replica, in which a perturbation was introduced into any of the cells (conversion from the active to inactive state). By comparing the trajectory of the original and perturbed configurations, the Hd between them can be defined. Hd is the total number of cells that differ from each other in the original and perturbed replica configurations divided by the total number of cells (N). Hd can be applied to compare genome sequences, where the class samples are measured with an Hd [8]; to solve the minimum cost flux problem, in which the modifications may be weighted using an Hd [9]; or to model infection scenarios, as the rules that govern infection can be described by a CA, and thus, the damage is described using Hd [10]. Hd is also extensively used in binary counter techniques [11].

For a unidimensional CA with N cells, Hd is given by Eq. (1).

$$Hd = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |\sigma_i(t) - \beta_i(t)| \quad (1)$$

where $\sigma_i(t)$ and $\beta_i(t)$ are the states of cell i at time t of the original and replica configurations, respectively. In general, the fraction of Hd in the initial instants is small, and by considering that the system is sensitive to the initial conditions (chaotic characteristics), a small perturbation can lead the system to a different attraction from the original by propagating throughout its length. The Hd can present four configurations associated with the four Wolfram classes [3], as described below:

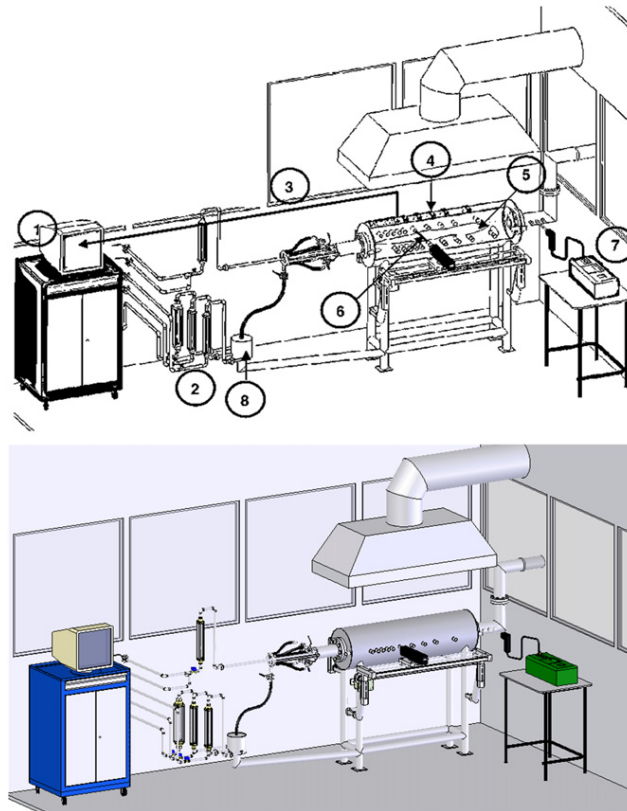


Fig. 1. General view of the experimental setup. (1) Data acquisition; (2) rotameters; (3) voltage signal; (4) photodetectors; (5) flame; (6) laser beam; (7) gas analyzer; (8) air/O₂ pre-mixer.

- **Class I:** the Hd vanishes with time. Therefore, the dynamics attractor is stable regardless of the perturbation.
- **Class II:** the Hd remains constant in time and is small.
- **Class III:** the Hd increases rapidly in time, generally reaching a high equilibrium value. In addition, even if the initial damage is minimal, it propagates throughout the CA chain. Therefore, Class III rules are unstable.
- **Class IV:** Hd has a long transient period before reaching its equilibrium value. The Hd increase is unpredictable. Moreover, its final value can vary greatly depending on the size and location of the initial damage. In general, the final Hd is similar to the case of Class II CA. Therefore, Class IV automaton dynamics features long chaotic transient periods before a stable periodic attractor is finally reached.

4. Experimental data

The experimental data were obtained using an apparatus consisting of a combustion chamber coupled with instruments for the analysis of gas and soot and for the verification of thermal radiation [12]. The experimental setup had a two-concentric-tube burner where the flame is generated within the chamber. These tubes have distinct diameters, where natural gas or acetylene flows through the smallest tube, while pure air or oxygen-enriched air flows through the region between the internal and external tubes, as shown in Fig. 1.

The flame was partially enriched with oxygen in the proportions of 23% and 25% in the presence of two combustibles, acetylene (AC) and natural gas (NG), respectively, and tested with atmospheric air without enrichment and with a 21% oxygen level. This enriching analysis method consists of evaluating the enriching effect on the flame (soot and oxidation formation) [13].

The admissible air/fuel or fuel/air relation admitted in a combustion, for a given functioning condition, is expressed by the relation $\varphi = \frac{A/C_{\text{stoichiometric}}}{A/C_{\text{real}}}$, where φ is the equivalence ratio, A is the air, and C is the fuel of the burning process. The equivalence ratio measures the air-fuel proportion, and its value defines the combustion characteristics as follows:

- $\varphi < 1$: mixture with an excess of air or poor mixture (in fuel);
- $\varphi = 1$: stoichiometric mixture;
- $\varphi > 1$: mixture with an excess of fuel or rich mixture.

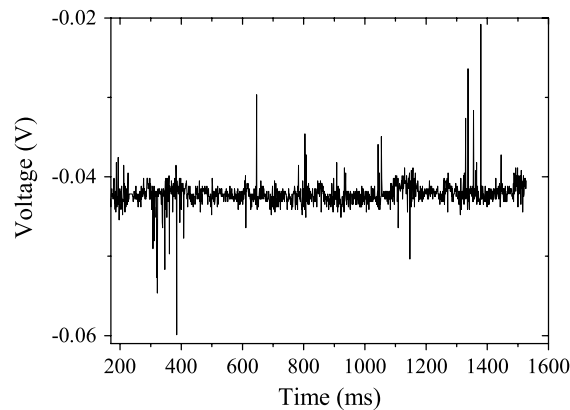


Fig. 2. Temporal series of the measurements obtained by the data acquisition for 23% NG with a 0.7 degree of equivalence.

A laser beam was emitted towards the flame to measure the concentration of particles formed in the combustion process. The radiation emitted by the laser was quantified by the photodetector (holes) outside the chamber, as shown in Fig. 1. Part of the emitted laser radiation was absorbed or dispersed. The absorption and dispersion were directly related to the formation of soot particles. Therefore, the maximum incident laser signal was obtained by reading the signal from data acquisition before the formation of the flame in the burner. Thus, the laser signal was focused towards the flame, which, in turn, was detected by a signal from the other side of the flame. Knowing the initial laser intensity, it is possible to calculate the difference between the emitted and received signals, thus determining what part of the laser radiation was absorbed or scattered due to the formation of soot during the combustion, as shown in the temporal series obtained in the natural gas experiment with 23% NG for the first hole with a 0.7 degree of equivalence (Fig. 2). With this data, it is possible to observe the temporal evolution of this system and evaluate it based on Hd.

5. Experimental results

Given the results, and using Eq. (1), Hd was calculated for the AC and NG with oxygen concentrations equal to 21%, 23%, and 25%. The quantity of air during combustion was varied, measured by the degree of equivalence, where $\varphi < 1.0$ indicates an excess of air in the flame, $\varphi = 1.0$ indicates the ideal condition (stoichiometric condition), and $\varphi > 1.0$ indicates a lack of air within the flame. As each cell represents a measure (hole), the number of cells is $N = 10$.

The category shown in Fig. 3 (a) and (b) denotes that the automata follow the same pattern for the AC fuels with an oxygen concentration of 21% for different equivalence ratios. It can also be observed that in the beginning of the combustion process, the Hd oscillates within a very small interval ($0.01 < Hd < 0.16$) until the distance is reached, following what corresponds to a Wolfram Class IV. This behavior leads us to believe that the soot concentration reaches a stationary state when Hd reaches a mean value of $Hd_m = 0.035$. In this case, when Hd reaches this value, a progressive reduction of soot concentration can be observed during the combustion process. This observation shows that when oxygen is added to the AC flame, there is a gain in fuel combustion, in other words, an increase in radiation.

Note also that the degree of equivalence of the flame is not influenced by the enriching process. However, this pattern is only observed for AC 21% because when the oxygen within the flame is increased for AC 23% and AC 25%, (Fig. 3(c) and (d)), Hd does not vanish but remains small in a diverse state and does not reach an equilibrium condition. Thus, no class is observed. This result shows that the increase of oxygen in the flame initially creates greater soot formation, and due to the higher soot concentration and OEF, there is an increase in the thermal radiation emitted by the flame.

When evaluating the NG experiments (Fig. 3(e) and (f)), we observed that the behavior of Hd indicates that NG does not follow any Wolfram class. This result means that when Hd oscillates within defined intervals with weak pulses, there is a tendency for minimal soot formation. NG does undergo soot formation (there is an increase of soot); however, compared to AC, NG soot formation is less, thereby reducing the radiation emission and possibly accounting for this behavior of Hd.

In general, the degree of equivalence does not influence Hd. Oxygen concentration does influence Hd, but only in the presence of 21% AC.

6. Conclusions

Based on these results, we conclude that for the AC gas, Hd remains initially small, oscillating within an interval of 0.0–0.12, and ultimately reaches a mean equilibrium value ($Hd_m = 0.035$), indicating that this behavior can be described as Wolfram class IV. However, this feature is only observed for 21% AC; in this case, Hd evinces a strong tendency to oxidize the flame, increasing its radiation and consequently decreasing the combustion temperature. Thus, upon reaching the stationary state, Hd indicates soot reduction and a higher combustion efficiency.

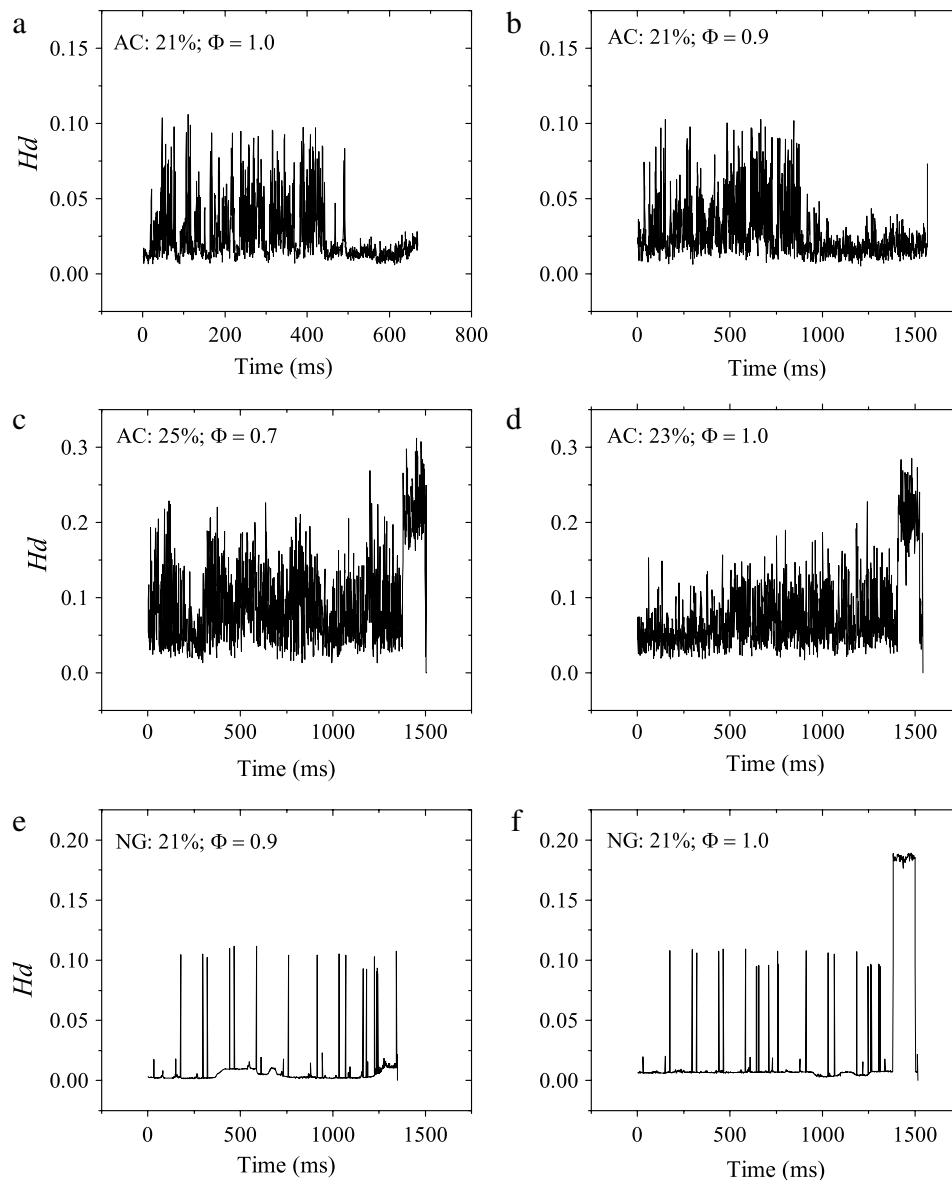


Fig. 3. Frequency of the Hd values using the combustibles AC and NG.

No Hd pattern was observed for AC with 23% and 25% oxygen concentrations. We can conclude that Hd, by remaining unstable, indicates increased soot formation, i.e., an increase in oxygen concentration within the flame makes the system sensitive to initial conditions and thus chaotic.

At oxygen concentrations of 21%, 23%, and 25%, for NG, Hd oscillates within a small interval with some localized pulses. In this context, the behavior of Hd indicates that this combustion process undergoes a radiation emission decrease and consequently an increase in flame temperature independently of the oxygen concentration, thus increasing soot formation during combustion. In addition, there was no indication that Hd was influenced by the flame's degree of equivalence. We recall that given the large amount of data, all the equality hypotheses applied to the series (same gas) were rejected with extremely low p values (less than 10^{-12}). In addition, the equality hypothesis between AC and NG is rejected with p value exactly equal to zero ($p = 0$).

Acknowledgments

This work received financial support from CNPq (grant no. 308785/2011-8) (Brazilian federal grant agency) and *Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado da Bahia - FAPESB* (grant no. BOLA1662012) (Bahia state grant agency).

References

- [1] L. Wang, N.E. Endrud, S.R. Turns, M.D. D'Agostini, A.G. Slavejkov, A study of the influence of oxygen index on soot, radiation, and emission characteristics of turbulent jet flames, *Combust. Sci. Technol.* 174 (2002) 45.
- [2] S.A. Kauffman, Metabolic stability and epigenesis in randomly connected nets, *J. Theoret. Biol.* 22 (1969) 437.
- [3] S. Wolfram, *A New Kind of Science*, Wolfram Media, 2002.
- [4] R.W. Hamming, Error detecting and error correcting codes, *Bell Syst. Tech. J.* 29 (1950) 147.
- [5] C.D. Pilcher, J.K. Wong, S.K. Pillai, Inferring HIV transmission dynamics from phylogenetic sequence relationships, *PLoS Med.* 5 (2008) e69.
- [6] C.A. Reite, A local cellular model for snow crystal growth, *Chaos Solitons Fractals* 23 (2005) 1111.
- [7] K. Falconer, *Fractal Geometry: Mathematical Foundations and Applications*, Chichester, John Wiley Ltd., 2003.
- [8] P.P. Hildete, S.P. Aluísio, P.K. Sen, Comparison of genomic sequences using the Hamming distance, *J. Statist. Plann. Inference* 130 (2005) 325.
- [9] Y. Jiang, L. Liu, B. Wu, E. Yao, Inverse minimum cost flow problems under the weighted Hamming distance, *J. Statist. Plann. Inference* 207 (2010) 50.
- [10] P. Qiu-Hui, L. Yu-Xing, H. Ming-Feng, M. Xiao-Jia, Infection model based on Hamming distance with age, *Int. J. Mod. Phys. C* 17 (2006) 1691.
- [11] P. Wegner, A technique for counting ones in a binary computer, *Commun. ACM* 3 (1960) 322.
- [12] A.A.B. Santos, E.A. Torres, P.A.P. Pereira, Experimental investigation of O₂ enriched confined flames, in: *Proceedings of the 22nd International Conference on Efficiency, Cost, Optimization Simulation and Environmental Impact of Energy Systems*, 2009.
- [13] A.A.B. Santos, L. Goldstein Jr., C.A. Ferrari, An experiment on the effect of oxygen content and air velocity on soot formation in acetylene laminar diffusion flame produced in a burner with a parallel annular coaxial oxidizer flow, *Int. Commun. Heat. Mass Transfer* (2009) 445.



Fractal aspects in O₂ enriched combustion



J.W.G. Souza^a, A.A.B. Santos^a, L.L.N. Guarieiro^{a,b}, M.A. Moret^{a,c,*}

^a Programa de Modelagem Computacional e Tecnologia Industrial - SENAI - CIMATEC, 41650-010 Salvador, Bahia, Brazil

^b INCT E & A: National Institute for Science and Technology, Energy and Environment, Universidade Federal da Bahia, UFBA, 40170-290 Salvador, BA, Brazil

^c Universidade do Estado da Bahia, 41150-000 Salvador, Bahia, Brazil

H I G H L I G H T S

- We studied combustion process stability.
- We used Detrended Fluctuation Analysis (DFA).
- We discuss the combustion efficiency.
- We observe an auto-affinity in the time series.

A R T I C L E I N F O

Article history:

Received 23 December 2014

Received in revised form 25 March 2015

Available online 28 April 2015

Keywords:

Detrended fluctuation analysis

Combustion processes

Energy efficiency

A B S T R A C T

In this study, we investigate the self-affinity of time series of thermal radiation from two fuels, natural gas (NG) and acetylene (AC), enriched with oxygen at 21%, 23% and 25% concentrations during the combustion process. We used the detrended fluctuation analysis method to evaluate the burning process of these fuels. We found a well-defined self-affine aspect for these gases in this dynamic process. Using the proposed method, we were able to characterize the time series of NG as a sub-diffusive process and the time series of AC as a process with persistent self-affinity.

© 2015 Elsevier B.V. All rights reserved.

The study of the technology of flame enrichment with oxygen, together with the study of soot formation coupled with thermal radiation, has attracted interest in industries that involve combustion processes where a large amount of energy is released as heat and, consequently, light. The main objective of combustion is maximize the heat while minimizing the production of polluting gases. It is necessary that this production be economical to maximize the combustion yield to obtain an energy potential with minimum dissipation. For this purpose, the air–fuel ratio must be optimized to obtain a perfect mixture. The air–fuel ratio has a fundamental influence on the combustions main state variables [1]. The more harmonic the union of these elements, the more efficient the combustion will be. The stoichiometry of the fuel composition provides a basis to calculate the required amount to be burnt in the reaction. Although there are existing studies on the mechanisms of soot formation and control, a more detailed understanding of these processes is important for technological advances in environmental impact (emission of polluting gases). Thus, we studied the radiation produced during the combustion of two fuels, acetylene (AC) [2] and natural gas (NG) [3]. The experiment was performed at different enriched oxygen concentrations in a combustion chamber equipped with gas analyzers and soot and thermal radiation detectors.

* Corresponding author at: Universidade do Estado da Bahia, 41150-000 Salvador, Bahia, Brazil.
E-mail address: mamoret@gmail.com (M.A. Moret).

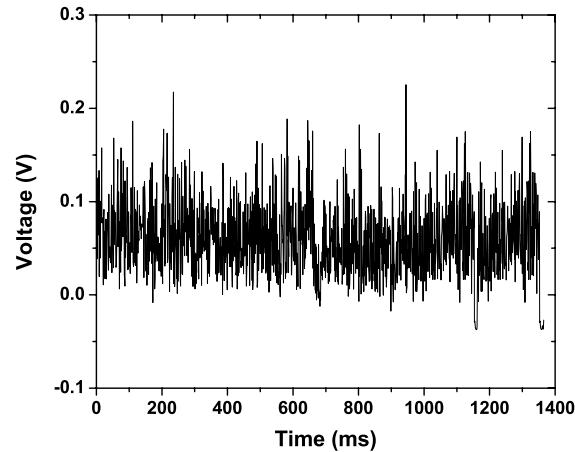


Fig. 1. Time series obtained from data acquisition for AC21% with 1.0 degree of equivalence.

The Detrended Fluctuation Analysis method (DFA) [4] is an important tool for analyzing non-steady time series [5]. DFA has been used to analyze time series in different areas of scientific knowledge. For example, it shows the change in behavior in the liquid–vapor phase transition [6], the behavior of astrophysical systems [7,8], the dynamics of arterial pressure variations [9], the behavior of a waterway transportation system [10], economic series [11], meteorological factors [12,13], proteins [14], heartbeat fluctuations [15], and sunspots [16], vegetation [17], geomagnetic signals [18], fires [19], among other applications. The main objective of this article is to investigate the self-affinity of the oxygen content in the time series of the formation of soot in confined flames, to evaluate the temporal correlation of the measurements obtained from a combustion process, and to assess the efficiency of this process. DFA will be used to diagnose the behavior of the radiation fluctuation based on the voltage variation measured in a combustion chamber. Fig. 1 shows the time series of the analysis of the dynamic behavior of the burning of AC21% with degree of equivalence $\varphi = 1.0$.

Fig. 1 shows that there is a fluctuation in the intensity of the absorbed radiation that is sensitive to initial conditions, such as fuel concentration, degree of equivalence, and amount of oxygen in the mixture to be burnt.

In summary, the DFA method consists of integrating the time series deviations and calculating the fluctuation for different boxes of size n , in other words, calculating the function $F(n)$:

$$F(n) = \sqrt{\frac{1}{N_{max}} \sum_{k=1}^{N_{max}} [y(k) - y_n(k)]^2} \tag{1}$$

where $y(k) = \sum_{i=1}^k [u(i) - \bar{u}]$ is the integrated deviation, and $y_n(k)$ is a polynomial fitted to $y(k)$ from which the trend is removed.

DFA allows analysis of the fluctuation in time series at different scales. The $F(n)$ function behaves as a power law of the $F(n) \approx n^\alpha$ type, where the exponent α is the exponent of the long-range correlation. In general, the physical interpretation of the problem must consider the behavior of the long-range correlation exponent, i.e., $\alpha < 1/2$ —anti-correlated or anti-persistent signal; $\alpha = 1/2$ —no correlation, white noise, does not have memory; $\alpha > 1/2$ —has persistent long-range correlation; $\alpha = 1$ —noise. For a higher exponent of long-range correlation values ($\alpha > 1$), the dynamics of the system is non-steady (transitory regime or transient conditions) [9] and closer to a random walk, in summary:

- (a) $\alpha < 3/2$ —sub-diffusive signal;
- (b) $\alpha = 3/2$ —diffusive signal;
- (c) $\alpha > 3/2$ —super-diffusive signal.

When the exponent α is equal to 0.50, it reveals that the data sequence is de-correlated, meaning that it is not possible to relate the past and future behaviors of the series because the process has no memory. An exponent lower than 0.5 indicates an anti-correlated expectation. For example, if the series has an anti-persistent behavior and there is a growing trend at a certain time, there will be a decreasing trend in the future fluctuation, and vice-versa. If the exponent is higher than 0.5, the series is called persistent, and the fluctuation behavior in the past tends to continue with time. Finally, if the exponent $\alpha > 1$, this value suggests a random walk, and the diffusion phenomenon [9] is established.

The diffusion phenomenon in time series occurs when the system shows periods tending to seasonality [9,10] or moments of sudden growth in the mean values of the observed physical magnitudes [6–10,16], such as the passenger demand increase on navigation systems during weekends and vacations [6] and the outbursts observed in x-ray binary systems [7]. As long as a diffuse process occurs, a set of observable elements and magnitudes, such as energy, linear momentum, pressure, number of molecules, or atoms, may change constantly (random character) [9].

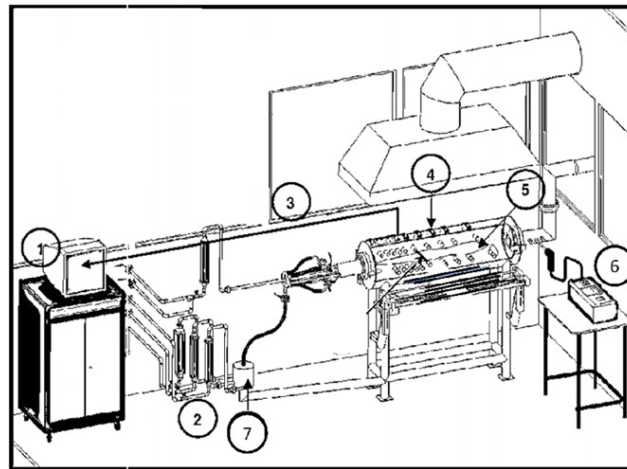


Fig. 2. Overview of the experimental device. Numbers correspond to (1) Data acquisition; (2) Rotameters; (3) Voltage signal; (4) Photo-detectors; (5) Flame; (6) Gas analyzer; (7) Air/O₂ pre-mixer.

Combustion data were obtained from an experiment performed in an apparatus consisting of a combustion chamber coupled with instruments to analyze gases and soot and to measure thermal radiation (Fig. 2) [20]. The experimental device has a burner composed of two concentric tubes where a flame is generated in the chamber. AC or NG flows in the internal tube, and pure or oxygen-enriched air flows in the external tube, as shown in Fig. 2.

The combustion air was enriched with oxygen at 23% and 25% proportions in the presence of AC and NG and tested with atmospheric air, without enrichment, with 21% oxygen concentration. This method consists of evaluating the effect of the enrichment on the flame (soot formation and oxidation).

The air/fuel or fuel/air ratio admitted in combustion at a certain functioning condition is expressed by the $\varphi = \frac{A/C_{\text{stoichiometric}}}{A/C_{\text{actual}}}$ ratio, where φ is known as the equivalence ratio, A is air, and C is the fuel. The equivalence ratio φ measures the air–fuel ratio, which defines the characteristics of the combustion as follows:

- $\varphi < 1$ —Mixture with excess air or poor mixture (in fuel);
- $\varphi = 1$ —Stoichiometric mixture;
- $\varphi > 1$ —Mixture with excess fuel or rich mixture.

A voltage difference was observed due to the variation of the flame radiation intensity, and the concentration of particles formed during the combustion process was measured. This radiation was quantified by the photo-detector (orifices) located outside of the chamber, as described in Fig. 2. Part of the radiation emission underwent absorption and dispersion because of the formation of soot particles generated during combustion.

In this study, we proposed to analyze the relationship between the voltage measured in the detector and the combustion efficiency measured by the formation of soot in the flame. Two different fuels, AC and NG, were used. The voltage measurements obtained in the soot formation in the combustion process were analyzed. Ten time series were recorded for each proposed initial condition. We then applied the DFA method to each oxygen concentration measurement and to each degree of equivalence.

Our analysis consisted of researching the behavior of exponent α at each degree of concentration in the combustion. The first case was NG at 21% with φ equal to 0.7, 0.9, 1.0, 1.1 and 1.3. Ten measurements were taken for each φ in orifices located along the combustion chamber. Time series were generated for each gas (NG and AC) with different values of φ and oxygen concentrations (21%, 23% and 25%).

Fig. 3 shows the behavior of AC with $\varphi = 1.1$ and 23% oxygen enrichment. It is important to note that the power law behavior was obtained independently of the initial conditions for both gases (AC and NG), which characterizes this type of system as self-affine objects.

We can verify the correlation between the (α) coefficients and explain how their fluctuations occur by evaluating the soot formation process as a function of oxygen concentration increase during burning.

In Fig. 4, we show the long-range correlation coefficients (exponent α) for the AC (4(a)) and NG (4(b)) series. We verified the influence of the oxygen concentration on the flame for both fuels by fixing the measurement in each orifice of the combustion chamber. The value of exponent α as a function of φ in the combustion is described in Fig. 4.

Fig. 4(a) shows the behavior of exponent α obtained from AC as a function of φ . Exponent α for AC21% maintains a mean value $\alpha > 1.0$, which indicates that the dynamics is non-steady and closer to a random walk. This result indicates that AC21% is less efficient and is similar to the fluctuation behavior of NG. Therefore, it is less stable, as there was less efficiency in soot formation, and a seasonality trend was observed (Fig. 1). However, for concentrations of 23% and 25%, the mean exponent α is $\bar{\alpha} = 0.94 \pm 0.01$, indicating that the combustion process is persistent at these concentrations. In other words, the

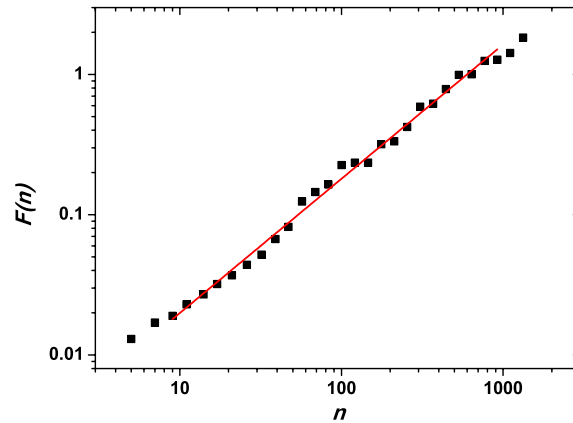


Fig. 3. Characteristic behavior of fuel-burning time series. In this case, AC with $\varphi = 1.1$ and enriched with 23% oxygen concentration exhibited $a = 0.96 \pm 0.02$, and the Pearson correlation index was $R = 0.99$.

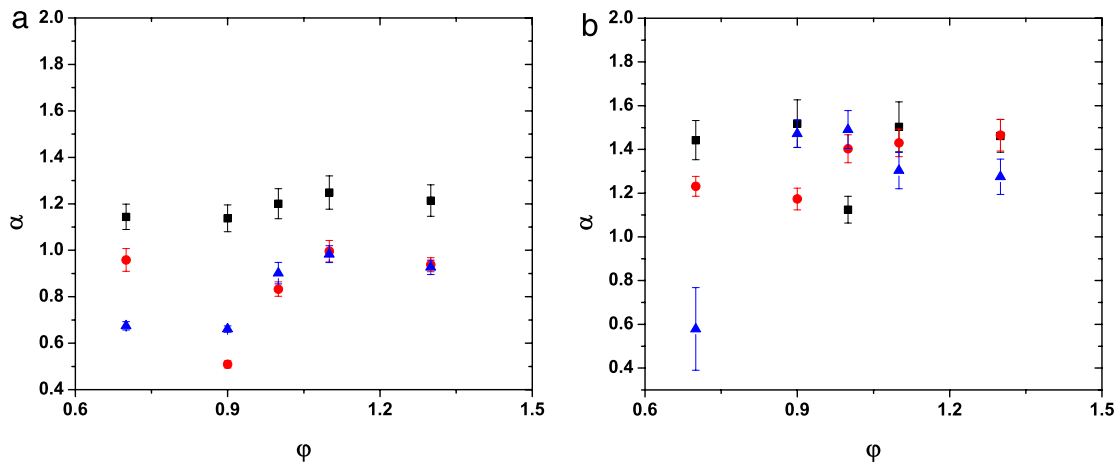


Fig. 4. Behavior of the long-range correlation exponent (α) as function of degree of equivalence (φ) for different oxygen concentration (21% (square), 23% (circle) and 25% (triangle)) for AC (a) and for NG (b).

increase in oxygen concentration in the flame makes the process more efficient, and the behavior of the radiation intensity fluctuation tends to remain the same over time.

Fig. 4(b) shows the behavior of NG at 21%, 23% and 25% concentrations. It is observed that the behavior of this process is practically the same at these concentrations with mean exponent α values $1.0 < \bar{\alpha} < 1.5$. Therefore, the process is sub-diffusive and non-steady [9]. Because NG has a lower efficiency and a tendency to form soot, these results suggest that the combustion behavior is independent of oxygen or air concentration in the flame because the process tends to always be diffusive and transitory. This result indicates that the process is less efficient, regardless of the oxygen increase (enriched combustion) or degree of equivalence (φ).

It is important to note that the first (1–3) and the last (7–10) orifices indicated fluctuations in the exponent α values in the $0 < \alpha < 3/2$ interval, without a defined pattern. This behavior may be related to the turbulence of the flame, especially in the initial and final states, where a zone is observed with a higher soot formation trend in the beginning of the flame and, consequently, higher oxidation in the final states.

In summary, a well-defined self-affine behavior was found for both gases, AC and NG, at any degree of equivalence (φ) and oxygen concentration in the combustion. The main difference was the behavior of this self-affinity. The AC tended to remain in a persistent regime independent of the φ and sensitive to oxygen concentration because when the oxygen mixture was poor (21% concentration), the regime tended to a sub-diffusive state. In contrast, NG remained in a sub-diffusive state regardless of the initial conditions.

In conclusion, NG has a lower efficiency and a higher tendency to form soot. This result suggests that the self-affine behavior of the time series of this fuel is independent of oxygen or air concentration in the flame and from φ because the process tends to be always sub-diffusive and transitory. Likewise, AC 21% exhibits a turbulent state (see discussion in Ref. [21]), tends to be less efficient, and exhibits fluctuation behavior similar to that of NG in that there was a lower efficiency of soot formation. However, for AC at 23% and 25% oxygen concentrations, the exponent α remained persistent,

which suggests that the combustion process tends to maintain the same radiation behavior over time. Our results indicate that AC is more efficient than NG at all initial conditions, as reported in the literature. However, for oxygen-poor mixtures (21%), the behavior of acetylene is similar to the behavior of natural gas.

Acknowledgments

This work received financial support from CNPq (grant no. 308785/2011-8) (Brazilian federal grant agency), *Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado da Bahia*—FAPESB (grant no. BOL01662012) (Bahia state grant agency) and *Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis*—ANP (PRH55).

References

- [1] L. Wang, N.E. Endrud, S.R. Turns, M.D. D'Agostini, A.G. Slavejtkov, *Combust. Sci. Technol.* 174 (2002) 45.
- [2] A.A.B. Santos, L. Goldstein Jr., C.A. Ferrari, *Int. Commun. Heat Mass Transfer* 36 (2009) 4445.
- [3] A.A.B. Santos, E.A. Torres, P.A.P. Pereira, *Energy (Oxford)* 36 (2011) 1527.
- [4] C.-K. Peng, S.V. Buldyrev, S. Havlin, M. Simons, H.E. Stanley, A.L. Goldberger, *Phys. Rev. E* 49 (1994) 1685.
- [5] K. Hu, P.Ch. Ivanov, Z. Chen, P. Carpena, H.E. Stanley, *Phys. Rev. E* 64 (2001) 011114.
- [6] G.F. Zebende, A.C.P. Rosa Jr., A.S. Alves, J.C.O. Jesus, M.A. Moret, *Physica A* 342 (2004) 322.
- [7] M.A. Moret, G.F. Zebende, E. Nogueira, M.G. Pereira, *Phys. Rev. E* 68 (2003) 041104.
- [8] G.F. Zebende, M.G. Pereira, E. Nogueira, M.A. Moret, *Physica A* 349 (2005) 452.
- [9] C.E.C. Galhardo, T.J.P. Penna, M. Argollo de Menezes, P.P.S. Soares, *New J. Phys.* 11 (2009) 103005.
- [10] A.N. Filho, G.F. Zebende, M.A. Moret, *Internat. J. Modern Phys. C* 19 (2008) 665–19.
- [11] Y. Liu, P. Gopikrishnan, P. Cizeau, M. Meyer, C.-K. Peng, H.E. Stanley, *Phys. Rev. E* 60 (1999) 1390.
- [12] M. Ausloos, K. Ivanova, *Phys. Rev. E* 63 (2001) 047201.
- [13] E. Koscielny-Bunde, A. Bunde, S. Havlin, H.E. Roman, Y. Goldreich, H.-J. Schellnhuber, *Phys. Rev. Lett.* 81 (1998) 729.
- [14] P.H. Figueiredo, M.A. Moret, P.G. Pascutti, E. Nogueira Jr., S. Coutinho, *Physica A* 389 (2010) 2682.
- [15] Y. Ashkenazy, P.Ch. Ivanov, S. Havlin, C.-K. Peng, A.L. Goldberger, H.E. Stanley, *Phys. Rev. Lett.* 86 (2001) 1900.
- [16] M.A. Moret, *Phys. Lett. A* 379 (2014) 494.
- [17] L. Telesca, R. Lasaponara, *Remote Sens. Environ.* 101 (2006) 95.
- [18] L. Telesca, K. Hattori, *Physica A* 384 (2007) 522.
- [19] J. Wang, W. Song, H. Zheng, L. Telesca, *Ecol. Modell.* 221 (2010) 85.
- [20] A.A.B. Santos, E.A. Torres, P.A.P. Pereira, *Int. Commun. Heat Mass Transfer* 39 (2012) 1513.
- [21] J.W.G. Souza, H.B.B. Pereira, A.A.B. Santos, V. Senna, M.A. Moret, *Physica A* 413 (2014) 301.

Comparative Analysis on Turbulent regime: a self-affinity study in fluid flow by using OpenFoam CFD

A. S. Nascimento Filho¹, J. W. G. de Souza¹, A. R. B. Pereira¹, A. A. B. Santos¹, I. C. da Cunha Lima^{1,2}, A. T. da Cunha Lima³, and M. A. Moret^{1,4}

¹*SENAI CIMATEC Salvador, Bahia, Brasil*

²*Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brazil*

³*Universidade Federal da Bahia, Salvador, BA, Brasil and*

⁴*Universidade Estadual da Bahia, Salvador, BA, Brasil*

(Dated: August 10, 2016)

We investigate the self-affinity of a fluid velocity time series in turbulent regime. We use the CFD OpenFoam library to simulate the flow of fluid in a duct with two obstacles disturbing the fluid laminar regime, in the beginning laminar. We calculated the fluid velocity in three sections in of the structure. The simulation presented more turbulences in sections further away from obstacles. We assess the self-affinity of properties of those sections by using the Detrended Fluctuation Analysis method. This scaling method presented two behaviors. First, a persistent behavior after passing through obstacles. Second, a sub-diffusive behavior in tubulent sections, presenting a long-range correlation exponent ranging between 1.0 and 1.5. The findings suggest that chaotic states tend to follow a sub-diffusive process.

I. INTRODUCTION

During the last years the study of processes involving Fluid Dynamics gained great importance in many fields of science, from Astrophysics to Medicine.¹⁻³ A great part of the success of the use of Fluid Dynamics is due to the advances on observation techniques and developments on high performance computation. The dynamics of a classical fluid is governed by two conservation laws, the mass conservation, and the momentum conservation. Once the Stokes hypothesis⁴ is assumed, the momentum conservation law reduces to the Navier-Stokes equations, a second order, non-linear, partial differential equation on the velocity vector field. The relative importance of two terms in that equation determine the flow regime. These terms are the one due to the viscosity, responsible for the dissipation process, and the so called inertia term, the non-linear one. Whenever the viscous term dominates the flow is laminar. On the other side we have a turbulent flow, where the velocity field corresponds to a stochastic process.⁵ The ratio between the non-linear and the viscous term is known as the Reynolds number.⁶ The transition from a laminar into a turbulent flow is associated to a certain value of the Reynolds number, which depends on the system under consideration. Physically, near the transition a minimal perturbation leads the system to respond strongly, reflecting the importance of the non-linearity of the Navier-Stokes equation. Although the equation of motion is well defined, rarely an exact solution exists without a severe approximation on the model representing the real system. In general, this is possible in cases of fluids with high viscosity. On the other hand, in cases of very small viscosity, we face a problem of singular perturbation.⁷ In such cases, we can imagine a solution in which a laminar flow exists, except for a very thin layer near a fluid-solid interface, a region called boundary layer.⁴ It is worthwhile to stress that flows in nature are rarely laminar.

In this work we are interested in comparing two completely different kind of flows, being treated by totally different methods. One is the internal turbulent flow of water in a channel. The other system is the thermal radiation originating from the combustion of acetylene gas enriched with oxygen and natural gas, at different concentrations, during the combustion process. The turbulent regime of flow in the latter case is treated experimentally, while that in the former is treated by numerical simulation. In both cases we are interested in obtaining correlation functions of the velocity field determining some characteristics of the stochastic process. The study of the turbulence is performed by analyzing the self-affinity time series of the velocity field, using the stochastically Detrended Fluctuation Analysis (DFA).⁸ We show that the results confirm remarkable similar characteristics, from the statistical point of view.

In the case of the turbulent flow in a channel, we simulate the flow in a domain as described in Fig. (1A). Water is injected into the channel from the left side. Two obstructions are placed in order to produce turbulence. They work as vorticity injector into the flow. Water is treated as an incompressible, Newtonian fluid. The Navier-Stokes equation, as decried below, are solved numerically using the OpenFOAM library,⁹ an open source package written in C++ language, using the finite volume method.

In the case of the thermal radiation, an experiment was performed using an apparatus consisting of a combustion chamber coupled with instruments to analyze gases and soot and to measure thermal radiation. The experimental device has a burner composed of two concentric tubes where a flame is generated in the chamber. According to the schema of the experimental device, the radiation was measured by a photo-detector (orifices) located outside the

chamber. For more details about that apparatus see Ref. 10.

II. TURBULENT REGIME SIMULATION

The motion of a fluid can be considered either as a flow of a continuous medium or as the motion of a fluid particle. Since the fluid particle moves solidary to the continuous medium, its speed at a given position \mathbf{r} and time t , is the same as the velocity field of the continuous media at that position and time. Together with the mass conservation of the fluid and the Stokes hypothesis, the momentum conservation determine the flow dynamics to be governed by the Navier-Stokes equations:

$$\rho \frac{D\mathbf{u}}{Dt} = -\nabla p + \eta \nabla^2 \mathbf{u} - \rho g \hat{k}, \quad (1)$$

where the material derivative is defined by:

$$\frac{D}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla). \quad (2)$$

In Eq. (1) ρ is the specific density of the fluid, the operator ∇^2 is the Laplacian, η is the viscosity of the fluid, p is the pressure and \hat{k} is a unitary vector in the direction of gravity. As mentioned in Section I, the second term of the material derivative when operating over the velocity field gives rise to the non-linear term of the Navier-Stokes equation. Fluids with weak viscosity, like water, usually flow in the turbulent regime, since the inertia term becomes very high creating instabilities,¹¹ the flow turning into a stochastic process. In such case the Navier-Stokes equation must be solved numerically.

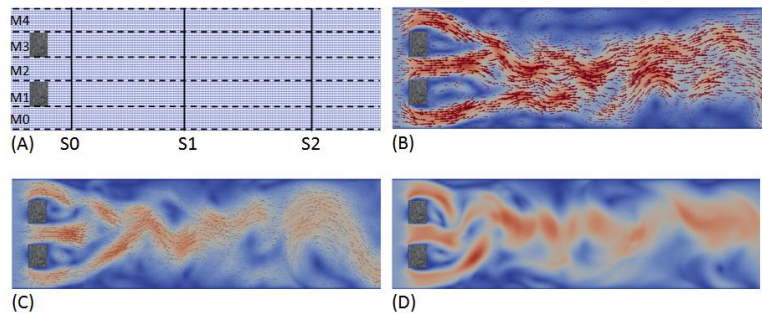


FIG. 1: (A):mesh of points where the simulation is performed, showing two obstacles generating turbulence, and the sections (S0, S1 and S2), together with the points at the axes M0 to M4; (B) Snapshot of the turbulent flow at with display of arrows in size 5.5;(C) snapshot of the turbulent flow at with display of arrows in size 3.5;(D) snapshot of the turbulent in high resolution (on solid mode).

TABLE I: The coordinates (xyz) in meters,at the three sections (S) where the velocity data were analysed

S0	S1	S2
M0 (0.003 0 0.00025)	M0 (0.01 0 0.00025)	M0 (0.02 0 0.00025)
M1 (0.003 0.00125 0.00025)	M1 (0.01 0.00125 0.00025)	M1 (0.02 0.00125 0.00025)
M2 (0.003 0.0025 0.00025)	M2 (0.01 0.0025 0.00025)	M2 (0.02 0.0025 0.00025)
M3 (0.003 0.00375 0.00025)	M3 (0.01 0.00375 0.00025)	M3 (0.02 0.00375 0.00025)
M4 (0.003 0.005 0.00025)	M4 (0.01 0.005 0.00025)	M4 (0.02 0.005 0.00025)

The model we used to represent the turbulent regime of an internal flow is shown in Figure 1(A). The Navier-Stokes equation was solved by using the OpenFOAM library a free open source library using the finite volume method and

written in C++ language. The Large Eddy Simulation (LES) model for turbulence was used, with the Smagorinsky sub-mesh, in transient regime, employing the pisoFoam solver for flows with high Reynolds numbers. The discretization of the domain used BlokMeshDict, from OpenFOAM, The flow, initially laminar, becomes turbulent after it passes two obstacles intentionally positioned in the mesh structure, Fig. 1A. The simulation produces data of the turbulent velocities in the entire length of the mesh for every time step. Three sections have been selected from data probing, and at each section five points were selected to analyse the velocity distributions. These are the points M0 to M4 whose coordinates (x,y,z) are defined in Table I. M0 and M4 lie near the wall, while M1, M2 and M3 lie near mid channel.

III. STATISTICAL MODEL

The Detrended Fluctuation Analysis method (DFA)⁸ is used to avoid false detection of correlations that occurs in non-stationary time series¹² and it is proposed for determining the statistical self-affinity of a signal; the method is based on the theory of random walks. The DFA method has been applied for time series analyses in many areas, including the following: phase transitions,¹³ fluctuation analyses of astrophysical systems,^{14,15} blood pressure oscillations and its feedback,¹⁶ self-affinity of vehicle demand on the ferry-boat system,²⁶ economics time series,¹⁷⁻¹⁹ cloud structure analysis,²⁰ geology,²¹ ion channel studies,²³ weather,²² protein energy,²⁴ solar spot time series,²⁵ efficiency in combustion processes.¹⁰

Here, the DFA method is used to study the self-affinity fluctuations of the fluid speed at equally spaced points in different positions, as shown Figure 1A. The following steps are used for the DFA method,⁸. Consider an original time series, \mathbf{r}_i , where $i = 1, 2, \dots, N$ and N is the total number of points. The time series \mathbf{r}_i is integrated to obtain

$$y(k) = \sum_{i=1}^k [\mathbf{r}_i - \langle \mathbf{r} \rangle] \quad (3)$$

where $\langle \mathbf{r} \rangle$ is the average value of \mathbf{r}_i ; the integrated signal $y(k)$ is divided into boxes of equal length n ; for each n -size box, $y(k)$ is fitted using a polynomial function of order 1, which represents the trend in the box. The y coordinate of the fitting line in each box is denoted by $y_n(k)$ because a polynomial fitting of order 1 is used and the algorithm DFA-1 is denoted; the integrated signal $y(k)$ is detrended by subtracting the local trend $y_n(k)$ within each box (of length n); for a given n -size box, the root-mean-square fluctuation, $F(n)$, for the integrated and detrended signal is given as

$$F(n) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N [y(k) - y_n(k)]^2} \quad (4)$$

The above computation is repeated for a broad range of scales (n -sized box) to provide a relationship between $F(n)$ and the box size n .

The scaling exponent α is defined whenever such a relationship is characterized by a power-law $F(n) \propto n^\alpha$. Therefore, the scaling exponent α is a self-affine parameter expressing the long-range power-law correlation properties. Moreover, the scaling exponent α allows for the assessment of how the long-range correlation influences the future behavior. The α exponent is classified as follows:¹⁶

For higher values of the long-range correlation exponent ($\alpha > 1$) the dynamics of the system is characterized by being non-stationary (transitional regime or transient conditions). The ranges of variation are:

1. $\alpha < 3/2$ - subdiffusive signal;
2. $\alpha = 3/2$ - diffusive signal;
3. $\alpha > 3/2$ - superdiffusive signal.

If $\alpha = 0.50$ the data sequence is uncorrelated. This means that one cannot relate the past behavior with the behavior of the series in the future, because there is no memory in the process. If α is less than 0.5, the time series has an anti-correlated behavior, indicating an anti-persistent signal, i.e., when large values (small) occur, in the future, fluctuations tend to have small (large) values. If α larger than 0.5 the fluctuation in the time series has a correlated behavior, i.e., large (small) fluctuations tend to keep this behavior in the future, as a persistent signal. Finally, if the α exponent > 1.0 , a random walk is suggested, the signal is not stationary providing the diffusion phenomenon.¹⁶

The diffusion phenomenon in time series occurs when a system has periods tending to seasonality,^{16,26} or for moments where there is a sudden increase in the measured values of the observed physical quantities,^{13-16,25,26} as increased passenger demand in navigation systems on weekends and holidays,²⁶ x-ray binary systems with flare regimen,¹⁴ efficiency in combustion processes.¹⁰ Since we face a diffusive process, a set of observable elements and magnitudes may change constantly, as energy, linear momentum, pressure, number of molecules or atoms, among others.¹⁶

IV. RESULTS

Figure 2 shows the time series on section S_0 based on the values of the x-component of the velocity field (along the channel axis) in the sections shown in Figure 1A. Thus, we present the time series in three points, S_0 , S_1 and S_2 , at the specified regions M0 to M4.

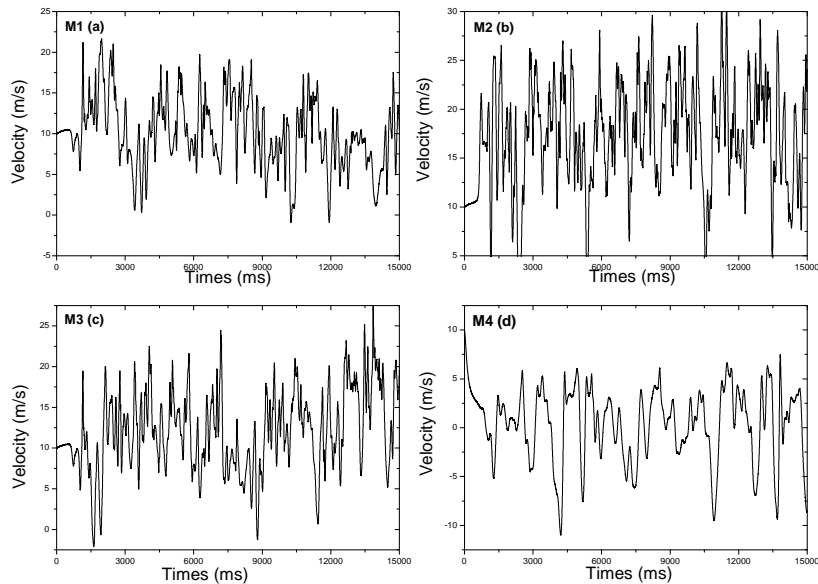


FIG. 2: Time series of U_x in the section S_0 for regions M1(a) M2(b) M3(c) and M4(d).

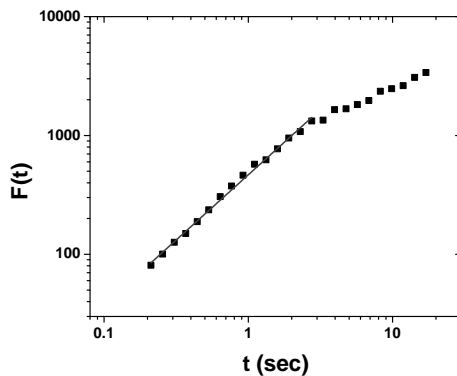


FIG. 3: Self-affinity in the section S_0 at region M1, the $\alpha = 0.54 \pm 0.02$.

Note that the fluctuation in time series in Figures 2a, 2b and 2c is evident (with small fluctuation) in all positions, but there is a tendency in their behavior, i. e., no evidence of change in the variation direction of the speed. This indicates that just after the obstacles, the system displays variations in their speed, but not enough to change its direction. The analysis of the position M4 (Figure 2d) suggests that region to be influenced by the walls of the duct after passing the obstacles. This indicates a change of direction and speed.

Figure 3 depicts a persistent behavior. We compared this simulation behavior with the results in Ref. 10, where the flame efficiency is evaluated by comparing the relationship between the voltage measured in the detector and

the combustion efficiency measured by the formation of soot in the flame. Since the combustion data were obtained from an apparatus consisting of a combustion chamber, in order to analyze gases and soot and to measure thermal radiation. Where the voltage difference was observed due to the variation of the flame radiation intensity, and the concentration of particles formed during the combustion process was measured.

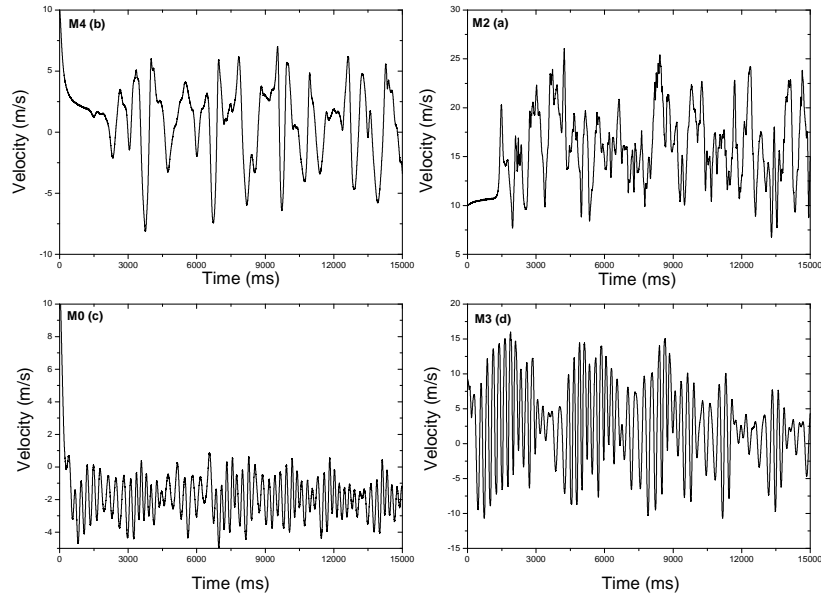


FIG. 4: Time series of velocities U_x at regions positions M2(a) and M4(b) in section S1 and for section S2 we analysed regions M0(c) and M3(d).

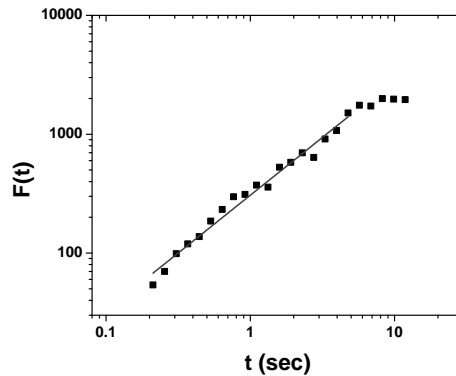


FIG. 5: Self affinity in section S2 in region M3, the $\alpha = 1.12 \pm 0.02$.

On the other hand, in sections S1 e S2, as seen in Figure 4, it is observed that, mainly in S2, the central region, the speed raise up and change its direction, i.e., in this region changes on the speed direction occur.

In Ref. 10 combined degree of oxygen concentration in the combustion ϕ (equivalence ratio), with two different fuels, natural gas (NG) and acetylene (AC) in order to to evaluate the effect of the enrichment on the flame (soot formation and oxidation). The findings of DFA α exponent at each degree of concentration in the combustion are summarized in table II.

According to Ref. 10 the sub diffusive state, as seen in Figure 5, presents the worst efficiency. In Ref. 16 it is

shown that the sub diffusive process tends to always be transitory, thereby cannot sustain a state for a long time. This result explains the low efficiency in all NG arrangement. On account of the influence of the fluid on the walls after passing through the obstacles, sections S1 and S2, the process tends to become sub diffusive indicating a more turbulent state.

TABLE II: The DFA (α exponent) analysis to each oxygen concentration measurement and to each degree of equivalence (ϕ equivalence ratio).

ϕ , Concentration	α exponent	
	AC	NG
$(0.7 \leq \phi \leq 1.0)$, 21%	sub difusive	sub difusive
$(0.7 \leq \phi \leq 1.0)$, 23%	persistent	sub difusive
$(0.7 \leq \phi \leq 1.0)$, 25%	persistent	sub difusive

V. CONCLUSION

In Summary, we observe that in less turbulent regions the correlation in the signal is persistent, i.e., characterized by exponent into the following interval $0.5 < \alpha < 1.0$. After the obstacle the α exponent changes from a persistent behavior to a sub diffusive one. This was verified both qualitatively and quantitatively, because the exponent ranged from $0.5 < \alpha < 1.0$, close to the obstacle and $1.0 < \alpha < 1.5$ far from the obstacle. In Ref.10 it shows that an effective combustion process tends to remain in a persistent behavior ($0.5 < \alpha < 1.0$). On the other hand, that was observed the worst efficiency the time series behaves as a sub diffusive process.

The findings suggest that sub diffusive behavior can be associated to a turbulent regime, otherwise to the observed in Refs. 14,16,26, among others. That said, the sub diffusive behavior can be observed both to sudden changes as explained in Ref. 16 and to a turbulent and chaotic processes like seen in Ref. 10 and proved in this paper.

-
- ¹ Morris, Paul D. et al. *Computational fluid dynamics modelling in cardiovascular medicine. Heart*, v. 102, n. 1, p. 18-28, 2016.
- ² V. M. Canuto, J. Christensen-Dalsgaard, Annual Review of Fluid Mechanics Vol. 30: 167-198 (1998) DOI: 10.1146/annurev.fluid.30.1.167
- ³ Alison L. Marsden, Yuri Bazilevs, Christopher C. Long, and Marek Behr, Wiley Interdiscip Rev Syst Biol Med. 2014 March ; 6(2): 169188. doi:10.1002/wsbm.1260.
- ⁴ H. Schlichting, K. Gersten, *Boundary Layer Theory*, Springer (2003)
- ⁵ John L. Lumley, *Stochastic Tools in Turbulence*, p.4, Dover (1998).
- ⁶ D. J. Tritton, *Physical Fluid Dynamics*, p.26, Clarendon Press, Oxford (2006).
- ⁷ David C. Wilcox, *Turbulence Modeling for CFD*, p.436, DCW Industries (2010).
- ⁸ Peng, C.-K.; Buldyrev, S. H., Stanley and Goldberger, A. L. Phys. Rev. E, 49, 1685 (1994).
- ⁹ Weller, Henry G. et al. A tensorial approach to computational continuum mechanics using object-oriented techniques. Computers in physics, v. 12, n. 6, p. 620-631, 1998.
- ¹⁰ Souza, J.W.G., Pereira, H.B.B., Santos, A.A.B., V. Senna, Moret, M.A. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, v. 434, p. 268-272, 2015.
- ¹¹ Tritton, David J. Physical fluid dynamics. Oxford Press, p.314, 2006.
- ¹² Hu, K., Ivanov, P. Ch., Chen, Z., Carpena, P. and Stanley, H. E. Phys. Rev. E 64, n. 64, 011114 (2001).
- ¹³ Zebende, G. F., Rosa Jr., A. C. P., Alves, A. S., Jesus, J. C. O. and Moret, M.A. Physica A 342, 322 (2004).
- ¹⁴ Moret, M. A., Zebende, G. F., Nogueira, E. and Pereira, M. G. Phys. Rev. E 68, 041104 (2003).
- ¹⁵ Zebende, G. F., Pereira, M. G., Nogueira, E. and Moret, M.A. Physica A 349, 452 (2005).
- ¹⁶ Galhardo, C. E. C., Penna, T. J. P., Argollo de Menezes, M. and Soares, P. P. S. New Journal of Physics 11, 103005 (2009).
- ¹⁷ Ausloos, M. and Ivanova, K. Phys. Rev. E 63, 047201 (2001).
- ¹⁸ Koscielny-Bunde, E., Bunde, A., Havlin, S., Roman, H. E., Goldreich, Y. and Schellnhuber, H.-J. Phys. Rev. Lett. 81, 729 (1998).
- ¹⁹ Lahmiri, S. Physica A 437, 130 (2015).
- ²⁰ Ivanova, K., Ausloos, M., Clothiaux, E. E. Ackerman, T. P. Europhys. Lett. 52, 40 (2000).
- ²¹ Malamud, B. D., Turcotte, D. L. J. Stat. Plan. Infer. 80, 173 (1999).
- ²² Ivanova, K., Ausloos, M. Physica A 274, 349 (1999).
- ²³ Siwy, Z., Ausloos, M., Ivanova, K. Phys. Rev. E 65, 031907 (2002).
- ²⁴ Figueirdo, P. H., Moret, M. A., Pascutti, P. G., Nogueira Jr., E. and Coutinho, S. Physica A 389, 2682 (2010).
- ²⁵ Moret, M. A. Phys. Lett. A 378, 494 (2014).
- ²⁶ Filho, A. N., Zebende, G.F. and Moret, M. A. International Journal of Modern Physics C 19, 665 (2008).
Statistical Mechanics and its Applications, 413, 301-306.

Considerações finais

4.1 Conclusões

Avaliando os tipos de resultados, conclui-se que a Hd , para o gás AC, permanece pequena e inicialmente oscilando em um intervalo de $0.0 < Hd < 0.12$ e atinge um valor de equilíbrio médio ($Hd \cong 0.035$) indicando que este comportamento obedece a IV classe de Wolfram. Portanto esse processo dinâmico pode ser definido como um autômato e possui complexidade na sua evolução. Foi verificado em Souza et al. (2014) dois comportamentos em seu estado evolutivo, primeiramente um estado desordenado, alterando para estado definido em cada passo de sua evolução, atingindo assim um estado de equilíbrio no tempo.

Porém este aspecto (classe de Wolfram) só é observado para o AC 21%. Nesse caso a Hd indica uma forte tendência à oxidação da chama aumentando sua radiação, o que causa uma diminuição da temperatura na combustão. Deste modo, ao atingir um estado estacionário a Hd indica redução de fuligem e maior eficiência na combustão comparado com o GN.

Nenhum padrão foi observado na Hd para o AC nas concentrações de oxigênio de 23% e 25%. Foi possível concluir que a Hd , ao permanecer instável, indicou um aumento regular na formação de fuligem, ou seja, um aumento na concentração de oxigênio na chama tornou o sistema fortemente sensível as condições iniciais, portanto mais caótico, porém mais eficiente. Isso indica que o aumento de concentração de oxigênio na chama aumenta sua eficiência, porém, possivelmente, por ser um estado mais caótico, não pertence a um padrão definido, dito autômato. Isso mostra que o aumento de oxigênio na chama cria inicialmente uma maior tendência à formação de fuligem dentro da normalidade, dessa forma há um aumento da radiação térmica emitida pela chama, ou seja, uma maior eficiência para um estado ainda mais caótico.

Nas concentrações de 21%, 23% e 25% de oxigênio, para o GN, a Hd oscilou em um intervalo pequeno com alguns pulsos localizados. Nesse contexto, a Hd indica que esse processo de combustão sofreu um decréscimo na emissão de radiação e, conseqüentemente, um aumento na temperatura da chama independentemente da concentração de oxigênio, aumentando assim a formação demasiada de fuligem na queima e conseqüentemente, mostrando um processo ineficiente.

Desta maneira, duas evidências puderam ser extraídas usando a distância de Hamming sob a ótica dos autômatos celulares: a primeira refere-se ao fato de que o grau de equivalência

não influencia na Hd; e a segunda está relacionada à ação de aumento de oxigênio, fazendo que um autômato definido (AC21% - IV classe de Wolfram) para um estado transiente não definido, porém mais eficiente (AC 23% e 25%).

Avançando na análise do processo de combustão, estudou-se a série temporal do sistema (formação de fuligem no processo de combustão) utilizando o método de análise de flutuações em sinais não estacionários, DFA.

Foi verificado um comportamento auto afim bem definido para ambos os gases, AC e GN, para todos os graus de equivalência (φ) e concentração de oxigênio na combustão. Em todos os casos foi verificado uma propriedade fractal bem definido, fazendo com que seu comportamento possa ser avaliado por uma lei de potência.

Para a combustão do AC na concentração de 21% de oxigênio, esse processo se mantém em um regime sub-difusivo, $\alpha > 1$, indicando que a dinâmica é sensível às mudanças nas variáveis físicas do sistema. Contudo o aumento de oxigênio na chama, faz com que esse processo passe para um regime persistente ($\alpha > 1/2$), i. e., o aumento da concentração de oxigênio na chama torna o processo mais eficiente e o comportamento da flutuação na intensidade de radiação tende a continuar o mesmo na evolução temporal até o fim da queima. Para o grau de equivalência, φ , não houve mudanças significativas nessa variável que afetassem o coeficiente de correlação α .

Por outro lado, o GN se manteve em um regime sub-difusivo independente das condições de oxigênio. Dessa maneira, o GN tem uma menor eficiência e maior tendência ao excesso de formação de fuligem. Esse resultado sugere que o comportamento auto afim da série temporal deste combustível independe da concentração de oxigênio. Assim como no combustível AC, não houve mudanças no grau φ para o GN. Estes resultados mostram que o gás AC, embora seja mais eficiente que o GN, como observado nas literaturas, para misturas pobres de oxigênio (21%), possui comportamento que se assemelha ao GN.

Além disso, buscando analisar as mudanças de comportamentos em sinais persistentes e subdifusivo que apresentam caoticidade e turbulência, elaborou-se um ensaio teórico que teve como fundamento avaliar o comportamento da velocidade do fluido em um estado turbulento. Através deste resultado pôde-se verificar que sinais persistentes, $0.5 < \alpha < 1.0$, ocorrem inicialmente (S_0) após a passagem do fluido pelos obstáculos, indicando que o comportamento qualitativo, flutuação da velocidade, tende a manter-se na evolução temporal. Contudo em posições mais afastadas (S_1 e S_2) verifica-se que o coeficiente de correlação $\alpha > 1$, o que caracteriza um estado subdifusivo. Dessa forma, nessa região a mudança de direção da velocidade é evidente devido à turbulência do fluido, fazendo com que algumas características físicas do sistema mude em cada instante, exemplo a inércia do sistema. Esse resultado sugere que zonas de turbulência estão diretamente relacionadas

com estado subdifusivo.

Finalmente, após aplicação do método DFA na dinâmica de análise da auto afinidade em séries temporais não estacionárias tanto para o processo de combustão quanto na dinâmica de um fluido turbulento, observou-se que os dois ensaios [Souza et al. \(2015\)](#) e (Capítulo três, artigo 3), sugerem semelhanças qualitativas no comportamento associado ao processo de turbulência. Dessa forma, estados turbulentos tendem a um regime sub-difusivo ou de sub-difusidade, i. e., a ineficiência de um processo de combustão está diretamente ligada ao estado sub-difusivo e turbulento.

4.2 Trabalhos Futuros

Temos como proposta estender este trabalho para avaliar o comportamento das partículas (fuligem), no processo de combustão, analisando as interações e compreensão do maior número de variáveis possíveis. Para essa nova pesquisa procuraremos recorrer a modelos mais robustos que possam avaliar o comportamento das partículas de um evento dinâmico nas condições mais próxima da realidade. Dessa forma temos como propósito principal encontrar uma equação e/ou uma representação de um modelo matemático que visa explicar, com mais detalhes, o comportamento qualitativo ou quantitativo em uma combustão controlada através da formação de fuligem.

Referências

- ASHKENAZY, Y. et al. Magnitude and sign correlations in heartbeat fluctuations. *Physical Review Letters*, APS, v. 86, n. 9, p. 1900, 2001.
- ASSIS, T. A. de; MIRANDA, J. G. V.; MOTA, F. de B.; ANDRADE, R. F. S.; CASTILHO, C. M. C. de. Geometria fractal: propriedades e características de fractais ideais. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, SciELO Brasil, v. 30, n. 2, p. 2304, 2008.
- AUSLOOS, M.; IVANOVA, K. Power-law correlations in the southern-oscillation-index fluctuations characterizing el ni ñ o. *Physical Review E*, APS, v. 63, n. 4, p. 047201, 2001.
- CASTRO, M. L. A.; CASTRO, R. de O. Autômatos celulares: implementações de von neumann, conway e wolfram. *Revista de Ciências Exatas e Tecnologia*, v. 3, n. 3, p. 89–106, 2015.
- FALCONER, K. *Fractal geometry: mathematical foundations and applications*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2004.
- FIGUEIRÊDO, P.; MORET, M.; PASCUTTI, P.; NOGUEIRA, E.; COUTINHO, S. Self-affine analysis of protein energy. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, Elsevier, v. 389, n. 13, p. 2682–2686, 2010.
- FILHO, A.; ZEBENDE, G.; MORET, M. Self-affinity of vehicle demand on the ferry-boat system. *International Journal of Modern Physics C*, World Scientific, v. 19, n. 04, p. 665–669, 2008.
- GALHARDO, C.; PENNA, T.; MENEZES, M. A. de; SOARES, P. Detrended fluctuation analysis of a systolic blood pressure control loop. *New Journal of Physics*, IOP Publishing, v. 11, n. 10, p. 103005, 2009.
- GLASSMAN, I. Soot formation in combustion processes. In: ELSEVIER. *Symposium (international) on combustion*. [S.l.], 1989. v. 22, n. 1, p. 295–311.
- GLERIA, I.; MATSUSHITA, R.; SILVA, S. d. Sistemas complexos, criticalidade e leis de potência. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, SciELO Brasil, v. 26, n. 2, p. 99–108, 2004.
- HAMMING, R. W. Error detecting and error correcting codes. *Bell System technical journal*, Wiley Online Library, v. 29, n. 2, p. 147–160, 1950.
- JIANG, Y.; LIU, L.; WU, B.; YAO, E. Inverse minimum cost flow problems under the weighted hamming distance. *European Journal of Operational Research*, Elsevier, v. 207, n. 1, p. 50–54, 2010.

- JR, C. E. B. *Oxygen-enhanced combustion*. [S.l.]: CRC press, 2010.
- KAUFFMAN, S. A. Metabolic stability and epigenesis in randomly constructed genetic nets. *Journal of theoretical biology*, Elsevier, v. 22, n. 3, p. 437–467, 1969.
- KOSCIELNY-BUNDE, E. et al. Indication of a universal persistence law governing atmospheric variability. *Physical Review Letters*, APS, v. 81, n. 3, p. 729, 1998.
- LIU, Y.; GOPIKRISHNAN, P.; STANLEY, H. E. et al. Statistical properties of the volatility of price fluctuations. *Physical Review E*, APS, v. 60, n. 2, p. 1390, 1999.
- MANDELBROT, B. B. *The fractal geometry of nature*. [S.l.]: Macmillan, 1983.
- MIRANDA, B. A. et al. Autômatos celulares aplicados à epidemiologia da esquistossomose em pernambuco-uma análise comparativa do processo de coleta de moluscos. In: *Anais do XXXI Congresso Nacional de Matemática Aplicada e Computacional*. Belém: Sociedade Brasileira de Matemática Aplicada e Computacional. [S.l.: s.n.], 2008. p. 630–6.
- MOREIRA, I. Fractals. In: *Anais do XXXI Congresso Nacional de Matemática Aplicada e Computacional*. [S.l.: s.n.], 1996. p. 1175.
- MORET, M. Self-affinity and nonextensivity of sunspots. *Physics Letters A*, Elsevier, v. 378, n. 5, p. 494–496, 2014.
- MORET, M. A.; ZEBENDE, G.; JR, E. N.; PEREIRA, M. Fluctuation analysis of stellar x-ray binary systems. *Physical Review E*, APS, v. 68, n. 4, p. 041104, 2003.
- NEUMANN, J. V. *The general and logical theory of automata Collected works Pergamon Press*. [S.l.]: Oxford, 1963.
- PAN, Q.-H.; LI, Y.-X.; HE, M.-F.; MU, X.-J. Infection model based on hamming distance with age. *International Journal of Modern Physics C*, World Scientific, v. 17, n. 11, p. 1691–1699, 2006.
- PEIXOTO, M.; BARROS, L. Um estudo de autômatos celulares para o espalhamento geográfico de epidemias com parâmetro fuzzy. *Trends in Applied and Computational Mathematics*, v. 5, n. 1, p. 125–133, 2004.
- PENG, C.-K. et al. Mosaic organization of dna nucleotides. *Physical review e*, APS, v. 49, n. 2, p. 1685, 1994.
- PINHEIRO, H. P.; PINHEIRO, A. de S.; SEN, P. K. Comparison of genomic sequences using the hamming distance. *Journal of Statistical Planning and Inference*, Elsevier, v. 130, n. 1, p. 325–339, 2005.
- SANTOS, A.; TORRES, E.; PEREIRA, P. Experimental investigation of o₂ enriched confined flames. In: *22nd International Conference on Efficiency, Cost, Optimization Simulation and Environmental Impact of Energy Systems, Foz do Iguaçu*. [S.l.: s.n.], 2002.

- SANTOS, A. Á. B.; TORRES, E. A.; PEREIRA, P. A. de P. Experimental investigation of the natural gas confined flames using the oec. *Energy*, Elsevier, v. 36, n. 3, p. 1527–1534, 2011.
- SANTOS, A. I. B. Investigação do uso da combustão enriquecida com oxigênio em chamas confinadas de gás natural, tese de doutorado. *Universidade Federal da Bahia*, 2010.
- SARKAR, P. A brief history of cellular automata. *ACM Computing Surveys (CSUR)*, ACM, v. 32, n. 1, p. 80–107, 2000.
- SOUZA, J.; PEREIRA, H.; SANTOS, A.; SENNA, V.; MORET, M. A new proposal for analyzing combustion process stability based on the hamming distance. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, Elsevier, v. 413, p. 301–306, 2014.
- SOUZA, J.; SANTOS, A.; GUARIEIRO, L.; MORET, M. Fractal aspects in enriched combustion. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, Elsevier, v. 434, p. 268–272, 2015.
- TELESCA, L.; HATTORI, K. Non-uniform scaling behavior in ultra-low-frequency (ulf) earthquake-related geomagnetic signals. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, Elsevier, v. 384, n. 2, p. 522–528, 2007.
- TELESCA, L.; LASAPONARA, R. Quantifying intra-annual persistent behaviour in spot-vegetation ndvi data for mediterranean ecosystems of southern italy. *Remote Sensing of Environment*, Elsevier, v. 101, n. 1, p. 95–103, 2006.
- WANG, L.; ENDRUD, N.; TURNS, S.; D’AGOSTINI, M.; SLAVEJKOV, A. A study of the influence of oxygen index on soot, radiation, and emission characteristics of turbulent jet flames. *Combustion science and technology*, Taylor & Francis, v. 174, n. 8, p. 45–72, 2002.
- WEGNER, P. A technique for counting ones in a binary computer. *Communications of the ACM*, ACM, v. 3, n. 5, p. 322, 1960.
- WEIMAR, J. R. *Simulation with cellular automata*. [S.l.]: Logos-Verlag Berlin, 1997.
- WELLER, H. G.; TABOR, G.; JASAK, H.; FUREBY, C. A tensorial approach to computational continuum mechanics using object-oriented techniques. *Computers in physics*, AIP Publishing, v. 12, n. 6, p. 620–631, 1998.
- WOLFRAM, S. *A new kind of science*. [S.l.]: Wolfram media Champaign, 2002.
- ZEBENDE, G.; PEREIRA, M.; JR, E. N.; MORET, M. Universal persistence in astrophysical sources. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, Elsevier, v. 349, n. 3, p. 452–458, 2005.

ZEBENDE, G. et al. Studying long-range correlations in a liquid–vapor-phase transition. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, Elsevier, v. 342, n. 1, p. 322–328, 2004.

Eficiência em processos de combustão: Novos métodos de análise na formação de fuligem

Jefferson Willes Gomes de Souza

Salvador, Dezembro de 2016.