Universidade do Estado do Rio de Janeiro

Centro de Tecnologia e Ciências

Instituto de Química

Vinicius Gabriel Macedo Cruz

Modelagem e simulação da decomposição térmica do óleo mineral isolante aplicadas à classificação de defeitos em transformadores de potência

Rio de Janeiro

2015

Vinicius Gabriel Macedo Cruz

Modelagem e simulação da decomposição térmica do óleo mineral isolante aplicadas à classificação de defeitos em transformadores de potência

Dissertação apresentada, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Processos Químicos, Petróleo e Meio Ambiente.

Orientadores: Prof. Dr. André Luiz Hemerly Costa
Prof. Dr. Márcio Luis Lyra Paredes

Rio de Janeiro

2015

CATALOGAÇÃO NA FONTE
UERJ/REDE SIRIUS/CTC/Q

C957 Cruz, Vinicius Gabriel Macedo.
Modelagem e simulação da decomposição térmica do óleo mineral isolante aplicadas à classificação de defeitos em transformadores de potência. / Vinicius Gabriel Macedo Cruz. - 2015.
83 f.

Orientador: André Luiz Hemerly Costa
Orientador: Márcio Luis Lyra Paredes.
Dissertação (mestrado) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Instituto de Química.

1. Gases - Análise - Teses. 2. Tranformadores de potência – Teses. 3. Óleo mineral – Teses. I. Costa, André Luiz Hemerly. II. Paredes, Márcio Luis Lyra. III. Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Instituto de Química. IV. Título.

CDU 533.1

Autorizo, apenas para fins acadêmicos e científicos, a reprodução total ou parcial desta tese.

_____ _____

Assinatura Data

Vinicius Gabriel Macedo Cruz

Modelagem e simulação da decomposição térmica do óleo mineral isolante aplicadas à classificação de defeitos em transformadores de potência

Dissertação apresentada, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Processos Químicos, Petróleo e Meio Ambiente.

Aprovada em 20 de fevereiro de 2015.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. André Luiz Hemerly Costa (orientador)
Instituto de Química – UERJ

Prof. Dr. Márcio Luis Lyra Paredes (orientador)
Instituto de Química–UERJ

Dr. Carlos Julio Dupont
Centro de Pesquisas de Energia Elétrica

Prof. Dr. Eduardo Rocha de Almeida Lima
Instituto de Química – UERJ

Prof. Dr. Víctor Rolando Ruiz Ahón
Universidade Federal Fluminense

Rio de Janeiro

2015

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela oportunidade e pelo privilégio de chegar até aqui.

À minha querida esposa, Caroline Cruz, que pagou o preço pela formação em comum, assumindo, tantas vezes, os papéis de consultora, audiência, aluna, professora e confidente. Obrigado pelo amor, pela paciência e pelo incentivo.

Aos meus pais e aos meus irmãos, por saberem compreender a minha ausência, já tão frequente durante a graduação e ainda mais frequente durante o mestrado.

Aos meus professores e orientadores, André Luiz Hemerly Costa e Márcio Luis Lyra Paredes, pela amizade, pelo exemplo de seriedade e respeito e, especialmente, pela dedicação em compartilhar os caminhos da Ciência.

À Furnas, por encorajar o desenvolvimento destetrabalho, fornecendo os meiospara o meu aprimoramento científico.

RESUMO

CRUZ, Vinicius Gabriel Macedo. *Modelagem e simulação da decomposição térmica do óleo mineral isolanteaplicadas à classificação de defeitos em transformadores de potência.*2015. 86f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Instituto de Química, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.

A análise de gases dissolvidos tem sido aplicada há décadas como a principal técnica de manutenção preditiva para diagnosticar defeitos incipientes em transformadores de potência, tendo em vista que a decomposição do óleo mineral isolante produz gases que permanecem dissolvidos na fase líquida. Entretanto, apesar da importância desta técnica, os métodos de diagnóstico mais conhecidos são baseados em constatações de modelos termodinâmicos e composicionais simplificados para a decomposição térmica do óleo mineral isolante, em conjunto com dados empíricos. Os resultados de simulação obtidos a partir desses modelos não reproduzem satisfatoriamente os dados empíricos. Este trabalho propõe um modelo termodinâmico flexível aprimorado para mimetizar o efeito da cinética de formação de sólidos como restrição ao equilíbrio e seleciona, entre quatro modelos composicionais, aquele que apresenta o melhor desempenho na simulação da decomposição térmica do óleo mineral isolante. Os resultados de simulação obtidos a partir do modelo proposto apresentaram uma melhor adequação a dados empíricos do que aqueles obtidos a partir dos modelos clássicos. O modelo propostofoi, ainda, aplicado ao desenvolvimento de um método de diagnóstico com base fenomenológica.Os desempenhos desta nova proposta fenomenológica e de métodos clássicos de diagnóstico por análise de gases dissolvidos foram comparados e discutidos; o método proposto alcançou desempenho superior a vários métodos usualmente empregados nessa área do conhecimento. E, ainda, um procedimento geral para a aplicação do novo método de diagnóstico é descrito.

Palavras-chave: Análise de gases dissolvidos.Diagnóstico de defeitos.Óleo mineral isolante. Decomposição térmica. Transformador de potência.

ABSTRACT

CRUZ, Vinicius Gabriel Macedo. *Modeling and simulation of the mineral insulating oil thermal decomposition applied to faults classification in power transformers.* 2015. 86f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Instituto de Química, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.

The dissolved gas analysis has been applied for decades as the main predictive maintenance technique for diagnosing incipient faults in power transformers since the decomposition of the mineral insulating oil produces gases that remain dissolved in the liquid phase. Nevertheless, the most known diagnostic methods are based on findings of simplified thermodynamic and compositional models for the thermal decomposition of mineral insulating oil, in addition to empirical data. The simulations results obtained from these models do not satisfactorily reproduce the empirical data. This work proposes a flexible thermodynamic model enhanced to mimic the kinetic effect of solid formation as a restriction to equilibrium and selects, among four compositional models, the one offering the best performance on the simulation of the thermal decomposition of mineral insulating oil. The simulation results obtained from the proposed model showed better adequacy to reported data than the results obtained from the classical models. The proposed model was also applied in the development of a diagnostic method with a phenomenological basis. The performances of this new phenomenological proposition and of classical dissolved gas analysis diagnostic methods are compared and discussed; the proposed method achieved a performance superior to several methods usually employed in this area of knowledge.Also, a general procedure for the application of the new diagnostic method is described.

Keywords: Dissolved gas analysis. Fault diagnosis. Mineral insulating oil.Thermal decomposition.Power transformer.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1- Padrões de gases dissolvidos associados aos tipos de defeitos incipientes..... 26
Figura 2- Estrutura do algoritmo de simulação para o cenário com quantidade irrestrita de C(s)..... 43
Figura 3- Estrutura do algoritmo de simulação para o cenário sem C(s)..... 44
Figura 4- Estrutura do algoritmo de simulação para o cenário com quantidade especificada de C(s)..... 45
Figura 5- Estruturas dos algoritmos de otimização..... 47
Figura 6- Frações molares normalizadas do Sistema 1 em equilíbrio em função da temperatura de equilíbrio em dois cenários de quantidade de C(s)..... 51
Figura 7- Frações molares normalizadas do Sistema 2 em equilíbrio em função da temperatura de equilíbrio em dois cenários de quantidade de C(s)..... 51
Figura 8- Frações molares normalizadas do Sistema 3 em equilíbrio em função da temperatura de equilíbrio em dois cenários de quantidade de C(s)..... 52
Figura 9- Frações molares normalizadas do Sistema 4 em equilíbrio em função da temperatura de equilíbrio em dois cenários de quantidade de C(s)..... 52
Figura 10- Frações molares normalizadas do Sistema 1 em equilíbrio em função da fração da quantidade irrestrita de equilíbrio de C(s) a temperaturas constantes..... 55
Figura 11- Frações molares normalizadas do Sistema 2 em equilíbrio em função da fração da quantidade irrestrita de equilíbrio de C(s) a temperaturas constantes..... 56
Figura 12- Frações molares normalizadas do Sistema 3 em equilíbrio em função da fração da quantidade irrestrita de equilíbrio de C(s) a temperaturas constantes..... 57
Figura 13- Frações molares normalizadas do Sistema 4 em equilíbrio em função da fração da quantidade irrestrita de equilíbrio de C(s) a temperaturas constantes..... 58
Figura 14- Fatores de compressibilidade do Sistema 3 em função da temperatura de equilíbrio a frações constantes da quantidade irrestrita de equilíbrio de C(s)..... 62
Figura 15- Frações molares preditas versus frações molares relatadas..... 64
Figura 16- Erros relativos médios em função do percentual da quantidade irrestrita de equilíbrio de C(s) a temperatura constante..... 67
Figura 17- Mapa de defeitos incipientes sem subdivisões..... 69
Figura 18- Mapa de defeitos incipientes subdividido em três regiões de defeitos..... 70
Figura 19- Mapa de defeitos incipientes subdividido em cinco regiões de defeitos..... 71

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Componentes representativos das famílias de hidrocarbonetos do óleo mineral isolante..... 30
Tabela 2- Medidas estatísticas descritivas da distribuição dos erros relativos médios ótimos referentes ao cenário com quantidade irrestrita de C(s)..... 60
Tabela 3- Medidas estatísticas descritivas da distribuição dos erros relativos médios referentes ao cenário sem C(s)..... 60
Tabela 4- Medidas estatísticas descritivas da distribuição dos erros relativos médios referentes ao cenário com quantidade otimizada de C(s)..... 60
Tabela 5- Desempenho dos métodos na classificação em três tipos de defeitos..... 72
Tabela 6- Desempenho dos métodos na classificação em cinco tipos de defeitos..... 72

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AGD	Análise de gases dissolvidos
CR	Componente representativo
D1	Descargas elétricas de baixa energia
D2	Descargas elétricas de alta energia
DE	Descargas elétricas
DP	Descargas parciais
DT	Defeitos térmicos
IEC	*International Electrotechnical Commission*
IEEE	*Institute of Electrical and Electronics Engineers*
OMI	Óleo mineral isolante
PD	Produto de decomposição de um componente representativo
T1/T2	Defeitos térmicos de baixa/média temperatura
T3	Defeitos térmicos de alta temperatura

LISTA DE SÍMBOLOS

- Letras latinas:

a	Quantidade de átomos de cada elemento em cada molécula do sistema
B^0	Função da correlação generalizada para o segundo coeficiente do virial
B^1	Função da correlação generalizada para o segundo coeficiente do virial
c	Concentração volumétrica
C	Fração da quantidade irrestrita de equilíbrio de C(s)
C_P	Capacidade calorífica molar àpressão constante
ERM	Erro relativo médio
f	Fugacidade
g	Representação de uma função genérica
G	Energia de Gibbs molar
H	Entalpia molar
L	Função Lagrangeana
n	Quantidade de matéria
P	Pressão
R	Constante universal dos gases
$SQRR$	Somatório dos quadrados dos resíduos relativos
T	Temperatura
V	Volume molar
y	Fração molar
Z	Fator de compressibilidade
Z^0	Função da correlação generalizada para o fator de compressibilidade
Z^1	Função da correlação generalizada para o fator de compressibilidade

- Letras gregas:

λ	Multiplicador de Lagrange
μ	Potencial químico
ω	Fator acêntrico de Pitzer

- Subscritos:

c	Indica um parâmetro crítico
C	Indica um valor referente ao elemento carbono
f	Indica uma propriedade de formação
h	Indica uma espécie pesada
H	Indica um valor referente ao elemento hidrogênio
i	Índice de espécies (aplica-se a todas as espécies)
IEC	Indica um valor referente ao banco de dados da IEC
j	Índice de espécies (aplica-se a todas as espécies diferentes de *i* ou *k*)
k	Índice de espécies (aplica-se a todas asespécies, exceto C(s))
l	Índice de espécies (aplica-se somente a H_2, CH_4, C_2H_6, C_2H_4 e C_2H_2)
m	Índice de componentes representativos do Sistema 4
otm	Indica um valor ótimo
P	Indica uma condição à pressão constante
pc	Indica um parâmetro pseudocrítico de mistura
pr	Indica um parâmetro pseudorreduzido de mistura
pred	Indica um valor predito através de simulação
r	Indica um parâmetro reduzido
R	Indica um valor ao qual se impôs uma restrição
T	Indica uma condição à temperatura constante
t	Indica um valor total

- Sobrescritos:

°	Indica o estado padrão de uma substância
0	Indica uma quantidade inicial

- Notas:

$\underline{\ }$	Barra simples sob um símbolo: representação de um vetor
$\underline{\underline{\ }}$	Barra dupla sob um símbolo: representação de uma matriz
$\underline{\underline{\underline{\ }}}$	Barra tripla sob um símbolo: representação de uma hipermatriz

^	Representa uma propriedade de uma espécie em mistura
Δ	Operador diferença

SUMÁRIO

	INTRODUÇÃO	14
1	**REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**	17
1.1	**Transformadores de Potência**	17
1.2	**Modelos de Decomposição Térmica do OMI**	18
1.2.1	Modelo de Halstead	19
1.2.2	Modelo de Shirai *et alii*	20
1.3	**Métodos de Diagnóstico**	20
1.3.1	Métodos clássicos	21
1.3.2	Métodos inteligentes	23
1.4	**Padrões Típicos de Defeitos Incipientes**	24
2	**MODELAGEM DA DECOMPOSIÇÃO TÉRMICA DO OMI**	27
2.1	**Modelagem Composicional**	27
2.1.1	Sistema 1	28
2.1.2	Sistema 2	28
2.1.3	Sistema 3	28
2.1.4	Sistema 4	29
2.2	**Modelagem Termodinâmica**	31
2.2.1	Modelo de equilíbrio irrestrito	32
2.2.2	Modelo de equilíbrio com especificação da quantidade de C(s)	35
2.2.3	Avaliação da validade da hipótese de gás ideal	38
3	**SIMULAÇÃO E OTIMIZAÇÃO NUMÉRICAS**	41
3.1	**Simulação Numérica**	41
3.1.1	Cenário com quantidade irrestrita de C(s)	42
3.1.2	Cenário sem C(s)	43
3.1.3	Cenário com quantidade especificada de C(s)	44
3.2	**Otimização Numérica**	46
4	**DESENVOLVIMENTO DO MÉTODO DE DIAGNÓSTICO T-C**	48
4.1	**Mapas de Defeitos**	48
4.2	**Análise de Desempenho do Método T-C**	49
5	**RESULTADOS E DISCUSSÃO**	50
5.1	**Resultados de Simulação e Otimização**	50

5.1.1 Frações molares de equilíbrio em função da temperatura 50
5.1.2 Frações molares de equilíbrio em função da quantidade de C(s) 54
5.1.3 Avaliação do desempenho dos modelos de decomposição térmica do OMI 62
5.1.4 Avaliação da validade da hipótese de gás ideal 65
5.1.5 Comparação entre frações molares preditas e frações molares relatadas 66
5.1.6 Avaliação de resultados do problema de otimização bidimensional 69
5.2 **Método de Diagnóstico T-C** 71
5.2.1 Mapas de defeitos 71
5.2.2 Análise de desempenho do método T-C 74
CONCLUSÕES 78
SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS 80
REFERÊNCIAS 81
APÊNDICE A – Procedimento de aplicação do método T-C 84
APÊNDICE B – Produção científica 86

INTRODUÇÃO

O óleo mineral isolante (OMI) é um derivado do petróleo amplamente empregado em transformadores de potência de alta tensão, especialmente nos equipamentos dos sistemas de transmissão de energia elétrica.

Devido à relevância dos transformadores de potência para o sistema elétrico e aos riscos e altos custos envolvidos em seu mau funcionamento, técnicas de manutenção preditiva vêm sendo desenvolvidas e aperfeiçoadas ao longo dos últimos 80 anos. (1) Estas técnicas objetivam detectar defeitos em transformadores de potência.

A mais conhecida dentre estas técnicas de manutenção preditiva é a análise de gases dissolvidos (AGD). A técnica de AGD consiste em coletar amostras de OMI de equipamentos em operação e quantificar as concentrações de alguns compostos leves (gases) específicos que são produzidos pelo craqueamento das moléculas de OMI e permanecem dissolvidos na fase líquida. O conjunto formado pelas concentrações destes compostos leves é, então, utilizado para verificar a existência de um defeito e, ainda, para classificar esse defeito através de algoritmos semi-empíricos, conhecidos como métodos de diagnóstico. Essa correlação entre concentrações de gases dissolvidos em OMI e tipos de defeitos em transformadores é possível,pois a energia dissipada para o óleo na vizinhança de uma região defeituosa implica em uma temperatura local e determina, portanto, quais produtos serão predominantes no equilíbrio da reação de craqueamento consequente. (2-5) A sensibilidade da análise de gases dissolvidos permite identificar defeitos ainda incipientes, dificilmente detectáveis através de outras técnicas preditivas.

A eficácia da análise de gases dissolvidos é, reconhecidamente, uma questão bem estabelecida e consolidada. Entretanto, apesar da importância desta técnica, métodos de diagnóstico por AGD amplamente conhecidos e aplicados, como os métodos clássicos da *International Electrotechnical Commission* (*IEC*) e do *Institute of Electrical and Electronics Engineers*(*IEEE*), (4,5) estão teoricamente baseados nos modelos composicional e termodinâmico simplistas de Halstead para a decomposição térmica do OMI, além de dados empíricos. (6)

Recentemente, a maior parte dos esforços de pesquisa em AGD tem sido devotada ao desenvolvimento e ao aperfeiçoamento dos chamados métodos de diagnóstico inteligentes e numerosos artigos sobre o tema têm sido publicados ao longo dos anos. (7-16)Osmétodos inteligentesintentamaprimorar o desempenho dos métodos de diagnóstico clássicos,

sejacombinando as respostas de dois ou mais métodos clássicos ou estabelecendo novos critérios de diagnóstico baseados em dados empíricos e/ou conhecimento tácito do especialista em manutenção. Também recentemente, novos métodos de diagnóstico foram desenvolvidos a partir da proposta da avaliação de novos conjuntos de razões ou frações normalizadas de gases dissolvidos.(17,18)Portanto, o modelo de Halstead e dados empíricos continuam sendo a base fundamental da AGD, mesmo para os métodos de diagnóstico inteligentes e mais recentes. Nenhum esforço recente para o desenvolvimento de modelos termodinâmicos e composicionais mais adequados para representar a decomposição térmica do OMI pôde ser identificado na literatura técnica.

O presente trabalho objetiva propor uma modelagem termodinâmica mais adequada, além de propor e avaliar quatro modelos composicionais para a decomposição térmica do OMI, tendo em vista que os modelos nos quais os métodos de diagnóstico clássicos se baseiam não são capazes de reproduzir satisfatoriamente os dados empíricos. Além disso, apresenta-se um novo método de diagnóstico por AGD, com base fenomenológica, desenvolvido a partir dos modelos termodinâmico e composicional propostos. Por fim, o desempenho do novo método de diagnóstico é avaliado e uma comparação com os métodos de diagnóstico clássicos da *IEC* e do*IEEE* é conduzida.

Esta dissertação está estruturada conforme descrito nos parágrafos seguintes.

O Capítulo 1 apresenta uma revisão bibliográfica que abrange as principais características dos transformadores de potência, os modelos de decomposição do OMI propostos na literatura, os principais métodos de diagnóstico de defeitos por AGD e, ainda, as composições de gases dissolvidos características de cada defeito incipiente. Neste capítulo, são fornecidasinformações básicas sobre o tema da pesquisa, a fim de facilitar a compreensão dos capítulos seguintes.

O Capítulo 2 apresenta as propostas de modelagem, desenvolvidas neste trabalho,para a decomposição térmica do OMI. São apresentadas propostas de modelos composicionais e de modelos termodinâmicos alternativos àqueles propostos na literatura. Este capítulo explicita toda a base fundamental da modelagem, incluindo as equações que serão utilizadas nas simulações de equilíbrio químico.

O Capítulo 3apresenta a metodologia adotada nas simulações de equilíbrio químico, visando prever as composições de equilíbrio do sistema resultante da decomposição térmica do OMI. Apresenta-se, também, a metodologia adotada na solução de problemas de otimização, cujos resultados serão utilizadosna avaliação da adequabilidade da modelagem proposta e no desenvolvimento de um método de diagnóstico com base fenomenológica.

O Capítulo 4 apresenta as metodologias adotadasno processo de desenvolvimento e de avaliação de desempenho do método T-C, método de diagnóstico proposto neste trabalho.

O Capítulo 5apresenta os resultados obtidos nas simulações de equilíbrio químico, nos problemas de otimização e no desenvolvimento do método T-C. Os resultados de simulação tornam possível uma avaliação qualitativa do comportamento dos diferentes modelos composicionais e termodinâmicos propostos. Os resultados dos problemas de otimização fornecem avalições quantitativas do potencial de cada modelo em representar a decomposição térmica do OMI. Os resultados obtidos durante o desenvolvimento e a avaliação de desempenho do método T-C levam a uma discussão sobre a viabilidade da proposta, onde são avaliadas suas principais características, em comparação aos métodos de diagnóstico existentes na literatura.

Finalmente, apresentam-se as conclusões da pesquisa, sugestões para trabalhos futuros, referências bibliográficas e apêndices. O APÊNDICE Aapresenta o procedimento geral para a aplicação do método T-C.OAPÊNDICE Bfaz referência aos dois artigos científicos originados a partir do presente trabalho de pesquisa: o primeiro artigo apresenta as modelagens composicional e termodinâmica propostas para a decomposição térmica do OMI e o segundo artigo apresenta o método T-C.

1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo, são abordados brevemente as características gerais dos transformadores de potência e o histórico de evolução da tecnologia, as funções do óleo mineral isolante nos transformadores, os modelos de decomposição térmica propostos na literatura, os algoritmos que relacionam a decomposição térmica do óleo à existência de determinado tipo de defeito incipiente no equipamento e, finalmente, as composições de gases dissolvidos típicas de cada defeito.

1.1 Transformadores de Potência

O transformador de potência é um equipamento essencial aos sistemas de transmissão e distribuição de energia elétrica. Sua função é reduzir a corrente elétrica do sistema, consequentemente elevando a tensão, ou elevar a corrente elétrica do sistema, consequentemente reduzindo a tensão.

Oprincipal objetivo de um transformador da rede de transmissão de energia elétrica é o de reduzir as perdasde potência por efeito Joule, através da redução da corrente elétrica do sistema, (19) tendo em vista que tais perdas são proporcionais ao quadrado da corrente.A não existência dos transformadores implicaria na inviabilidade econômica da transmissãode energia elétrica através de longas distâncias, o que, por sua vez, resultaria na obrigatoriedade de minimização da distância entre os pontos de geração e de consumo, limitando a aplicação prática da eletricidade. (20)

Assim como ocorre com outros dispositivos, não há consenso geral sobre o mérito da invenção do transformador. A dificuldade recai sobre o fato de que, na verdade, o transformador foi desenvolvido a partir das contribuições de diversos pesquisadores em um intervalo de cerca de 50 anos, desde a descoberta da indução eletromagnética, princípio de funcionamento do transformador, em 1831 por Michael Faraday até a construção do primeiro dispositivo com o nome de transformador, em 1885 por Ottó Titusz Bláthy. (21)

Ainda que os transformadores da virada do século passado já apresentassem as mesmas características essenciais observada nos equipamentos atuais, sua tecnologia evoluiu bastante. Os transformadores atuais operam com potências até 500 vezes maiores e com

tensões até 15 vezes maiores, em comparação aos seus antecessores da virada do século passado. Além disso, o peso do equipamento por unidade de potência foi reduzido em cerca de 10 vezes e sua eficiência costuma ser superior a 99%. (20)

Dois aspectos fundamentais no projeto de um transformador são a isolação elétrica e a refrigeração de sua parte ativa, composta pelas bobinas de cobre e núcleo de aço-silício. Estes dois aspectos estão intimamente relacionados, pois o calor dissipado pela parte ativa do equipamento determina a vida útil da isolação, porém a própria isolação atua na dissipação de calor. A vida útil da isolação sólida, por sua vez, é fator limitante e determina a vida útil do próprio transformador. Os primeiros transformadores eram isolados (e refrigerados) somente a ar e o algodão seco que envolvia os condutores servia mais para mantê-los separados do que como isolação sólida propriamente dita.(20) No entanto, em pouco tempo o ar foi substituído por óleo isolante e o algodão, por papel isolante.O primeiro transformador isolado a óleo, visando melhor isolação elétrica e melhor dissipação de calor, foi construído em 1887 por Elihu Thomson. (21) Até hoje, papel isolante impregnado com óleo mineral isolante é o padrão de isolação para transformadores de potência.

O transformadorde alta tensão moderno típico é selado e tem sua parte ativa imersa em óleo mineral isolante. Cabos de alta e de baixa tensões entram e saem do transformador através de buchas de cerâmica. O óleo isolante refrigera o equipamento através da circulação, por convecção natural ou forçada, em radiadores externos que podem, também, estar acoplados a ventiladores. (20)Os prejuízos decorrentes da falha de um transformador da rede de transmissão de energia elétrica são normalmente contabilizados em milhões de reais, incluindo os custos de reparo ou substituição e a perda de receita pela indisponibilidade do equipamento.

1.2 Modelos de Decomposição Térmica doOMI

O óleo mineral isolante é um derivado do petróleo e suas principais funções em um transformador são a isolação elétrica e a refrigeração da parte ativa, conforme já mencionado. Adicionalmente, uma função secundária do óleo mineral isolante diz respeito à sua capacidade de prover informações sobre a condição do equipamento. Neste sentido, a análise de gases dissolvidos procura explorar a relação entre a decomposição do óleo mineral isolante

e a existência de determinados tipos de defeitos incipientes no transformador, justificando-se, portanto, a importância dos modelos de decomposição do óleo mineral isolante.

Os modelos de decomposição térmica do óleo mineral isolante permitem prever, através de simulações de equilíbrio químico, a relação entre a temperaturae a composição dos gases dissolvidos resultantes da reação de craqueamento associada. Cada modelo de decomposição térmica consiste, na verdade, de uma associação entre um modelo composicional, que define as espécies químicas representativas do óleo isolante decomposto, e um modelo termodinâmico baseado na minimização da energia de Gibbs do sistema em equilíbrio, que resulta em um sistema de equações.

Esta seção apresenta os modelos de decomposição térmica do óleo mineral isolante descritos na literatura técnica.

1.2.1 Modelo de Halstead

Em 1973, Halstead (6) estabelece um modelo simples, em duas etapas, para a decomposição térmica do OMI: i) em uma primeira etapa, considera-se que as moléculas do óleo são completamente consumidas na reação e se degradam exclusivamente em seis produtos, a saber: H_2, CH_4, C_2H_6, C_2H_4 e C_2H_2, os compostos leves de interesse para os métodos de diagnóstico, além de C(s) (carbono grafite);ii) em uma segunda etapa, são calculadas as pressões parciais de equilíbrio, em diferentes temperaturas, para o sistema formado por estas seis espécies. Os resultados são apresentados em um gráfico onde os logaritmos das pressões parciais estão plotados em função da temperatura de equilíbrio. (6) Ainda que tendências válidas possam ser obtidas deste gráfico logarítmico, os valores absolutos de pressões parciais, quando convertidos a frações molares, desviam consideravelmente dos dados empíricos de gases dissolvidos apresentados pelo *Technical Committee 10* da *IEC*. (22) As predições do modelo apresentam, virtualmente,apenas H_2, CH_4 e C(s) em equilíbrio para qualquer temperatura, enquanto os dados da *IEC* podem apresentar quantidades significativas de todos os gases de interesse, a depender do tipo de defeito incipiente. Provavelmente, estes desvios estão relacionados à hipótese admitida de equilíbrio termodinâmico do óleo isolante degradado, quando, na verdade, este equilíbrio não é plenamente alcançado. (4,5,24)

1.2.2 Modelo de Shirai *et alii*

Além do trabalho de Halstead, a literatura técnica apresenta outro esforço visando o desenvolvimento de um modelo termodinâmico para a decomposição térmica do OMI. Em 1977,Shirai, Shimoji e Ishii (23) propuseram um modelo em que todos os componentes do OMI são representados pelo n-eicosano ($C_{20}H_{42}$),o qual se decompõe parcialmente em H_2, CH_4, C_2H_6, C_2H_4, C_2H_2, os compostos leves de interesse, além de C_3H_8 e C_3H_6. Resultados de simulações de equilíbrio químico são apresentados para o sistema contendo tais espécies em um gráfico de quantidade de matéria em função da temperatura de equilíbrio. (23)

Os autores observaram que, quando a espécie C(s) está presente no sistema em equilíbrio, os resultados de simulação desviam consideravelmente dos dados empíricos. Por outro lado, a supressão da espécie C(s) leva a resultados mais coerentes.Embora os resultados de simulação de Shirai *et al.* pareçam mais adequados do que os de Halsteadquando comparados aos dados da*IEC*, a formação de C(s) é uma observação empírica importante (4,5) e não deve ser negligenciada.

Conforme anteriormente mencionado, os métodos de diagnóstico clássicos são baseados, principalmente, nas conclusões de Halstead. Apesar do modelo de Shirai *et al.* fornecer resultados de simulação mais coerentes com os dados empíricos, nenhuma referênciaa tal estudo foi encontrada na literatura técnica para AGDconsultada.

1.3 Métodos de Diagnóstico

Os chamados métodos de diagnóstico são algoritmos utilizados na AGD que objetivam identificar a existênciade defeitos em transformadores e, ainda, classificar tais defeitos por tipo e criticidade. Os dados de entrada dos métodos de diagnóstico são as concentrações volumétricas dos gases dissolvidos em OMI.Os dados de saída dos métodos são informações que podem ser organizadas em dois níveis: i) em um primeiro nível o dado de saída apresenta a condição do equipamento, isto é, normal ou defeituoso; ii) caso defeituoso, o dado de saída classifica o defeito, em um segundo nível, quanto ao tipo, subtipo e criticidade, quando aplicável.

Esta seção sintetiza as características dos métodos de diagnóstico descritos nas principais normas técnicas sobre o tema, os métodos clássicos. Apresenta-se, também, uma breve explanação sobre os métodos de diagnóstico inteligentes, concebidos para alcançarem maiores desempenhos em comparaçãoaos métodos clássicos.

1.3.1 Métodos clássicos

Atualmente, os métodos de diagnóstico mais utilizados por profissionais da engenharia de manutenção, aqui denominados métodos de diagnóstico clássicos, estão descritos nas normas IEC 60599 (4) e IEEE C57.104 (5), são eles os métodos da *IEC*, de Duval, de Rogers e de Doernenburg. À exceção do método de Duval, todos os métodos clássicosconvertem as concentrações volumétricas de entrada em razões entre as concentrações de gases específicos. Tais métodos de diagnósticos serão aqui referidos como métodos de razões.

Conforme já mencionado, os algoritmos dos métodos são baseados, principalmente, nas observações do estudo termodinâmico simplista sobre a decomposição doOMI publicado por Halstead em 1973,alémde dados empíricos obtidos de equipamentoscom defeitos ativos. Tais dados empíricos consistem de conjuntos de concentrações volumétricas de gases dissolvidos em amostras de OMI associados às classificações dos defeitos existentes nos equipamentos correspondentes. As classificações dos defeitos, por sua vez, são executadas por profissionais especialistas, através de constatações obtidas em inspeções visuais dos equipamentos em questão.

É importante observar que os dados empíricos citados não foram obtidos através de experimentos controlados, especialmente planejados para este propósito. Na verdade, as concentrações de gases dissolvidos foram obtidas de equipamentos em serviço e, portanto, estão sujeitas a erros intrínsecos relacionados às características operacionais dos equipamentos e à natureza dos defeitos, tais como a não homogeneidade do volume de OMI, o acúmulo de gases dissolvidos ao longo do tempo e a possibilidade de ocorrência simultânea de múltiplos defeitos incipientes. Tais fatos, associados ao fator subjetivo atribuído ao procedimento de classificação de defeitos por inspeção visual, contribuem para o aumento das incertezas nestes dados.

As principais características de cada método de diagnóstico clássico estão descritas nos parágrafos seguintes.

O método de diagnóstico da *IEC* é baseado na análise dos valores de três razões de concentrações volumétricas de gases dissolvidos, a saber: C_2H_2/C_2H_4, CH_4/H_2 e C_2H_4/C_2H_6. O procedimento recomendado para a aplicação deste método pode ser sintetizado como segue: i) verificar se as concentrações de gases dissolvidos ou se as taxas de variação das concentrações de gases dissolvidos estão acima dos valores típicos,ii) se a concentração ou se a taxa de variação da concentração de pelo menos um gás estiver acima do valor típico, calcular as razões mencionadas e iii) classificar o defeito por comparação entre os valores calculados para as razões e os intervalos atribuídos pelo método às diferentes classes de defeitos. As classificações de defeitos possíveis neste método são sete: i) descargas parciais, ii) descargas elétricas de baixa energia, iii) descargas elétricas de alta energia, iv) defeito térmico com temperatura inferior a 300 ºC, v) defeito térmico com temperatura entre 300 ºC e 700 ºC, vi) defeito térmico com temperatura superior a 700 ºC e vii) defeito indeterminado. Existem, ainda, regiões de sobreposição entre os intervalos de valores das razões atribuídos às classes de defeitos, que podem, em casos específicos, impedir a classificação unívoca de defeitos. (4)

O método de diagnóstico de Duval consiste na análise das concentrações volumétricas normalizadas, em base percentual, de três gases dissolvidos, a saber: CH_4, C_2H_4 e C_2H_2. A classificação de defeitos se dá pela comparação entre os valores calculados das concentrações normalizadas e os limites recomendados pelo método. Alternativamente, estes limites podem ser utilizados para a delimitação de regiões de defeitos em um gráfico triangular cujos eixos são, justamente,as concentrações normalizadas mencionadas, em base percentual. Neste caso, a classificação de um defeito é determinada pela região de alocação do ponto correspondente, cujas coordenadas são as concentrações normalizadas calculadas. O gráfico triangular é conhecido como triângulo de Duval. As classificações de defeitos possíveis neste método são seis: i) descargas parciais, ii) descargas elétricas de baixa energia, iii) descargas elétricas de alta energia, iv) defeito térmico com temperatura inferior a 300 ºC, v) defeito térmico com temperatura entre 300 ºC e 700 ºC e vi) defeito térmico com temperatura superior a 700 ºC. Também, neste método, ocorre sobreposição entre diferentes regiões de defeitos. (4) É importante notar que, diferentemente dos demais métodos clássicos, o método de Duval não apresenta região de defeito indeterminado, isto é, qualquer ponto plotado no triângulo de Duval resultará na classificação do defeito entre as seis classes já mencionadas. Tendo em vista que as delimitações das regiões de defeitos provêm da análise de dados empíricos, seria natural esperar a ocorrência de regiões de indeterminação onde houvesse escassez destes dados.

O método de diagnóstico de Doernenburgtem como basea análise dos valores de quatro razões de concentrações volumétricas de gases dissolvidos, a saber: CH_4/H_2, C_2H_2/C_2H_4, C_2H_2/CH_4 e C_2H_6/C_2H_2. O procedimento recomendado para a aplicação deste método pode ser sintetizado como segue: i)comparar as concentrações dos gases dissolvidos com os limites estabelecidos pelo método, a fim de determinar a existência de defeito no equipamento; ii) verificar se a concentração de, pelo menos, um dos gases dissolvidos em cada razão excede o limite estabelecido, a fim de determinar a validade do procedimento de classificação de defeitos; iii) caso o procedimento seja válido, calcular as razões e iv) classificar o defeito por comparação entre os valores calculados para as razões e os intervalos atribuídos pelo método às diferentes classes de defeitos. As classificações de defeitos possíveis neste método são quatro: i) descargas parciais, ii) descargas elétricas, iii) defeito térmico e iv) defeito indeterminado. A classificação de defeitos pelo método de Doernenburg é sempre unívoca, tendo em vista que não há regiões de sobreposição entre os intervalos de valores das razões atribuídos às classes de defeitos. (5)

Finalmente, o método de diagnóstico de Rogers consiste na análise dos valores de três razões de concentrações volumétricas de gases dissolvidos, a saber: CH_4/H_2, C_2H_2/C_2H_4 e C_2H_4/C_2H_6. O procedimento de aplicação do método de Rogers é o mesmo que foi descrito no parágrafo anterior para o método de Doernenburg, inclusive os limites estabelecidos para as concentrações de gases dissolvidos. As classificações de defeitos possíveis neste método são seis: i) descargas parciais ou descargas elétricas de baixa energia, ii) descargas elétricas de alta energia, iii) defeito térmico de baixa temperatura, iv) defeito térmico com temperatura inferior a 700 ºC, v) defeito térmico com temperatura superior a 700 ºC e vi) defeito indeterminado. A classificação de defeitos pelo método de Rogers é, também, sempre unívoca. (5)

1.3.2 Métodos inteligentes

Conforme mencionado anteriormente, a maioria dos esforços recentes de pesquisa em AGD tem sido dedicada ao desenvolvimento e aperfeiçoamento demétodos de diagnóstico inteligentes e a literatura técnica está repleta de trabalhos sobre o tema desde a década de 1980 até a atualidade. (7-16)

Os métodosinteligentes prometem desempenho superioraos métodos clássicos na identificação e classificação de defeitos em transformadores e são, comumente, elaborados com o auxílio de técnicas de inteligência artificial, através de emulação do conhecimento do especialista em manutenção, combinaçãodas respostas de dois ou mais métodos clássicos e/ou estabelecimento de novas razões e limites de concentrações de gases dissolvidos a partir de novos bancos de dados empíricos. Desta forma, mesmo os métodos inteligentes estão, essencialmente, baseados no modelo simplista de Halstead, em dados empíricos e/ou em conhecimento tácito. Diversas técnicas do ramo de pesquisas em inteligência artificial vêm sendo aplicadas no desenvolvimento de métodos de diagnóstico inteligentes, incluindo sistemas especialistas (7,8,11), lógica *fuzzy* (9), redes neurais (10-12,15,16) e máquinas de vetores de suporte (13,14).

Apesar de, realmente, a literatura apresentar desempenhos significativamente superiores para os métodos inteligentes em comparação aos métodos clássicos, a forte dependência dos métodos inteligentes a dados empíricosenfraquece a hipótese de que estes altos desempenhos seriam também obtidos em classificações de defeitos com dados empíricos diferentes daqueles utilizados na elaboração dos métodos.

1.4 Padrões Típicos de Defeitos Incipientes

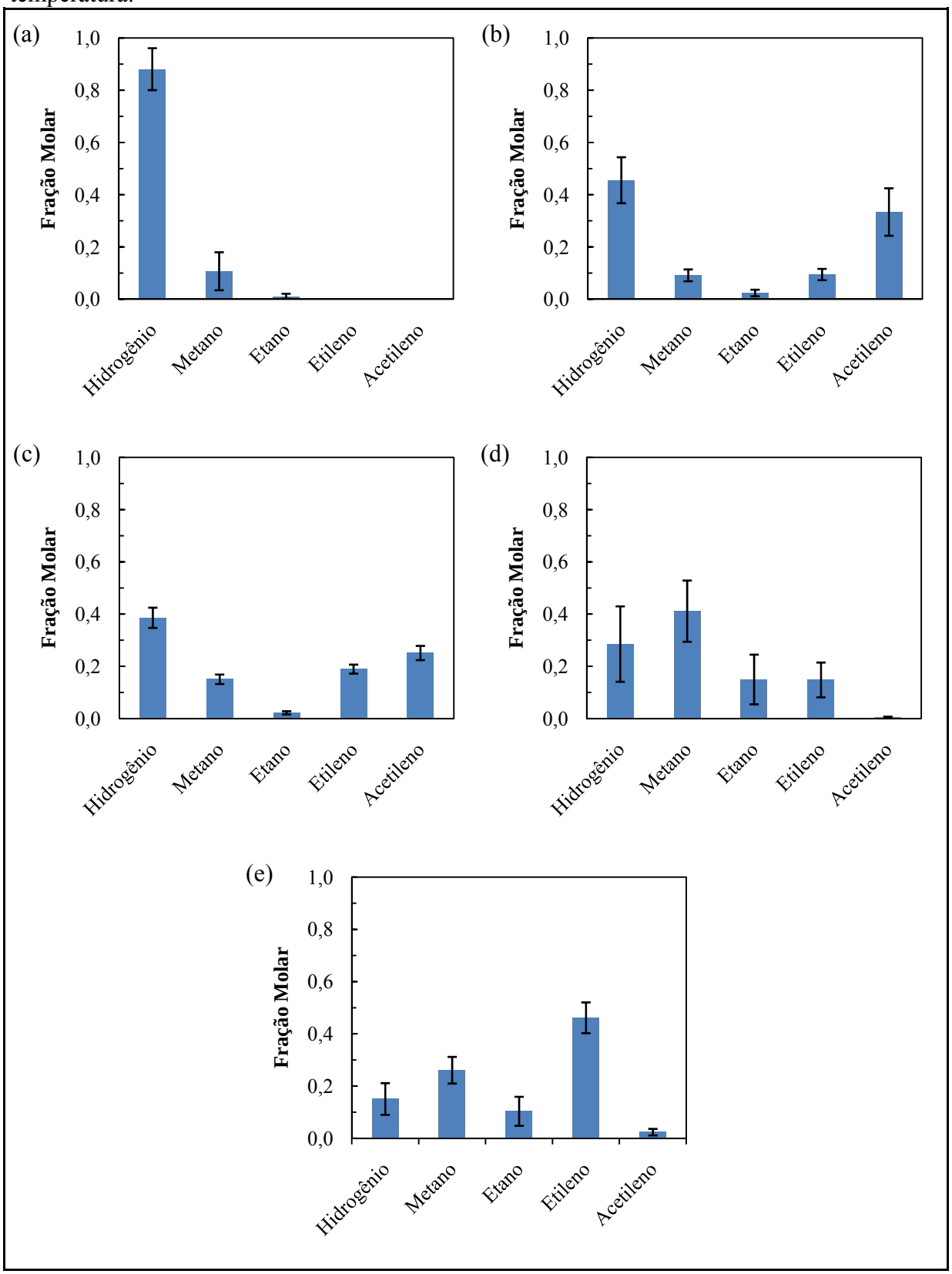
A **Erro! Fonte de referência não encontrada.**apresenta faixas típicas de frações molares de gases dissolvidos para cada tipo de defeito incipiente, com base no banco de dados da*IEC* (22), o mesmo banco de dados utilizado na elaboração da norma IEC 60599:1999 (4).

O banco de dados da*IEC* consiste de 117 conjuntos de concentrações volumétricas de gases dissolvidos em OMI de equipamentos elétricos defeituosos, cada um associado aum tipo de defeito; este, por sua vez,atribuído por especialistasatravés deinspeção visual interna no equipamento correspondente.Os tipos de defeitos podem serdivididos, de forma primária, em duas grandes classes: defeitos térmicos e defeitos elétricos. No banco de dados da *IEC*, a classe de defeitos térmicos foi subdividida em dois tipos de defeitos: defeitos térmicos de baixa/média temperatura e defeitos térmicos de alta temperatura. Já a classe de defeitos elétricos foi subdividida em três tipos de defeitos: descargas parciais, descargas elétricas de baixa energia e descargas elétricas de alta energia. Nesta dissertação, adotou-se esta mesma estrutura de classificação de defeitos incipientes.

Admitindo-se comportamento de gás ideal para a mistura, para cada caso relatado, as concentrações volumétricas dos gases dissolvidos de interesse para os métodos de diagnóstico, produzidos pela decomposição do OMI, isto é, C_2H_6, C_2H_4, C_2H_2, CH_4 e H_2, foram normalizadas a fim de se obter as respectivas frações molares. Então, os limites inferior e superior do intervalo de confiança, para um nível de confiança de 95%, foram calculados para todas as espécies de interesse em cada tipo de defeito incipiente e estão indicados nas barras de erros dos gráficos da **Erro! Fonte de referência não encontrada.**. Deste ponto em diante, os conjuntos de frações molares normalizadas de gases dissolvidos serão denominados padrões de gases dissolvidos. No presente trabalho, os padrões típicos de defeitos incipientes da **Erro! Fonte de referência não encontrada.** serão utilizados como referências na avaliação da representatividade dos modelos propostos.

Conforme discutido na Seção 1.3.1, dados empíricos como estes que originaram os padrões típicos de defeitos incipientes estão sujeitos a erros intrínsecos associados às características operacionais dos equipamentos e à natureza dos defeitos. Além destes fatores, o tamanho relativamente pequeno do banco de dados da *IEC* também contribui para o aumento das incertezas associadas aos padrões típicos apresentados. Apesar de bancos de dados relacionando tipos de defeitos a concentrações de gases dissolvidos em OMI serem indispensáveis à elaboração e/ou validação dos métodos de diagnóstico por AGD, sua escassez é evidente na literatura, provavelmente devido à natureza confidencial dos dados. Desta forma, o banco de dados da *IEC*, apesar da limitação de tamanho, tem se mostrado extremamente importante nesta área de pesquisa, tendo sido citado em diversas referências recentes. (15-18)

Figura 1-Padrões de gases dissolvidos associados aos tipos de defeitos incipientes.(a) – Descargas parciais; (b) –Descargas elétricas de baixa energia;(c) –Descargas elétricas de alta energia;(d) –Defeitos térmicos de baixa/média temperatura;(e) –Defeitos térmicos de alta temperatura.



2 MODELAGEMDA DECOMPOSIÇÃO TÉRMICA DO OMI

Ainda que as duas grandes classes de defeitos incipientes(defeitos térmicos e defeitos elétricos)apresentem características diferentes, pode-se admitir que o efeito exercido sobre o OMI por ambas as classes é o mesmo, isto é, decomposição térmica. Normalmente, os defeitos incipientes afetam pequenas áreas do equipamento e, portanto, a energia dissipada se concentra em uma pequena porção do volume do OMI, causando o aumento da temperatura local, ou seja, originando pontos quentes no óleo. As temperaturas de equilíbrio nestes pontos quentes podem ser utilizadas como indicadores universais para avaliar a criticidade dos defeitos, independentemente do tipo de defeito. Sendo assim, um modelo de decomposição térmica de OMI pode ser utilizado para relacionar uma temperatura local, originada por um defeito térmico ou elétrico, à composição do OMI na vizinhança do defeito.

Este capítulo apresenta a modelagem do fenômeno de decomposição térmica do OMI desenvolvida no presente trabalho. A apresentação da modelagem foi dividida de forma lógica em modelagem composicional e modelagem termodinâmica, de acordo com o detalhamento dado na Seção 1.2.

2.1 Modelagem Composicional

Foram propostos quatro sistemas para representar a composição local do OMI nas vizinhanças de um defeito incipiente. Como os teores dos gases C_2H_6, C_2H_4, C_2H_2, CH_4 e H_2 são comumente quantificados e utilizados pelos métodos de diagnóstico clássicos, a presença destas espécies nos sistemas em equilíbrio foi considerada um requisito mínimo para todos os sistemas propostos.

Os Sistemas 1 e 2 foram simplesmente adaptados dos estudos de Halstead e Shirai *et al.* e são compostos por 6 e 7 espécies, respectivamente. Os Sistemas 3 e 4 são propostas mais abrangentese contêm 60 e 81 espécies, respectivamente.

2.1.1 Sistema 1

O Sistema 1 é baseado no estudo de Halstead. Os componentes do OMI são totalmente decompostos em espécies mais leves e o equilíbrio é alcançado no sistema resultante. Sendo assim, o sistema em equilíbrio é composto pelas espécies leves de maior interesse para os métodos de diagnóstico, isto é, C_2H_6, C_2H_4, C_2H_2, CH_4 e H_2 e, ainda, por C(s). A reação de decomposição característica do Sistema 1 pode ser descrita como segue:

$$OMI \longrightarrow C_2H_6 + C_2H_4 + C_2H_2 + CH_4 + H_2 + C(s) \tag{2.1}$$

2.1.2 Sistema 2

O Sistema 2 é baseado no estudo de Shirai *et al.*. Neste sistema, todos os componentes do OMInão reagido são representados pelo n-eicosano, sendo este parcialmente decomposto em espécies mais leves. Diferentemente do estudo citado, no presente trabalho, são suprimidas as espécies propano (C_3H_8) e propeno (C_3H_6), de tal forma que a decomposição do n-eicosano resulte somente nas espécies leves de interesse. O sistema em equilíbrio é composto pelo n-eicosano, pelas espécies leves de interesse e por C(s). A reação de decomposição característica do Sistema 2 está listada a seguir:

$$C_{20}H_{42} \longrightarrow C_2H_6 + C_2H_4 + C_2H_2 + CH_4 + H_2 + C(s) \tag{2.2}$$

2.1.3 Sistema 3

O Sistema 3 é uma versão expandida do Sistema 2. O n-eicosano, mais uma vez, representa todos os componentes do OMI não reagido, porém, quando exposto à temperatura local de uma região defeituosa, sua decomposição leva a séries completas de alcanos, 1-alcenos e 1-alcinos lineares, cujos tamanhos das cadeias carbônicas variam de 1 a 20

carbonos. O sistema em equilíbrio consiste de 60 espécies, a saber: 20 alcanos, 19 1-alcenos, 19 1-alcinos, H_2 e C(s). A reação de decomposição está representada a seguir.

$$C_{20}H_{42} \longrightarrow C_{20}H_{40} + C_{20}H_{38} + C_{19}H_{40} + C_{19}H_{38} + C_{19}H_{36} + (\ldots) + C_2H_6 + \\ + C_2H_4 + C_2H_2 + CH_4 + H_2 + C(s) \tag{2.3}$$

2.1.4 Sistema 4

O Sistema 4 é baseado em informações composicionais do OMI disponíveis na literatura técnica. O OMI é, na verdade, uma mistura contendo milhares de componentes e a identificação e quantificação de cada componente não seria prática. Desta forma, as informações composicionais apresentadas na literatura técnica se baseiam no agrupamento de componentes quimicamente semelhantes em famílias.

O Sistema 4 atribui 1 componente representativo a cada uma das 15 famílias de hidrocarbonetos relatadas na literatura (24), conforme apresentado naTabela . As famílias de não-hidrocarbonetos foram suprimidas. A decomposição destes componentes representativos leva às mesmas 5 espécies leves de interesse presentes nos sistemas anteriores e mais 60 subprodutos, além de C(s). Admite-se que o processo ocorra em duas etapas: na primeira etapa, a cadeia parafínica de cada componente representativo se decompõe em C_2H_6, C_2H_4, CH_4, H_2 e C(s) e, na segunda etapa, o C_2H_4 se decompõe em C_2H_2, H_2 e C(s). O sistema em equilíbrio, portanto, consiste de 81 espécies: 15 componentes representativos das famílias de hidrocarbonetos do OMI não reagido, 60 subprodutos de decomposição, além das espécies de interesse C_2H_6, C_2H_4, C_2H_2, CH_4 e H_2 e C(s). O esquema de decomposição proposto no Sistema 4pode ser representado pelas reações a seguir, onde *CR* corresponde a um componente representativo, *PD* representa uma matriz de subprodutos de decomposição e o subscrito *m* é um índice que identifica cada componente representativo:

$$CR_m \longrightarrow (PD_{1,m} + C_2H_6) + (PD_{2,m} + C_2H_4) + (PD_{3,m} + CH_4) + (PD_{4,m} + H_2) + C(s) \tag{2.4}$$

$$C_2H_4 \longrightarrow C_2H_2 + H_2 + C(s) \tag{2.5}$$

Tabela 1–Componentes representativos das famílias de hidrocarbonetos do óleo mineral isolante. (continua)

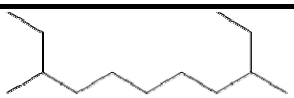
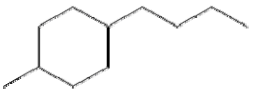
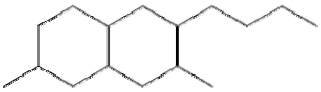
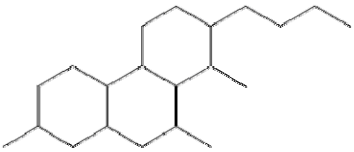
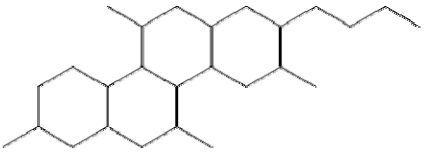
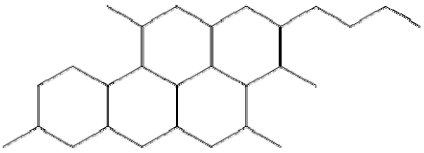
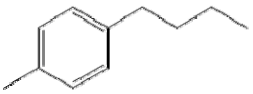
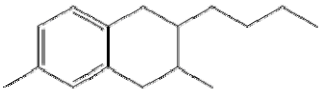
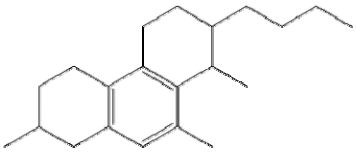
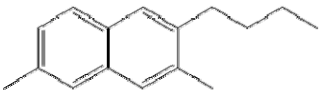
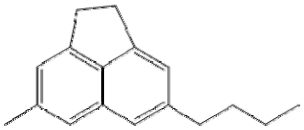
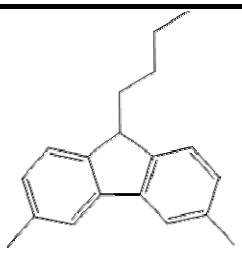
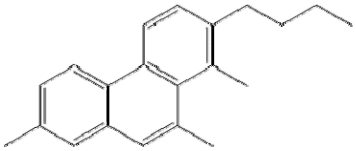
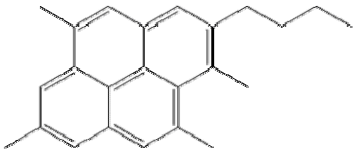
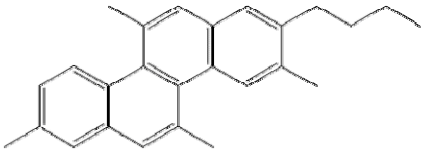
Família	Composição (% em massa)	Componente Representativo	Fórmula
Isoparafinas	11,6		$C_{13}H_{28}$
Naftenos com 1 anel	16,5		$C_{11}H_{22}$
Naftenos com 2 anéis	17,1		$C_{16}H_{30}$
Naftenos com 3 anéis	12,4		$C_{21}H_{38}$
Naftenos com 4 anéis	10,1		$C_{26}H_{46}$
Naftenos com 5 anéis	4,0		$C_{28}H_{48}$
Alquilbenzenos	5,0		$C_{11}H_{16}$
Nafteno-aromáticos	6,1		$C_{16}H_{24}$
Di-nafteno-aromáticos	7,5		$C_{21}H_{32}$
Naftalenos	4,2		$C_{16}H_{20}$
Acenaftenos	2,5		$C_{17}H_{20}$

Tabela 1– Componentes representativos das famílias de hidrocarbonetos do óleo mineral isolante. (continuação)

Família	Composição (% em massa)	Componente Representativo	Fórmula
Fluorenos	2,1		$C_{19}H_{22}$
Fenantrenos	0,6		$C_{21}H_{24}$
Pirenos	0,1		$C_{24}H_{26}$
Crisenos	0,2		$C_{26}H_{28}$

2.2 Modelagem Termodinâmica

A modelagem termodinâmica da decomposição térmica do OMI aqui proposta, para simulações de equilíbrio químico, tem como base o método dos multiplicadores de Lagrange para a minimização da energia de Gibbs total do sistema sujeita às restrições de igualdade provenientes do balanço atômico. (25) Esta seção detalha os dois modelos de equilíbrio termodinâmico desenvolvidos no presente estudo, a saber: um modelo termodinâmico irrestrito e um modelo termodinâmico com especificação da quantidade de C(s).

Os modelos termodinâmicos citados consistem de sistemas de equações não lineares. O modelo termodinâmico irrestrito resulta da aplicação direta do método dos multiplicadores de Lagrange, conforme descrito por Smith *et al.* (25), e o modelo termodinâmico com especificação da quantidade de C(s) é obtido a partir de uma adaptação deste método, que visa

incluir uma restrição à quantidade máxima de C(s) formado, através da especificaçãoda quantidade a ser alcançada no sistema em equilíbrio.

Em ambos os modelos, admite-se que as reações de decomposição ocorrem na fase gasosa. Sendo assim, quando expostos a uma temperatura local elevada, os componentes do óleo são vaporizados e, em seguida, se decompõem em espécies mais leves. Após o equilíbrio químico ter sido alcançado na fase gasosa, os componentes do sistema resultante se dissolvem na fase líquida. Não ocorrem reações químicas na fase líquida. Admite-se que todoo gás gerado na reação de decomposição será dissolvido na fase líquida, tendo em vista o seu volume extremamente reduzido em comparação ao volume de OMI no transformador. Finalmente, admite-se comportamento de gás ideal para a fase gasosa e pressão total do sistema igual a 1 bar.

2.2.1 Modelo de equilíbrio irrestrito

O modelo de equilíbrio termodinâmico irrestrito foi obtido através da solução do problema de minimização da energia de Gibbs total do sistema pelo método dos multiplicadores de Lagrange. A solução do problema se dá pela determinação da quantidade de matéria de cada espécie no sistema em equilíbrio para temperatura e pressão especificadas e está sujeita às restrições dos balanços de massa de cada elemento.

A formulação do problema de minimização está explicitada pelas equações a seguir, onde G_t é a energia de Gibbs total do sistema, g é a representação genérica de uma função, n é a quantidade de matéria ea é a matriz atômica que contém a quantidade de cada elemento em cada espécie. Os subscritos T e P representam, respectivamente, condições a temperatura e pressão constantes, o subscrito i identifica cada espécie do sistema e os subscritos C e H representam, respectivamente, os elementos carbono e hidrogênio. O sobrescrito 0 representa valor inicial. Os somatórios correm sobre todas as espécies.

Função objetivo:

$$(G_t)_{T,P} = g(\underline{n}) \tag{2.6}$$

Restrições:

$$\sum_i n_i a_{i,C} - \sum_i n_i^0 a_{i,C} = 0 \tag{2.7}$$

$$\sum_i n_i a_{i,H} - \sum_i n_i^0 a_{i,H} = 0 \tag{2.8}$$

O procedimento de solução do problema inicia pela obtenção da função Lagrangeana,L, através da adição à função objetivo dos produtos das restrições pelos respectivos multiplicadores de Lagrange,λ. As variáveis especificadas, T e P, foram omitidas nas próximas equações para simplificar a notação:

$$L(\underline{n}, \lambda_C, \lambda_H) = G_t + \lambda_C \left(\sum_i n_i a_{i,C} - \sum_i n_i^0 a_{i,C} \right) + \lambda_H \left(\sum_i n_i a_{i,H} - \sum_i n_i^0 a_{i,H} \right) \tag{2.9}$$

O valor de mínimo da energia de Gibbs total do sistema ocorre quando também ocorre o valor de mínimo da função Lagrangeana, isto é, quando todas as derivadas parciais de L são iguais a zero, o que resulta em um sistema de equações, onde o subscrito j identifica todas as espécies diferentes de$i$:

$$\left(\frac{\partial L}{\partial n_i} \right)_{\lambda_C, \lambda_H, n_j} = \left(\frac{\partial G_t}{\partial n_i} \right)_{\lambda_C, \lambda_H, n_j} + \lambda_C a_{i,C} + \lambda_H a_{i,H} = 0 \tag{2.10}$$

$$\left(\frac{\partial L}{\partial \lambda_C} \right)_{\lambda_H, \underline{n}} = \sum_i n_i a_{i,C} - \sum_i n_i^0 a_{i,C} = 0 \tag{2.11}$$

$$\left(\frac{\partial L}{\partial \lambda_H} \right)_{\lambda_C, \underline{n}} = \sum_i n_i a_{i,H} - \sum_i n_i^0 a_{i,H} = 0 \tag{2.12}$$

A derivada parcial $\left(\frac{\partial G_t}{\partial n_i}\right)_{T,P,n_j}$ é a definição do potencial químico da espécie *i*, μ_i, que, por sua vez, pode ser escritocomo segue,(25)onde $\Delta G^{\circ}_{f,i}(T)$ é a energia de Gibbs molar padrão de formação da espécie *i* em função da temperatura *T*, $\hat{f}_i$ é a fugacidade da espécie *i* na mistura, f_i° é a fugacidade da espécie *i* no estado padrão e *R* é a constante universal dos gases:

$$\mu_i = \Delta G^{\circ}_{f,i}(T) + RT\, ln\left(\frac{\hat{f}_i}{f_i^{\circ}}\right) \tag{2.13}$$

Para gases ideais à pressão de 1 bar, a Equação(2.13)pode ser simplificada,assumindo a forma da Equação (2.14), onde o subscrito *t* representa quantidade total de matéria na fase:

$$\mu_i = \Delta G^{\circ}_{f,i}(T) + RT\, ln\left(\frac{n_i}{n_t}\right) \tag{2.14}$$

Para o C(s), a Equação (2.13) pode, também, ser simplificada, assumindo a forma da Equação (2.15):

$$\mu_i = 0 \tag{2.15}$$

Logo, para sistemas que não contenham a espécie C(s), o modelo termodinâmico irrestrito é composto pelas Equações não lineares (2.16), (2.7) e (2.8), a seguir:

$$\Delta G^{\circ}_{f,i}(T) + RT\, ln\left(\frac{n_i}{n_t}\right) + \lambda_C a_{i,C} + \lambda_H a_{i,H} = 0 \tag{2.16}$$

$$\sum_i n_i a_{i,C} - \sum_i n_i^0 a_{i,C} = 0 \tag{2.7}$$

$$\sum_i n_i a_{i,H} - \sum_i n_i^0 a_{i,H} = 0 \tag{2.8}$$

Já para sistemas que contenham a espécie C(s), o modelo termodinâmico irrestrito é composto pelas Equações(2.17), (2.18), (2.7) e (2.8), como segue, onde o subscrito *k* identifica cada espécie do sistema exceto C(s) e a quantidade de matéria total na fase gasosa não inclui a quantidade de matéria de C(s):

$$\Delta G_{f,k}^{\circ}(T) + RT\, ln\left(\frac{n_k}{n_t}\right) + \lambda_C a_{k,C} + \lambda_H a_{k,H} = 0 \tag{2.17}$$

$$\lambda_C = 0 \tag{2.18}$$

$$\sum_i n_i a_{i,C} - \sum_i n_i^0 a_{i,C} = 0 \tag{2.7}$$

$$\sum_i n_i a_{i,H} - \sum_i n_i^0 a_{i,H} = 0 \tag{2.8}$$

2.2.2 Modelo de equilíbrio com especificaçãoda quantidade de C(s)

O modelo termodinâmico com especificação da quantidade de C(s) foi obtido ao se incluir umarestrição à quantidade de equilíbrio de C(s) no problema de minimização da energia de Gibbs total do sistema.

A exemplo da seção anterior, apresenta-se, a seguir, a formulação do problema de minimização e o respectivo procedimento de solução através do método dos multiplicadores de Lagrange, onde G_t é a energia de Gibbs total do sistema, *g* é a representação genérica de uma função, *n* é a quantidade de matéria,*a* é a matriz atômica que contém a quantidade de cada elemento em cada espécie, *L* é a função Lagrangeana e λ é o multiplicador de Lagrange. Os subscritos *T* e *P* representam, respectivamente, condições a temperatura e pressão constantes, o subscrito *i* identifica cada espécie do sistema, o subscrito *k* identifica cada espécie do sistema exceto C(s), o subscrito *j* identifica todas as espécies diferentes de *k*, os

subscritos C e H representam, respectivamente, os elementos carbono e hidrogênio, o subscrito C(s) representa a espécie carbono grafite e o subscrito R significa restrição, isto é, $n_{C(s),R}$ é a quantidade especificada de matéria de C(s) no equilíbrio. O sobrescrito 0 representa valor inicial.

Função objetivo:

$$(G_t)_{T,P} = g(\underline{n}) \tag{2.6}$$

Restrições:

$$\sum_i n_i a_{i,C} - \sum_i n_i^0 a_{i,C} = 0 \tag{2.7}$$

$$\sum_i n_i a_{i,H} - \sum_i n_i^0 a_{i,H} = 0 \tag{2.8}$$

$$n_{C(s)} - n_{C(s),R} = 0 \tag{2.19}$$

Função Lagrangeana:

$$L(\underline{n}, \lambda_C, \lambda_H, \lambda_R) = G_t + \lambda_C \left(\sum_i n_i a_{i,C} - \sum_i n_i^0 a_{i,C} \right) + \lambda_H \left(\sum_i n_i a_{i,H} - \sum_i n_i^0 a_{i,H} \right) + \\ + \lambda_R \left(n_{C(s)} - n_{C(s),R} \right) \tag{2.20}$$

Igualando-se a zero as derivadas parciais da função Lagrangeana:

$$\left(\frac{\partial L}{\partial n_k} \right)_{\lambda_C, \lambda_H, \lambda_R, n_j} = \left(\frac{\partial G_t}{\partial n_k} \right)_{\lambda_C, \lambda_H, n_j} + \lambda_C a_{k,C} + \lambda_H a_{k,H} = 0 \tag{2.21}$$

$$\left(\frac{\partial L}{\partial n_{C(s)}} \right)_{\lambda_C, \lambda_H, \lambda_R, n_k} = \left(\frac{\partial G_t}{\partial n_{C(s)}} \right)_{\lambda_C, \lambda_H, n_k} + \lambda_C a_{C(s),C} + \lambda_H a_{C(s),H} + \lambda_R = 0 \tag{2.22}$$

$$\left(\frac{\partial L}{\partial \lambda_C}\right)_{\lambda_H,\lambda_R,\underline{n}} = \sum_i n_i a_{i,C} - \sum_i n_i^0 a_{i,C} = 0 \tag{2.23}$$

$$\left(\frac{\partial L}{\partial \lambda_H}\right)_{\lambda_C,\lambda_R,\underline{n}} = \sum_i n_i a_{i,H} - \sum_i n_i^0 a_{i,H} = 0 \tag{2.24}$$

$$\left(\frac{\partial L}{\partial \lambda_R}\right)_{\lambda_C,\lambda_H,\underline{n}} = n_{C(s)} - n_{C(s),R} = 0 \tag{2.25}$$

Finalmente, o modelo com especificação da quantidade de C(s) é obtido a partir das mesmas hipóteses e definições dadas nas Equações (2.13), (2.14) e (2.15), resultando, também, em um sistema de equações nãolineares, onde $\Delta G^{\circ}_{f,k}(T)$ é a energia de Gibbs molar padrão de formação da espécie *k* em função da temperatura *T*, *R* é a constante universal dos gases e o subscrito *t* representa quantidade total:

$$\Delta G^{\circ}_{f,k}(T) + RT\,ln\left(\frac{n_k}{n_t}\right) + \lambda_C a_{k,C} + \lambda_H a_{k,H} = 0 \tag{2.17}$$

$$\lambda_C + \lambda_R = 0 \tag{2.26}$$

$$\sum_i n_i a_{i,C} - \sum_i n_i^0 a_{i,C} = 0 \tag{2.7}$$

$$\sum_i n_i a_{i,H} - \sum_i n_i^0 a_{i,H} = 0 \tag{2.8}$$

$$n_{C(s)} - n_{C(s),R} = 0 \tag{2.27}$$

O modelo termodinâmico com especificação da quantidade de C(s) torna possível a simulação de cenários intermediários entre as duas propostas pouco realistas existentes na literatura, isto é, i) uma quantidade irrestrita de C(s) no equilíbrio, resultando em um sistema

em equilíbrio contendo, virtualmente, apenas os gases H_2 e CH_4, conforme resultados obtidos por Halstead (6) e ii) a total ausência de C(s) no equilíbrio, o que contraria as observações empíricas (4,5), conforme proposto por Shirai *et al.* (23). Como o equilíbrio termodinâmico nas vizinhanças de uma região defeituosa não é, de fato, plenamente alcançado (4,5,24) e admitindo-se que o processo de formação de C(s) é mais lento do que o processo de formação das espécies gasosas, a restrição da quantidade de C(s) no equilíbrio procura levar em consideração os efeitos advindos da cinética de decomposição térmica do OMI, ainda que através de simulações puramente de equilíbrio termodinâmico. Assim, aespecificação da quantidade de C(s) no equilíbrio possibilita apresentar um limitador (motivado pela cinética de formação de sólido) para essa variável, e,portanto,viabiliza a simulação da decomposição térmica do OMI em um estágio mais próximo ao que ocorre em um sistema real, o que aumenta a representatividade do modelo.

2.2.3 Avaliação davalidade da hipótese de gás ideal

Conforme mencionado anteriormente, ambos os modelos de equilíbriotermodinâmico aqui propostos para representar a decomposição térmica do OMI admitem a hipótese de gás ideal para a fase gasosa. A metodologia adotada para determinar a validade de tal hipótese consiste em estimar o fator de compressibilidade da mistura correspondente ao sistema em equilíbrio químico, conforme apresentada nesta seção.

De acordo comPoling*et al.* (26), o princípio dos estados correspondentes pode ser aplicado a misturas a partir da obtenção de parâmetros análogos aosparâmetros críticos das substâncias puras, isto é, osparâmetros pseudocríticos. Tais parâmetros podem ser estimados através da aplicação das regras de mistura apresentadasa seguir, onde T é a temperatura, P é a pressão, V é o volume molar, R é a constante universaldos gases, Z é o fator de compressibilidade e y é a fração molar. O subscrito pc representa um parâmetro pseudocrítico, o subscrito c representa um parâmetro crítico e o subscrito k identifica cada espécie do sistema exceto o C(s).

$$T_{pc} = \sum_k y_k T_{c_k} \tag{2.28}$$

$$P_{pc} = \frac{\left(\sum_k y_k Z_{c_k}\right) RT_{pc}}{\sum_k y_k V_{c_k}} \tag{2.29}$$

O fator de compressibilidade crítico da espécie k pura, Z_{c_k}, pode ser obtido como segue.

$$Z_{c_k} = \frac{P_{c_k} V_{c_k}}{RT_{c_k}} \tag{2.30}$$

Os parâmetros pseudocríticos assim estimados são utilizados para a obtenção dos parâmetros pseudorreduzidos da mistura, T_{pr} e P_{pr}, análogos, por sua vez, aos parâmetros reduzidos das substâncias puras.

$$T_{pr} = \frac{T}{T_{pc}} \tag{2.31}$$

$$P_{pr} = \frac{P}{P_{pc}} \tag{2.32}$$

Uma regra de mistura linear é também indicada para a estimativa de um fator acêntrico de Pitzer da mistura, $\hat{\omega}$, a partir do fator acêntrico de Pitzer, ω, de cada espécie na fase gasosa, como segue. (26)

$$\hat{\omega} = \sum_k y_k \omega_k \tag{2.33}$$

Finalmente, os parâmetros pseudorreduzidos e o fator acêntrico da mistura em equilíbrio na fase gasosa foram aplicados às correlações de Pitzer, obtendo-seo fator de compressibilidade da mistura, Z, a partir de correlações relacionadas ao segundo coeficiente do virial, B^0 *e* B^1:

$$B^0 = 0{,}083 - \frac{0{,}422}{T_{pr}^{1,6}} \tag{2.34}$$

$$B^1 = 0{,}139 - \frac{0{,}172}{T_{pr}^{4,2}} \tag{2.35}$$

$$Z^0 = 1 + B^0 \frac{P_{pr}}{T_{pr}} \tag{2.36}$$

$$Z^1 = B^1 \frac{P_{pr}}{T_{pr}} \tag{2.37}$$

$$Z = Z^0 + \hat{\omega} Z^1 \tag{2.38}$$

A seguir, apresentam-se as metodologias adotadas para a estimativa das propriedades das substâncias puras utilizadas nas equações desta seção.

Para as espécies leves, os parâmetros críticos, T_c, P_ce V_c, e o fator acêntrico de Pitzer foram obtidos da literatura (26,27). No entanto, para as espécies pesadas, tais propriedades não puderam ser encontradas na literatura e foram estimadas através de métodos de contribuição de grupos: os parâmetros críticos foram estimados pelo método de Joback (26) e o fator acêntrico de Pitzer foi estimado pelo método de Constantinou e Gani (26).

É importante notar que, como o H_2 não se ajusta bem ao comportamento dos estados correspondentes, para esta espécie, foram adotados os parâmetros críticos efetivos, funções da temperatura,recomendados por Smith *et al.* (25):

3 SIMULAÇÃO E OTIMIZAÇÃONUMÉRICAS

A fim de possibilitar a comparação da adequabilidade dos diferentes modelos composicionais propostos e, também, a avaliaçãodo desempenho dosmodelosde equilíbrio químico propostos para representar a decomposição térmica do OMI, simulações numéricas e problemas de otimização foram resolvidos, de acordo com as metodologias descritasneste capítulo. Todos os problemas de simulação e otimização foram resolvidos através de rotinas computacionais originais escritas em *Scilab*, linguagem de programação científica.

3.1 Simulação Numérica

Foram conduzidas simulações de equilíbrio químico com diferentes associações entre os quatro modelos composicionais propostos na Seção 2.1, Sistemas 1 a 4, e os modelos de equilíbrio termodinâmico propostos na Seção 2.2, para três cenários, a saber: i) cenário com quantidade irrestrita de C(s), ii) cenário sem C(s) e iii) cenário com quantidade especificada de C(s).

A literatura estima que um defeito incipiente possa elevar a temperatura local do OMI a até 1800 ºC. (5) Sendo assim, no presente estudo, admite-se que a faixa de temperaturas de equilíbrio de 0 a 2000 ºC seja suficiente para representar a decomposição térmica do OMI resultante de um defeito incipiente.

Os sistemas formados pelas equações não lineares dos modelos irrestrito e com especificação da quantidade de C(s) foram solucionados, para a obtenção das composições de equilíbrio de cada sistema, através do método de Newton-Raphson multivariável modificado com uma estratégia de busca unidimensional do passo ótimo pelo método da seção áurea (27).É importante notar que as matrizes Jacobianas correspondentes aos sistemas de equações mencionados foram escalonadas, afim de se evitar problemas de mau condicionamento (matrizes quase singulares) que pudessem levarao aumento das incertezas nos resultados de simulação.

O cálculo da energia de Gibbs padrão de formação de cada espécie, para as temperaturas especificadas, requereu o conhecimento prévio, para cada espécie, da entalpia e da energia de Gibbs padrões de formação a 298 K e, ainda, da capacidade calorífica a pressão

constante no estado de gás ideal em função da temperatura. Estimativas destas propriedades termodinâmicas para espécies pesadas foram obtidas através do método de contribuição de grupos de Joback (26). Valores para as propriedades das espécies leves foram obtidos da literatura (25).

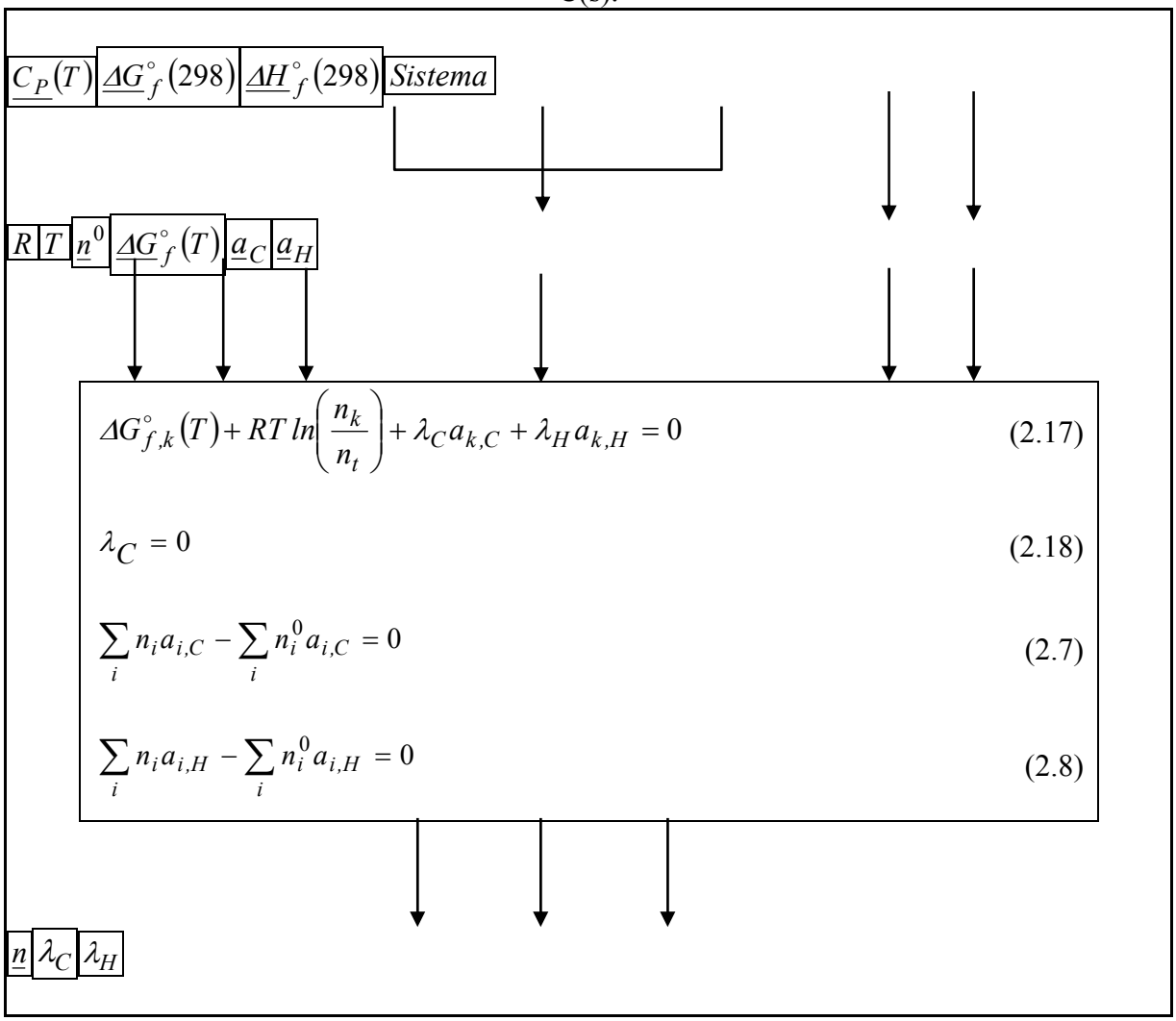
Para fins de comparação com os padrões típicos de defeitos incipientes, as quantidades de matéria no equilíbrio dos gases dissolvidos de interesse (C_2H_6, C_2H_4, C_2H_2, CH_4 e H_2) obtidas em cada simulação foram transformadas em frações molares normalizadas.

3.1.1 Cenário com quantidade irrestrita de C(s)

O cenário com quantidade irrestrita de C(s) corresponde à proposta de Halstead (6) para a modelagem da decomposição térmica do OMI. O modelo termodinâmico escrito para este cenário é composto pelas Equações (2.7), (2.8), (2.17) e (2.18), sendo a Equação (2.17) escrita para todos os componentes do sistema exceto o C(s). Desta forma, os modelos de decomposição térmica correspondentes aos Sistemas 1 a 4 são compostos, respectivamente, por 8, 9, 62 e 83 equações, neste cenário de quantidade de C(s).

A **Erro! Fonte de referência não encontrada.**2 apresenta a estrutura do algoritmo de simulação para o cenário com quantidade irrestrita de C(s), onde $\Delta G_f^\circ(298)$ é a energia de Gibbs padrão de formação a 298 K, $\Delta H_f^\circ(298)$ é a entalpia padrão de formação a 298 K e $C_P(T)$ é a capacidade calorífica à pressão constante no estado de gás ideal em função de temperatura.O algoritmo descrito foi executado para toda a faixa de temperaturas adotada, com incrementos de 1 ºC, resultando em 2001 simulações para cada modelo composicional. As frações molares normalizadas das espécies de interesse calculadas a partir dos resultados de simulação, para cada modelo composicional, foram salvas em uma matriz 2001x5 para facilitar consultas e aplicações futuras.

Figura 2– Estrutura do algoritmo de simulação para o cenário com quantidade irrestrita de C(s).



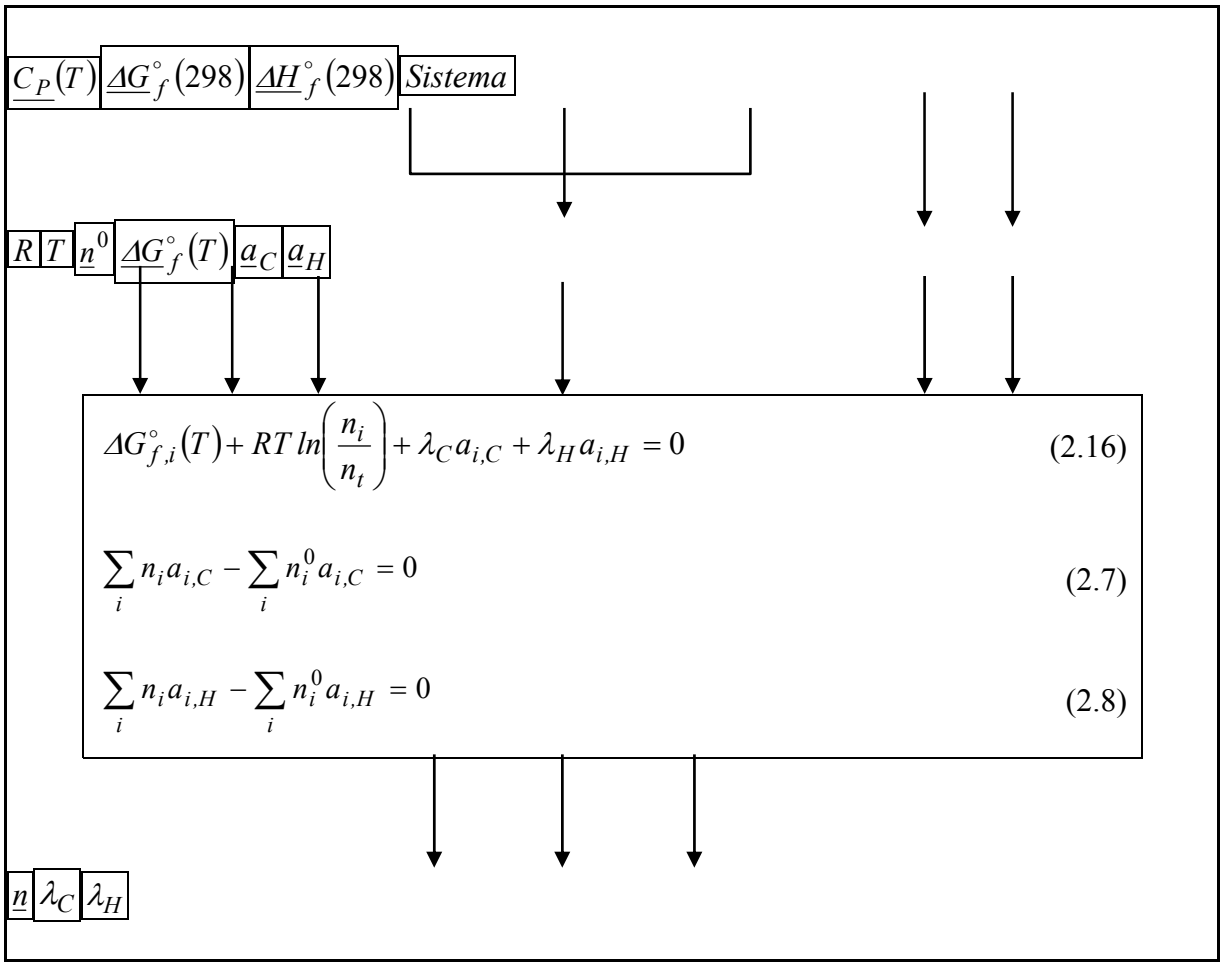
3.1.2 Cenário sem C(s)

O cenário sem C(s) corresponde à proposta de Shirai *et al.* (23) para a modelagem da decomposição térmica do OMI. O modelo termodinâmico escrito para este cenário é composto pelas Equações(2.7), (2.8) e (2.16),sendo a Equação (2.16) escrita para todos os componentes do sistema. Desta forma, os modelos de decomposição térmica correspondentes aos Sistemas 1 a 4 são compostos, respectivamente, por 7, 8, 61 e 82 equações, neste cenário de quantidade de C(s).

A **Erro! Fonte de referência não encontrada.**3 apresenta a estrutura do algoritmo de simulação para o cenário sem C(s). Assim como na seção anterior, o algoritmo descrito nesta

seção foi executado para toda a faixa de temperatura adotada, com incrementos de 1 ºC, resultando em 2001 simulações para cada modelo composicional e as respectivas frações molares normalizadas das espécies de interesse foram, também, salvas em uma matriz 2001x5 para facilitar consultas e aplicações futuras.

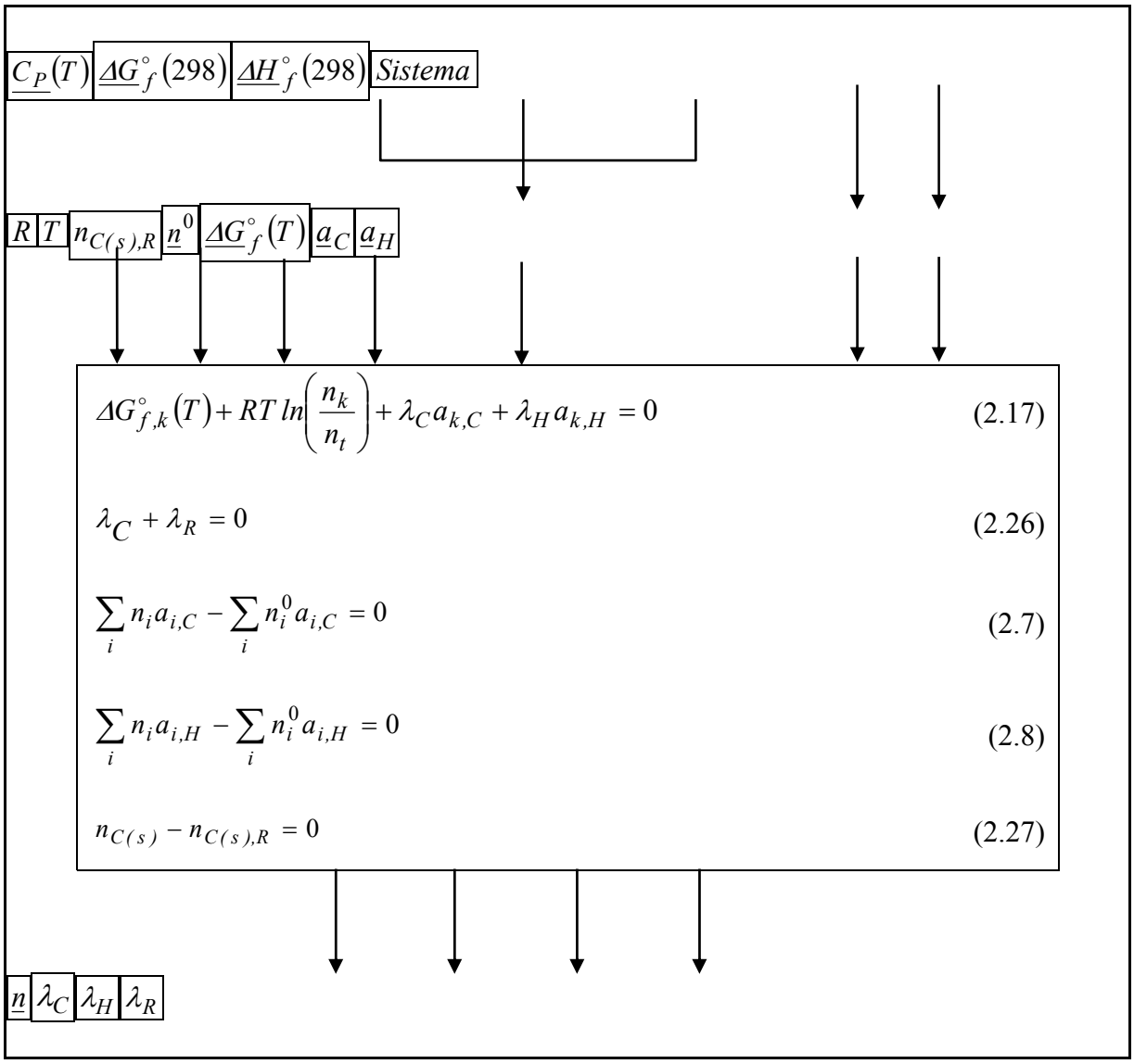
Figura 3 – Estrutura do algoritmo de simulação para o cenário sem C(s).



3.1.3 Cenário com quantidadeespecificadade C(s)

O cenário com especificação da quantidade de C(s) é uma proposta original do presente estudo para a modelagem da decomposição térmica do OMI, onde, além da temperatura, a quantidade de C(s) no equilíbrio é também especificada, sendo esta definida como uma fração da quantidade irrestrita de equilíbrio de C(s) para cada temperatura. Logo, resultados de simulação previamente obtidos no cenário com quantidade irrestrita de C(s) são utilizados no cenário com otimização da quantidade de C(s).O modelo termodinâmico escrito

para este cenário é composto pelas Equações (2.7), (2.8), (2.17), (2.26) e (2.27),sendo a Equação (2.17) escrita para todos os componentes do sistema exceto o C(s). Desta forma, os modelos de decomposição térmica correspondentes aos Sistemas 1 a 4 são compostos, respectivamente, por 9, 10, 63 e 84 equações, neste cenário de quantidade de C(s).



A **Erro! Fonte de referência não encontrada.**4 apresenta o algoritmo de simulação para o cenário com especificaçãoda quantidade de C(s). O algoritmo descrito foi executado para todos os pares possíveis de temperatura de equilíbrio e fração da quantidade irrestrita de equilíbrio de C(s). Em todos os casos simulados, a temperatura sofreu incrementos de 1 ºC. Já para a fração da quantidade de C(s), foram implementa dos dois incrementos: de 0,1, resultando em 22.011 simulações para cada modelo composicional, e incrementos de 0,01, resultando em 202.101 simulações para cada modelo composicional. As frações molares

normalizadas das espécies de interesse calculadas a partir dos resultados de simulação, para cada modelo composicional, foram salvas em hipermatrizes 2001x11x5 ou 2001x101x5, a depender do incremento implementado na fração da quantidade irrestrita de equilíbrio C(s).

3.2 OtimizaçãoNumérica

A fim de permitir a avaliação qualitativa e quantitativa dos resultados de simulação obtidos, 117 problemas de otimização foram solucionados para comparar cada um dos padrões de gases dissolvidosoriundos do banco de dados da*IEC* com os padrões oriundos das simulações com cada variação do modelo proposto de decomposição do OMI.O objetivo de tais problemas de otimização era encontrar os parâmetros ótimos que levassem à minimização do somatório dos quadrados dos resíduos relativos entre as frações molares preditas e as frações molares oriundas do banco de dados da *IEC*. Como a função objetivo mencionada não admite frações molares empíricas iguais a zero, em tais casos, adotou-se o limite inferior de detecção de cada gás, de acordo com estudos interlaboratoriais conduzidos pela *ASTMInternational*(28).

As matrizes de frações molares preditas nos cenários de quantidades irrestrita de C(s) e sem C(s) deram origem a problemas de otimização unidimensionais, cujo parâmetro é a temperatura. Já as hipermatrizes de frações molares preditas no cenário de quantidade otimizada de C(s) deram origem a problemas de otimização bidimensionais, cujos parâmetros são a temperatura e a fração da quantidade irrestrita de equilíbrio de C(s).

A função objetivo mencionada corresponde à Equação (3.1), onde*SQRR* significa somatório dos quadrados dos resíduos relativos e *y* é a fração molar. O subscrito *l* é um índice que identifica cada uma das cinco espécies de interesse, o subscrito *IEC* se refere ao banco de dados da *IEC* e o subscrito *pred* se refere aos dados preditos pelo modelo de decomposição. A Figura 3.15 apresenta as estruturas dos algoritmos de otimização unidimensional e bidimensional, onde *T* é a temperatura, *C*é a fração da quantidade irrestrita de equilíbrio de C(s) e o subscrito *otm* se refere ao valor ótimo.

$$SQRR = \sum_{l} \left(\frac{y_{l,IEC} - y_{l,pred}}{y_{l,IEC}} \right)^2 \tag{3.1}$$

Figura 5 – Estruturas dos algoritmos de otimização. (a) Problema unidimensional; (b) Problema bidimensional.

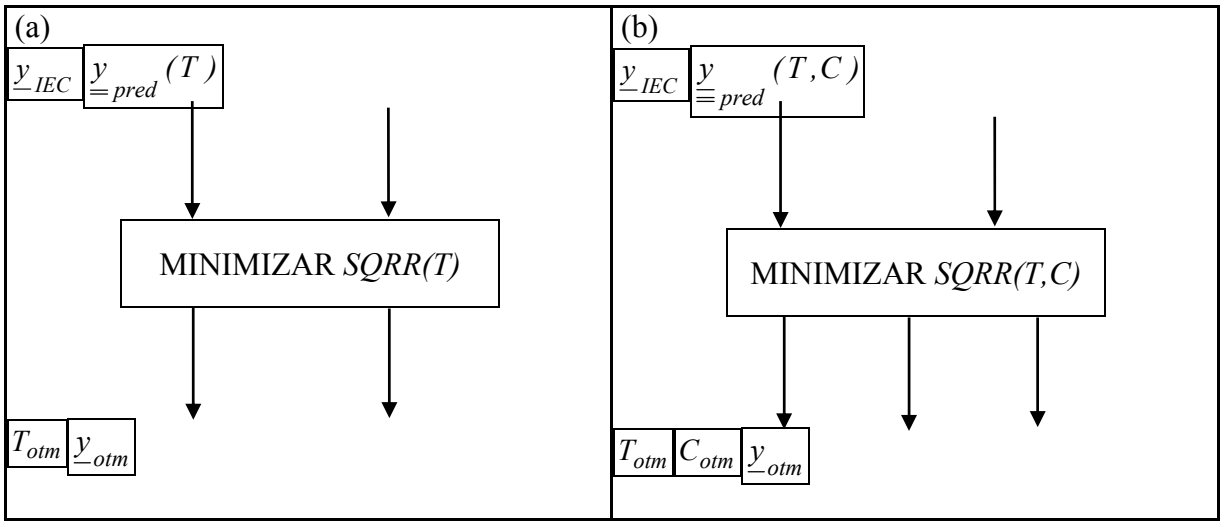


Figura 3.1 – Estruturas dos algoritmos de otimização. (a) Problema unidimensional; (b) Problema bidimensional.

Uma abordagem do tipo força bruta foi aplicada à solução destes problemas, de maneira que todo o intervalo de interesse fosse examinado, tanto para a temperatura quanto para a fração da quantidade irrestrita de equilíbrio de C(s), evitando-se, assim, erros relacionados a mínimos locais. Erros relativos médios percentuais, *ERM*, foram calculados a partir dos valores ótimos da função objetivo, conforme Equação (3.2).

$$ERM = 100\left(\sqrt{\frac{SQRR_{otm}}{5}}\right) \tag{3.2}$$

4 DESENVOLVIMENTO DO MÉTODO DE DIAGNÓSTICO T-C

Os resultados de simulação obtidos a partir do modelo de decomposição térmica do OMI com otimização da quantidade de C(s) foram aplicados ao desenvolvimento de um método de diagnóstico com base fenomenológica, o método T-C. Os parâmetros temperatura de equilíbrio e fração da quantidade irrestrita de equilíbrio de C(s) serão utilizados para correlacionar as predições do modelo aos dados empíricos de gases dissolvidos.A metodologia adotada para o desenvolvimento do método está descrita a seguir.

4.1 Mapas de Defeitos

A base do desenvolvimento do método de diagnóstico T-C são os resultados obtidos na solução dos 117 problemas de otimização bidimensionais, conforme descritos na Seção 3.2, referentes ao modelo de decomposição térmica do OMI composto pelo modelo composicional Sistema 3 e pelo modelo termodinâmico com especificaçãoda quantidade de C(s). A opção por esta configuração para o modelo de decomposição será mais bem elucidada na Seção 5.1. Os resultados dos problemas de otimização aqui utilizados se referem à hipermatriz de frações molares preditas de dimensões 2001x101x5, ou seja, aquela obtida em simulações com incrementos de 0,01 na fração da quantidade irrestrita de equilíbrio de C(s).

Os pares ótimos de temperatura de equilíbrio, *T*, e fração da quantidade irrestrita de equilíbrio de C(s), *C*, obtidos como soluções para os problemas de otimização,aqui denominados binários T-C, foram plotados em um gráfico *CversusT*.

Em seguida, regiões de defeitos incipientes foram delimitadas através de inspeção visual, visando à maximização do número de alocações corretas dos defeitos nas regiões correspondentes no mapa. Em uma primeira etapa, o mapa de defeitos incipientes foi dividido em três regiões, cada uma caracterizando uma classe de defeitos incipientes, a saber: i) descargas parciais (DP), ii) defeitos térmicos (DT) e iii) descargas elétricas (DE). Em seguida, o mapa foi dividido em cinco regiões, a fim de possibilitar a representação completa dos defeitos incipientes listados no banco de dados da *IEC*, a saber: i) descargas parciais (DP), ii) defeitos térmicos de baixa/média temperatura (T1/T2), iii) defeitos térmicos de alta

temperatura (T3), iv) descargas elétricas de baixa energia (D1) e v) descargas elétricas de alta energia (D2).

O método proposto consiste em classificar o defeito incipiente associadoa um conjunto fornecido de concentrações de gases dissolvidos, através de sua alocação em uma região do mapa de três regiões ou do mapa de cinco regiões no diagrama *CversusT*. O procedimento geral para a aplicação do método T-C está descrito no APÊNDICE A.

4.2 Análise de Desempenho do Método T-C

Os 117 conjuntos de concentrações de gases dissolvidos do banco de dados da *IEC* foram submetidos a diagnósticos tanto pelo método T-C quanto pelos métodos clássicos da *IEC* (4), de Duval (4), de Rogers (5) e de Doernenburg (5). O critério escolhido para avaliar o desempenho foi o percentual de diagnósticos corretos obtidos a partir da aplicação de cada método.

Duas avaliações de desempenho foram conduzidas: a primeira avaliou a capacidade de cada método em classificar os defeitos incipientes em DP, DT ou DE e a segunda avaliou a classificação em DP, T1/T2, T3, D1 e D2.

Alguns ajustes se mostraram necessários para garantir a padronização das respostas dos diferentes métodos avaliados, tanto para a classificação em três defeitos quanto para a classificação em cinco defeitos. Nos casos em que a resposta de um método era equivalente a múltiplas classificações dentre aquelas listadas no parágrafo anterior, conservadoramente, o diagnóstico foi considerado correto se pelo menos uma das classificações dadas pelo método correspondia à classificação visual relatada no banco de dados da *IEC*. Similarmente, nos casos em que o defeito incipiente estava associado a múltiplas classificações visuais, o diagnóstico foi considerado correto se a resposta do método correspondia a, pelo menos, uma destas classificações visuais.

Devido ao tamanho limitado do banco de dados da *IEC*, os conjuntos de dados de gases dissolvidos utilizados na avaliação de desempenho do método T-C foram os mesmos utilizados em seu desenvolvimento. No entanto, foram executados testes numéricos em que o banco de dados foi dividido aleatoriamente em dois subconjuntos independentes para a determinação dos limites das regiões de defeitos e para a avaliação de desempenho do método e estes forneceram resultados equivalentes aos do cenário sem divisão do banco de dados.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados se apresentam divididos em aspectos centrais do problema, a saber: simulação e otimização e método de diagnóstico T-C.

5.1 Resultados de Simulação e Otimização

Esta seção contempla os resultados obtidos nas simulações de equilíbrio químico e na solução dos problemas de otimização, conforme metodologias descritas no Capítulo 3.

5.1.1 Frações molaresde equilíbrio em função da temperatura

Os resultados obtidos nas simulações com o modelo termodinâmico irrestrito são apresentados, da **Erro! Fonte de referência não encontrada.**6 à **Erro! Fonte de referência não encontrada.**9, na forma de perfis de frações molares em função da temperatura de equilíbrio para os Sistemas 1 a 4, respectivamente. A fim de facilitar a comparação com os padrões típicos de defeitos incipientes da Seção 1.4, os gráficos se limitam a apresentaras frações molares de equilíbrio normalizadas das espécies de interesse para os métodos de diagnóstico por análise de gases dissolvidos, isto é, H_2, CH_4, C_2H_6, C_2H_4 e C_2H_2. Cada figura apresenta os resultados de simulação para os dois cenários de quantidade de C(s) propostos na literatura: i) cenário com quantidade irrestrita de C(s) e ii) cenário sem C(s).

Figura 6– Frações molares normalizadas do Sistema 1 em equilíbrio em função da temperatura de equilíbrio em dois cenários de quantidade de C(s). (a) –Cenário com quantidade irrestrita de C(s); (b) –Cenário sem C(s).

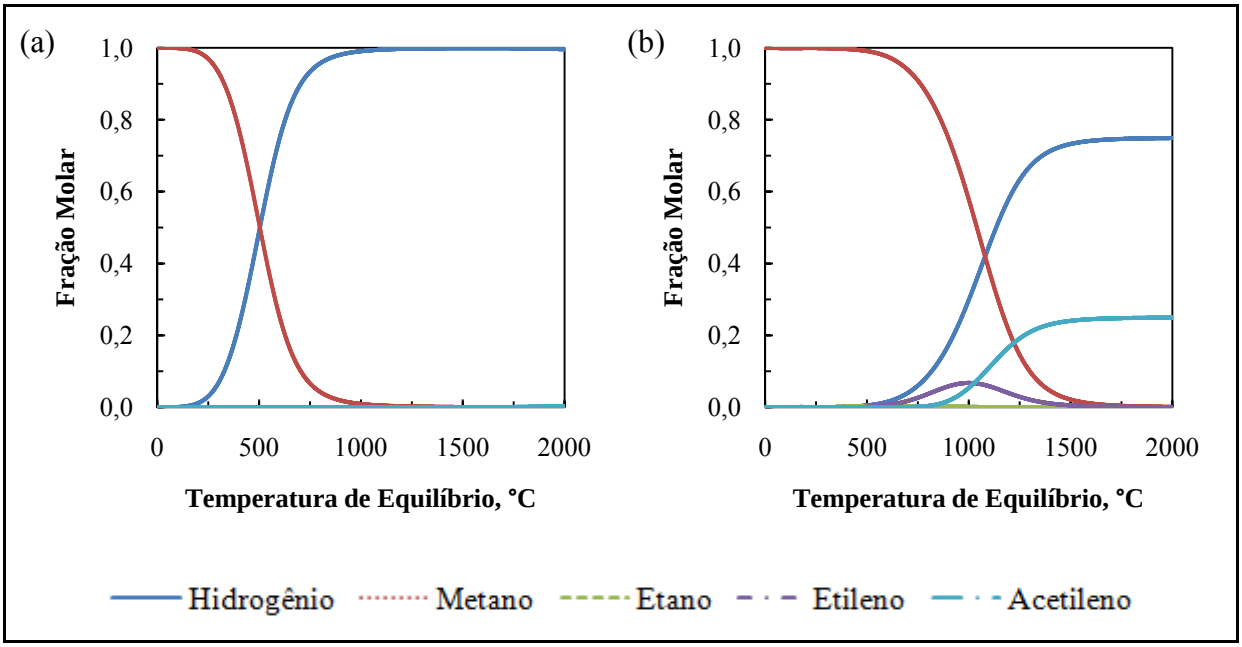


Figura 7 – Frações molares normalizadas do Sistema 2 em equilíbrio em função da temperatura de equilíbrio em dois cenários de quantidade de C(s). (a) – Cenário com quantidade irrestrita de C(s); (b) – Cenário sem C(s).

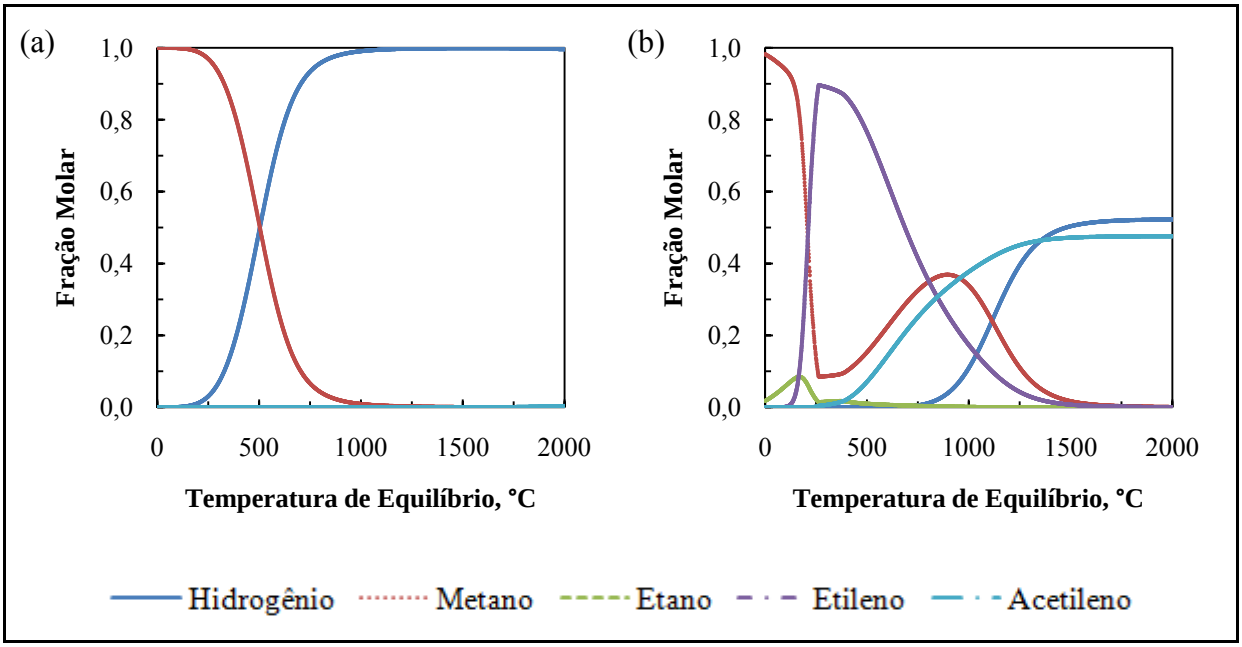


Figura 8 – Frações molares normalizadas do Sistema 3 em equilíbrio em função da temperatura de equilíbrio em dois cenários de quantidade de C(s). (a) –Cenário com quantidade irrestrita de C(s); (b) –Cenário sem C(s).

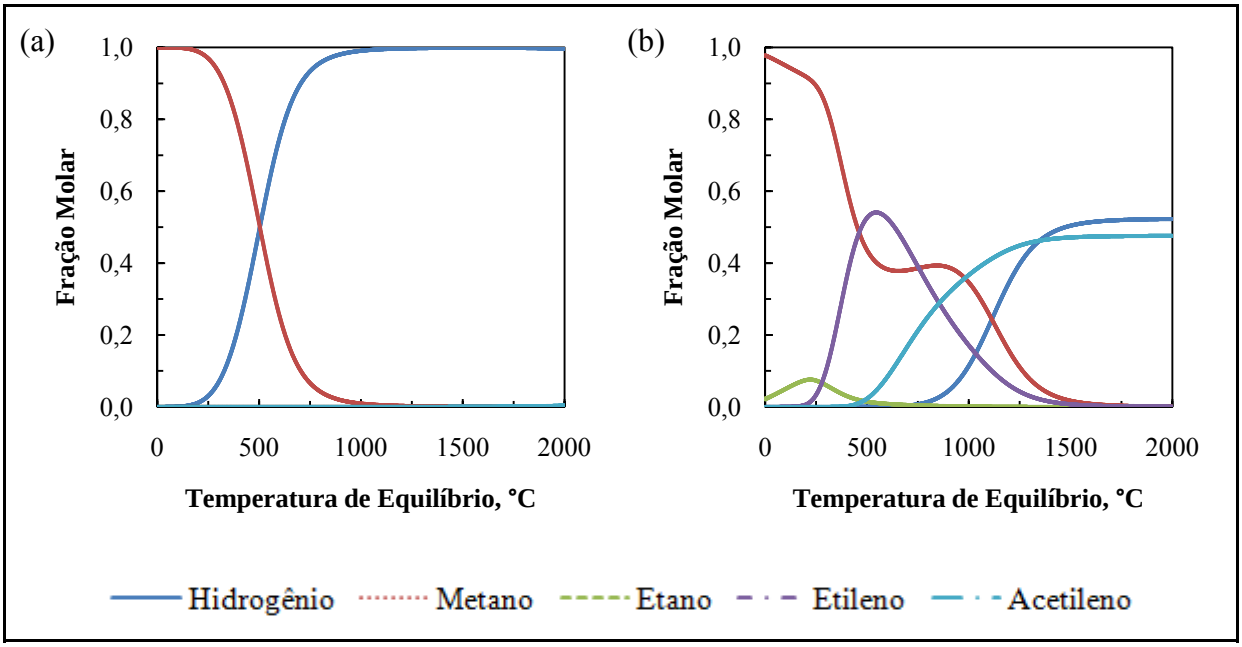
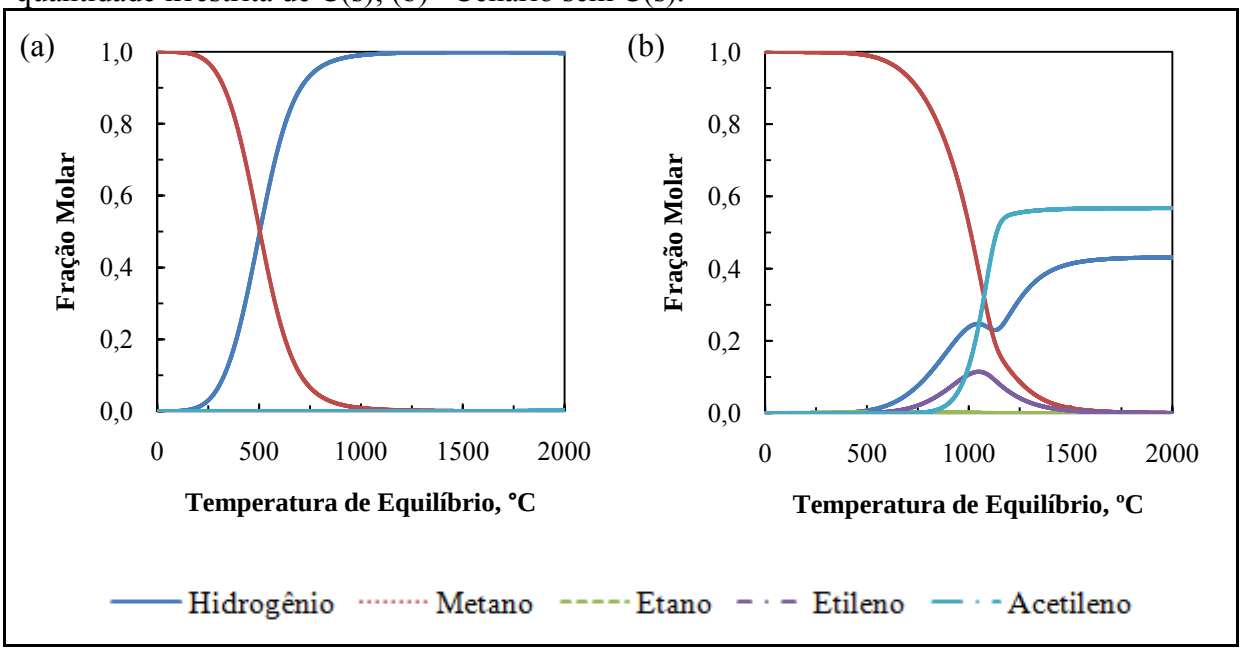


Figura 9 – Frações molares normalizadas do Sistema 4 em equilíbrio em função da temperatura de equilíbrio em dois cenários de quantidade de C(s). (a) – Cenário com quantidade irrestrita de C(s); (b) –Cenário sem C(s).



Analisando-se as Figuras 6 (a), 7 (a), 5.3 (a) e 9 (a), observa-se que os resultados das simulações com quantidade irrestrita de C(s) são praticamente os mesmos para os quatro sistemas, independentemente das diferentes modelagens composicionais do OMI e da presença de espécies mais pesadas. Além disso, a comparação destas mesmas figuras com os padrões típicos de defeitos incipientes revela que os sistemas propostos não são capazes de representar a decomposição do OMI quando se admite quantidade irrestrita de equilíbrio de C(s): enquanto os resultados de simulação apresentam, virtualmente, apenas as espécies hidrogênio e metano nos sistemas em equilíbrio, tal como os resultados do estudo de Halstead (6), os padrões típicos apresentam teores significativos de todas as espécies de interesse. Tais constatações estão de acordo com as observações de Shirai *et al.* (23).

Por outro lado, ao se comparar os padrões típicos de defeitos incipientes com as Figuras 6 (b), 7 (b), 8 (b) e 9 (b), observa-se, de imediato, que os sistemas propostos têm potencial para representar a decomposição do OMI quando não há C(s) no sistema em equilíbrio, tendo em vista que os resultados de simulação, desta vez, apresentam quantidades significativas de outros gases de interesse, além do hidrogênio e do metano. No entanto, a hipótese de total ausência de C(s) nos sistemas em equilíbrio contraria as observações empíricas, conforme já discutido.

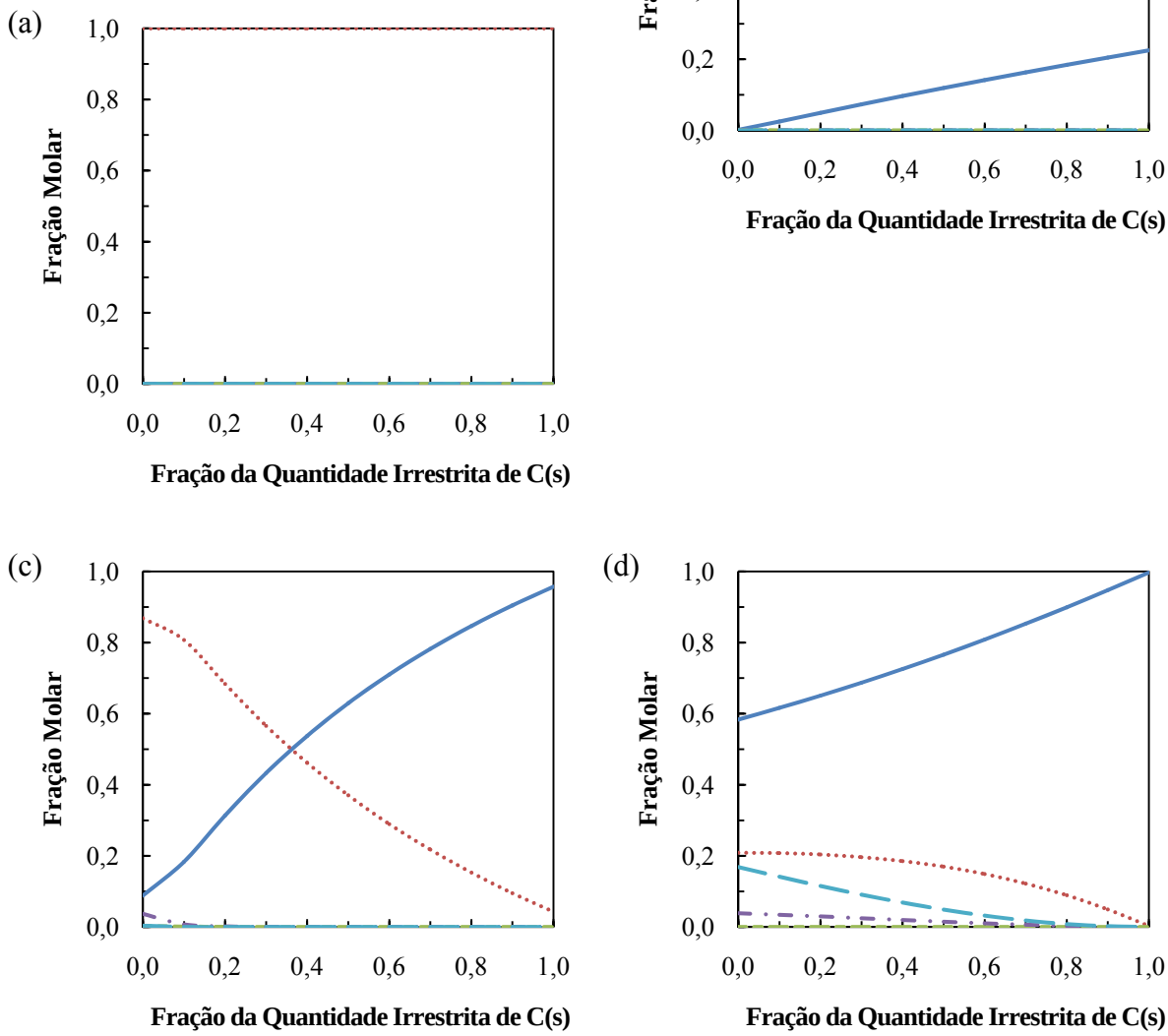
Os Sistemas 2 e 3, no cenário sem C(s), aparentemente apresentam os melhores desempenhos, já que as Figuras 7 (b) e 8 (b) são os únicos gráficos a apresentar quantidades significativas de etano, ainda que em frações molares menores do que o esperado pela análise dos padrões típicos de defeitos incipientes. Uma avaliação mais detalhada destes dois sistemas revela que o Sistema 3 é provavelmente mais adequado para representar a decomposição do OMI do que o Sistema 2, tendo em vista que este último (**Erro! Fonte de referência não encontrada.**7 (b)) apresenta uma mudança de composição abrupta por volta da temperatura de equilíbrio de 300 ºC. Tal mudança abrupta está, provavelmente, relacionada à ausência de espécies relevantes de massas molares intermediárias no sistema. Por ser um modelo composicional mais completo, o Sistema 3permite uma melhor representação da faixa de produtos de decomposição gerados a temperaturas específicas.

Observa-se também que, apesar de ser desenvolvido com base em informações composicionais, o Sistema 4 não apresentou, nesta primeira análise qualitativa, o melhor desempenho ao representar a decomposição térmica do OMI. Além da ausência de etano em toda a faixa de temperatura estudada, a **Erro! Fonte de referência não encontrada.**9 (b) mostra que o metano é a única espécie de interesse observada em temperaturas de equilíbrio inferiores a 500 ºC e, ainda, que a quantidade máxima de etileno no equilíbrio não corresponde ao esperado nos padrões típicos de defeitos incipientes. Tais observações são válidas também para o Sistema 1, como mostra a **Erro! Fonte de referência não encontrada.**6 (b). Estudos futuros sobre o tema podem ajudar a esclarecer esta discussão.

5.1.2 Frações molares de equilíbrio em função da quantidade de C(s)

As Figuras 10 a 13 apresentam resultados de simulação com o modelo com especificação da quantidade de C(s), respectivamente, para os Sistemas1 a 4. Os resultados foram obtidosa temperaturas de equilíbrio constantes e variando-se a quantidade de C(s) especificada de 0 a 1, em termos da fração da quantidade de equilíbrio irrestrita de C(s). Desta forma, em cada gráfico, os extremos do eixo das abscissas representam os casos base da quantidade de equilíbrio de C(s) propostos na literatura. Cada figura apresenta resultados de simulação obtidos para as temperaturas de equilíbrio de 0 ºC, 400 ºC, 800 ºC, 1200 ºC,1600 ºC e 2000 ºC. Mais uma vez, as figuras contemplam apenas as frações molares das cinco espécies de interesse para fins de comparação com os padrões típicos de defeitos incipientes.

Figura 10 – Frações molares normalizadas do Sistema 1 em equilíbrio em função da fração da quantidade irrestrita de equilíbrio de C(s) a temperaturas constantes.
(a) – T = 0 ºC; (b) – T = 400 ºC; (c) – T = 800 ºC; (d) – T = 1200 ºC; (e) – T = 1600 ºC; (f)– T = 2000 ºC.



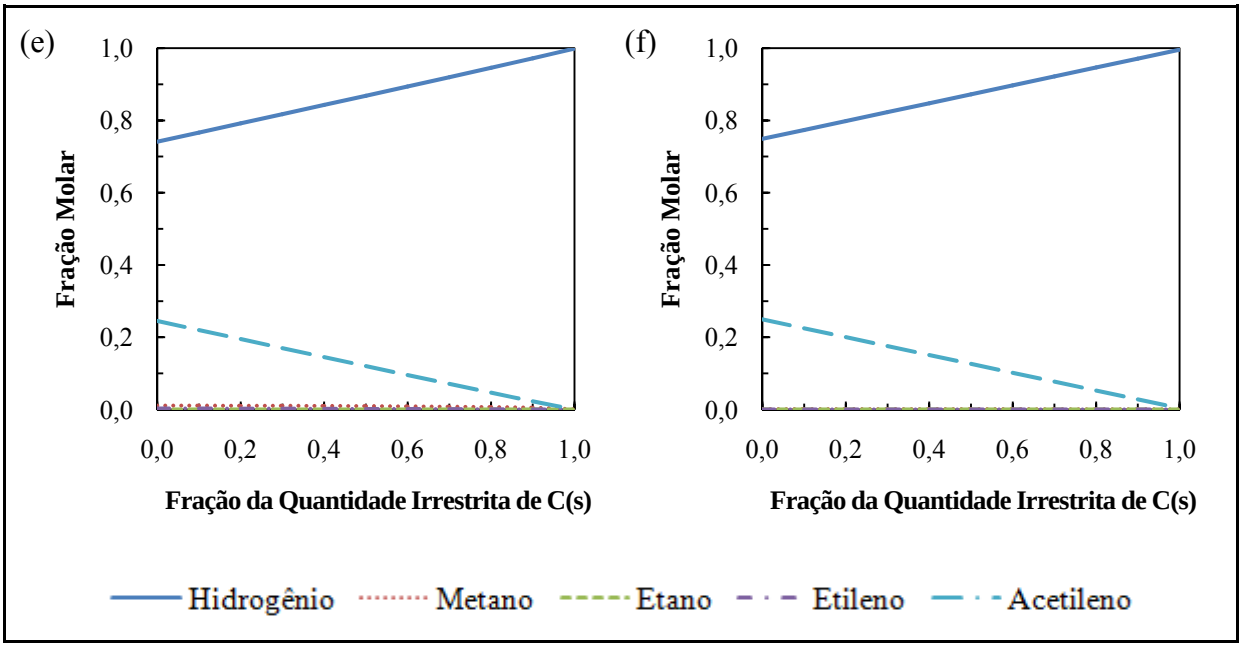
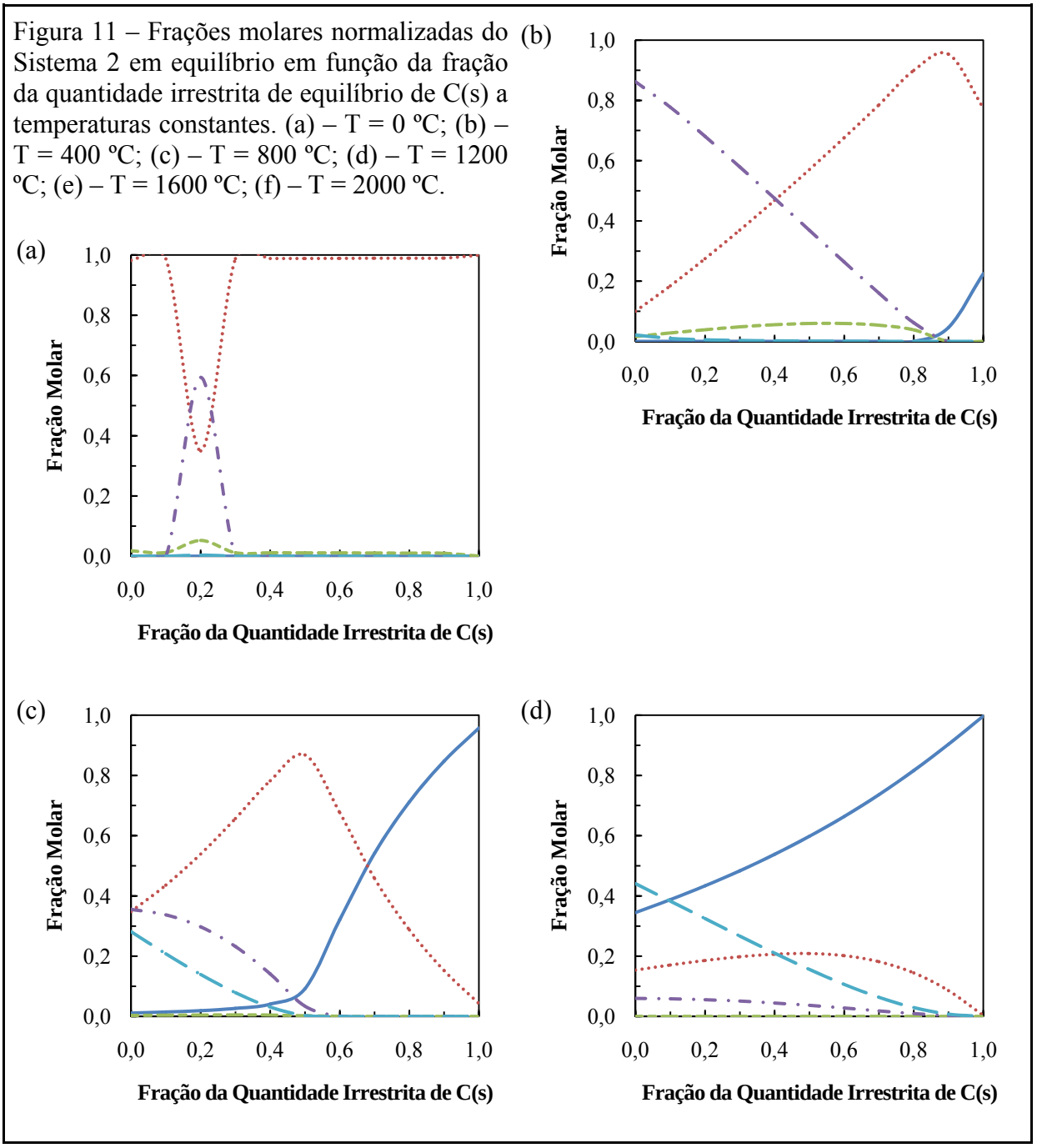

(e)
1,0
0,8
0,6
0,4
0,2
0,0
Fração Molar
0,0
0,2
0,4
0,6
0,8
1,0
Fração da Quantidade Irrestrita de C(s)
(f)
1,0
0,8
0,6
0,4
0,2
0,0
Fração Molar
0,0
0,2
0,4
0,6
0,8
1,0
Fração da Quantidade Irrestrita de C(s)
Hidrogênio
Metano
Etano
Etileno
Acetileno

Figura 11 – Frações molares normalizadas do Sistema 2 em equilíbrio em função da fração da quantidade irrestrita de equilíbrio de C(s) a temperaturas constantes. (a) – T = 0 ºC; (b) – T = 400 ºC; (c) – T = 800 ºC; (d) – T = 1200 ºC; (e) – T = 1600 ºC; (f) – T = 2000 ºC.



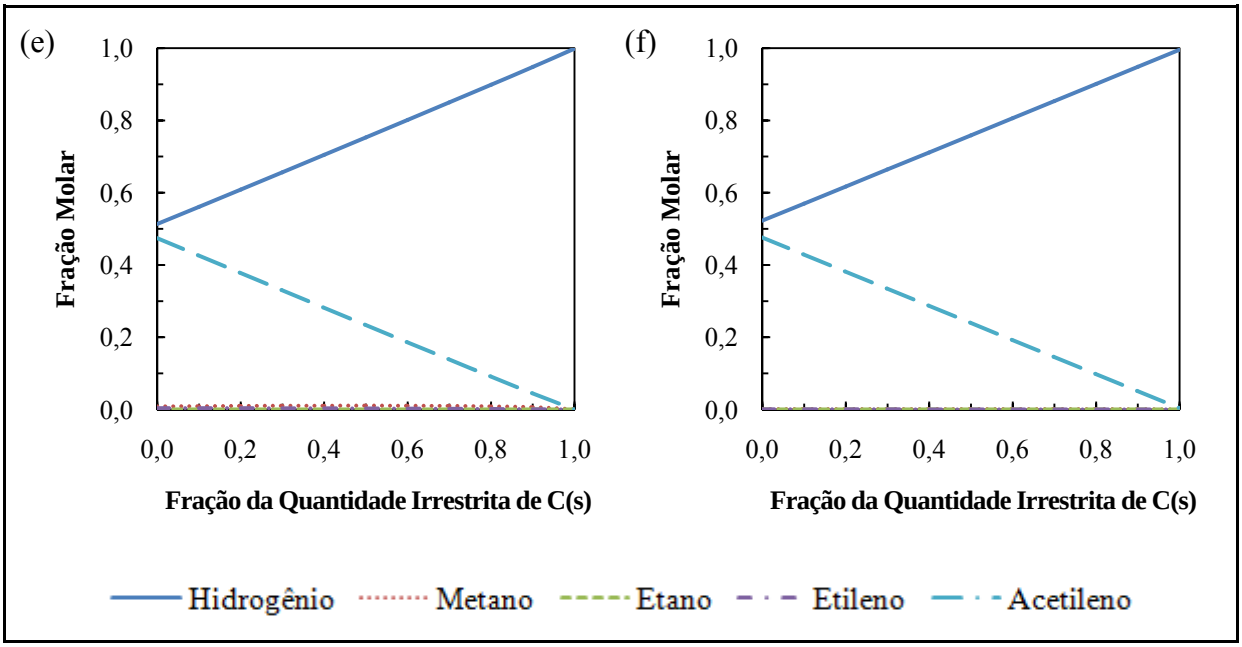
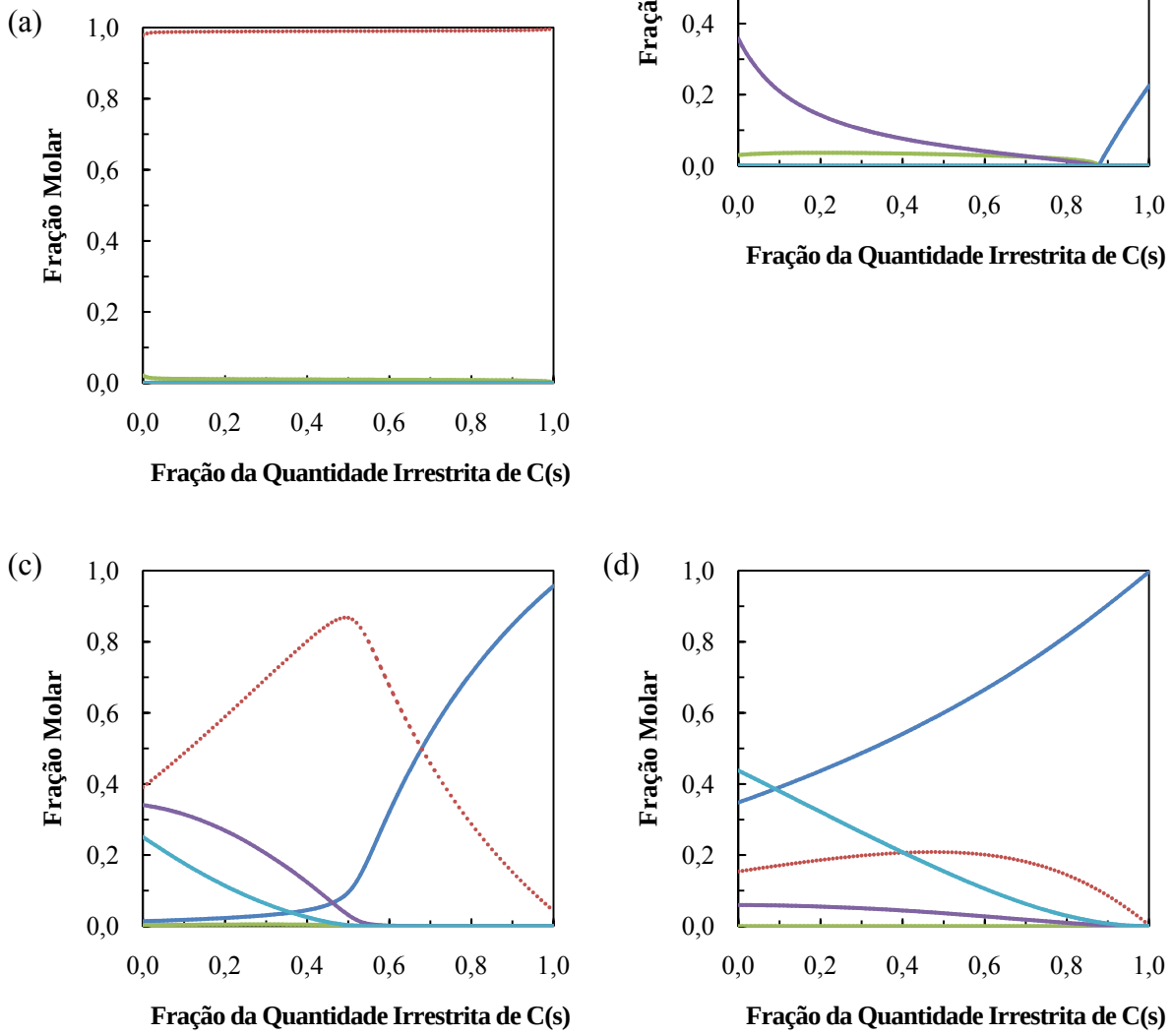

(e)
1,0
0,8
0,6
0,4
0,2
0,0
Fração Molar
0,0
0,2
0,4
0,6
0,8
1,0
Fração da Quantidade Irrestrita de C(s)
(f)
1,0
0,8
0,6
0,4
0,2
0,0
Fração Molar
0,0
0,2
0,4
0,6
0,8
1,0
Fração da Quantidade Irrestrita de C(s)
Hidrogênio
Metano
Etano
Etileno
Acetileno

Figura 12 – Frações molares normalizadas do Sistema 3 em equilíbrio em função da fração da quantidade irrestrita de equilíbrio de C(s) a temperaturas constantes. (a) – T = 0 ºC; (b) – T = 400 ºC; (c) – T = 800 ºC; (d) – T = 1200 ºC; (e) – T = 1600 ºC; (f) – T = 2000 ºC.



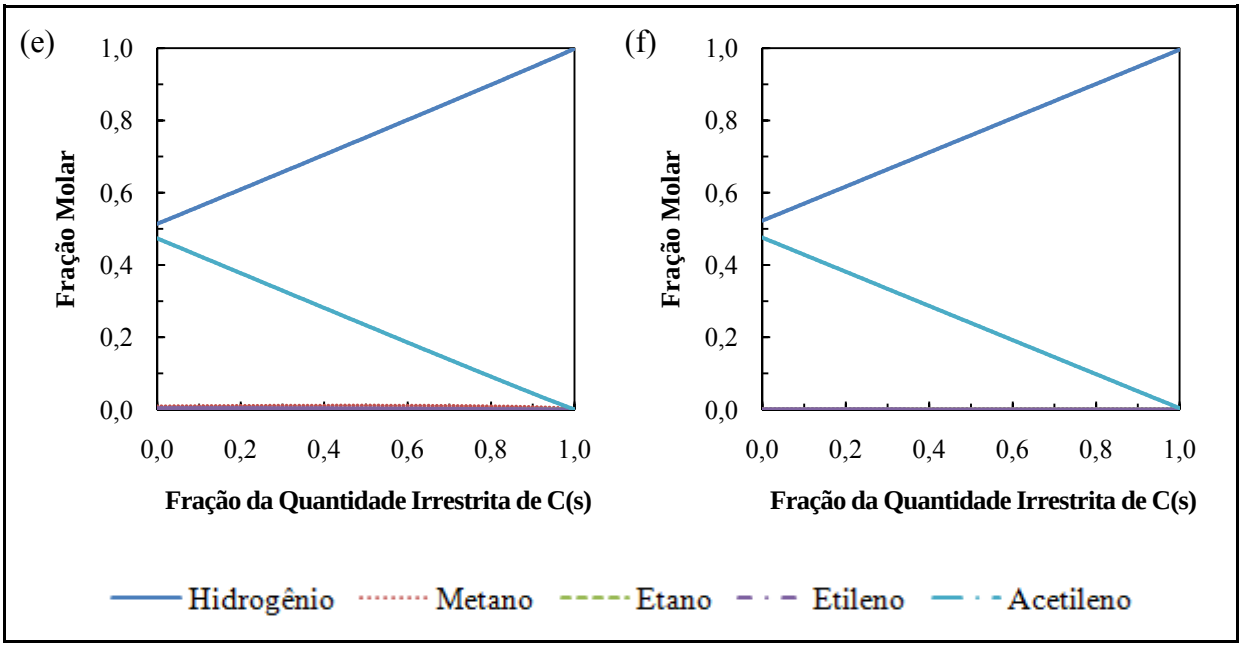
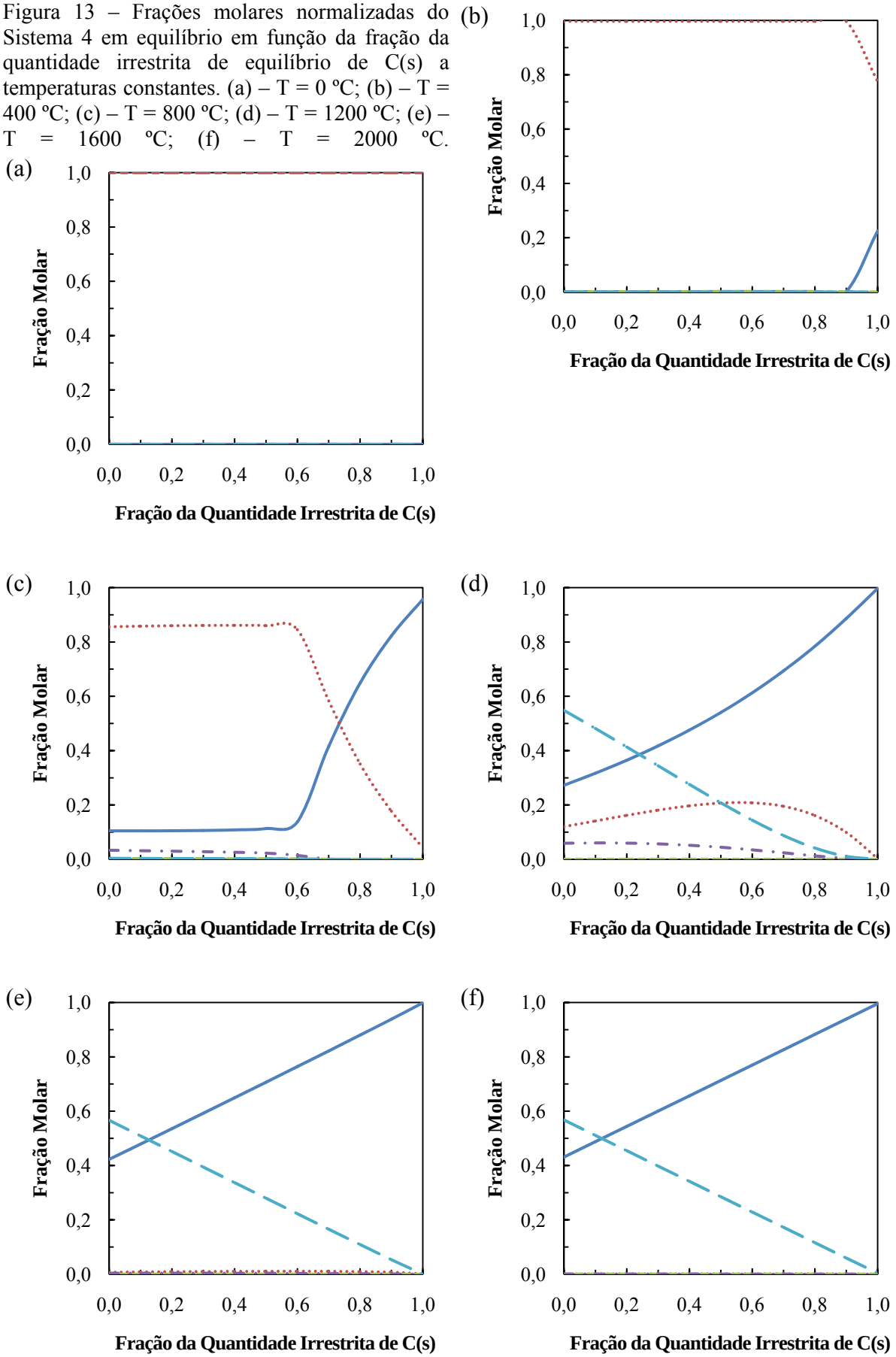

(e)
1,0
0,8
0,6
0,4
0,2
0,0
Fração Molar
0,0
0,2
0,4
0,6
0,8
1,0
Fração da Quantidade Irrestrita de C(s)
(f)
1,0
0,8
0,6
0,4
0,2
0,0
Fração Molar
0,0
0,2
0,4
0,6
0,8
1,0
Fração da Quantidade Irrestrita de C(s)
Hidrogênio
Metano
Etano
Etileno
Acetileno

Figura 13 – Frações molares normalizadas do Sistema 4 em equilíbrio em função da fração da quantidade irrestrita de equilíbrio de C(s) a temperaturas constantes. (a) – T = 0 ºC; (b) – T = 400 ºC; (c) – T = 800 ºC; (d) – T = 1200 ºC; (e) – T = 1600 ºC; (f) – T = 2000 ºC.



Hidrogênio Metano Etano Etileno Acetileno

As figuras mostram que, para todos os modelos composicionais propostos, as frações molares de algumas espécies em cenários intermediários da quantidade de C(s) diferem consideravelmente daquelas referentes aos casos base com 0 e 100% da quantidade irrestrita de equilíbrio de C(s) na maior parte da faixa de temperatura estudada. É possível, portanto, que a decomposição térmica do OMI seja mais bem representada em cenários intermediários de quantidade de C(s), ou seja, através do modelo com especificação da quantidade de C(s). Em outras palavras, as composições molares obtidas a partir destes cenários intermediários podem ser ainda mais adequadas do que aquelas obtidas a partir do cenário sem C(s), porém com a vantagem de proporcionar a formação de alguma quantidade de C(s), conforme observações empíricas. Vale notar, ainda, que, a baixas temperaturas, este comportamento somente se mantém para o Sistema 2.

Com exceção do etano, observa-se que as frações molares das espécies de interesse, em todos os sistemas, podem se mostrar bastante sensíveis à variação da quantidade de C(s), dependendo da temperatura de equilíbrio. Citando os casos mais extremos, observa-se, nas Figuras 11 e 12, referentes aos Sistemas 2 e 3, respectivamente, a variação da fração molar de hidrogênio de zero, quando a quantidade de C(s) é também igual a zero, até cerca de 0,95, quando a quantidade de C(s) é igual à irrestrita. Observa-se, ainda, que a fração molar de hidrogênio, em função da quantidade de C(s), apresenta comportamento não monotônico acentuado, para algumas temperaturas, nos Sistemas 2 e 3.

Finalmente, é possível observar que todos os sistemas em equilíbrio, a altas temperaturas, apresentam comportamento bastante similar, sendo compostos quase exclusivamente por hidrogênio e acetileno, cujas frações molares variam linearmente com a quantidade de C(s). Analisando-se as malhas completas de resultados de simulação, observa-se tal comportamento em todos os sistemas, para temperaturas superiores a 1400 ºC.

5.1.3 Avaliação do desempenho dos modelos de decomposição térmica do OMI

As Tabelas 2 a 4 apresentam medidas estatísticas descritivas da distribuição dos erros relativos médios ótimos calculados a partir dos respectivos valores ótimos do somatório dos quadrados dos resíduos relativos entre as frações molares preditas pelos modelos propostos e

as frações molares advindas do banco de dados da *IEC*. As medidas estatísticas apresentadas fornecem subsídios para uma avaliação quantitativa do desempenho dos diferentes modelos composicionais e de equilíbrio termodinâmico propostos. As tabelasapresentam medidas referentes às simulações nos cenários com quantidade irrestrita de C(s), sem C(s) e quantidade otimizada de C(s), respectivamente.

Tabela 2 – Medidas estatísticas descritivas da distribuição dos erros relativos médios ótimosreferentesao cenário com quantidade irrestrita de C(s).

Sistema	Erros relativos médios, %					
	Média	Mediana	Desvio Padrão	Mínimo	Máximo	Percentil 90
Sistema 1	8.72E+08	92	8.19E+09	64	8.75E+10	642
Sistema 2	8.70E+08	92	8.16E+09	64	8.72E+10	642
Sistema 3	8.70E+08	92	8.16E+09	64	8.72E+10	642
Sistema 4	8.70E+08	92	8.16E+09	64	8.72E+10	642

Tabela 3 – Medidas estatísticas descritivas da distribuição dos erros relativos médios referentes ao cenário sem C(s).

Sistema	Erros relativos médios, %					
	Média	Mediana	Desvio Padrão	Mínimo	Máximo	Percentil 90
Sistema 1	2.01E+11	81	2.17E+12	40	2.34E+13	1165
Sistema 2	6.97E+12	75	7.54E+13	50	8.16E+14	1948
Sistema 3	8.30E+12	77	8.98E+13	50	9.71E+14	1242
Sistema 4	4.79E+10	81	5.14E+11	51	5.56E+12	895

Tabela 4 – Medidas estatísticas descritivas da distribuição dos erros relativos médios referentes ao cenário com quantidade otimizada de C(s).

Sistema	Erros relativos médios, %					
	Média	Mediana	Desvio Padrão	Mínimo	Máximo	Percentil 90
Sistema 1	95	66	108	36	843	137
Sistema 2	67	57	46	34	400	76
Sistema 3	74	58	61	34	461	86
Sistema 4	80	59	86	34	842	102

É possível observar, analisando-se os dados das três tabelas, que os erros ótimos relatados são, generalizadamente, elevados. Isto se deve, principalmente, à contribuição dos resíduos relativos excessivamente altos nos casos com frações molares extremamente

pequenas, no banco de dados da *IEC*. Não obstante, como já mencionado anteriormente, erros relativamente altos eram esperados, pois os dados empíricos são obtidos de equipamentos em operação e não de experimentos planejados.

Os dados da Tabela2 corroboram com os resultados de simulação apresentados na Seção 5.1.1, tendo em vista que os quatro modelos composicionais propostos apresentaram medidas de erros bastante semelhantes. As medidas mostram, ainda, que os erros associados às simulações no cenário com quantidade irrestrita de C(s) são bastante elevados. Ainda que a mediana e o mínimo sejam relativamente baixos, os maiores erros obtidos se mostraram excessivamente elevados, como ilustram a média e o máximo. Mesmo o percentil 90, medida que expurga os maiores erros da distribuição, se mostrou elevado, indicando a ocorrência de quantidade considerável de erros elevados.

Contrariando as expectativas relatadas na Seção 5.1.1, a comparação das medidas apresentadas na Tabela3 com as medidas apresentadas na Tabela2 mostra que os erros associados às simulações no cenário sem C(s) são, geralmente, maiores do que os erros no cenário com quantidade irrestrita de C(s), como indicam os maiores valores de média e percentil 90, ainda que erros mais baixos tenham sido obtidos em alguns casos, como revela a comparação dos mínimos. Tal observação, apesar de não ser obtida intuitivamente a partir da avaliação qualitativa dos perfis de frações molares em função da temperatura, dada na Seção 5.1.1, reforça a constatação de que, na verdade, ambos os cenários de quantidade de C(s) são pouco adequados à modelagem da decomposição térmica do OMI.

Conforme o esperado, a Tabela4 mostra que o cenário com quantidade otimizada de C(s) leva a erros relativos médios significativamente menores do que os erros associados aos outros cenários. Desta forma, as medidas estatísticas apresentadas confirmam que a restrição da quantidade de C(s) no equilíbrio representa um aperfeiçoamento na modelagem da decomposição térmica do OMI. Ainda que o modelo com quantidade otimizada de C(s) introduza um parâmetro adicional para a solução do problema, é importante notar que ele também apresenta aperfeiçoamentos qualitativos e fundamentais quando comparado às abordagens de quantidade irrestrita de C(s) e quantidade de C(s) igual a zero, isto é, ele apresenta composições molares de equilíbrio comparáveis aos padrões típicos de defeitos incipientes e respeita a observação empírica de formação de C(s).

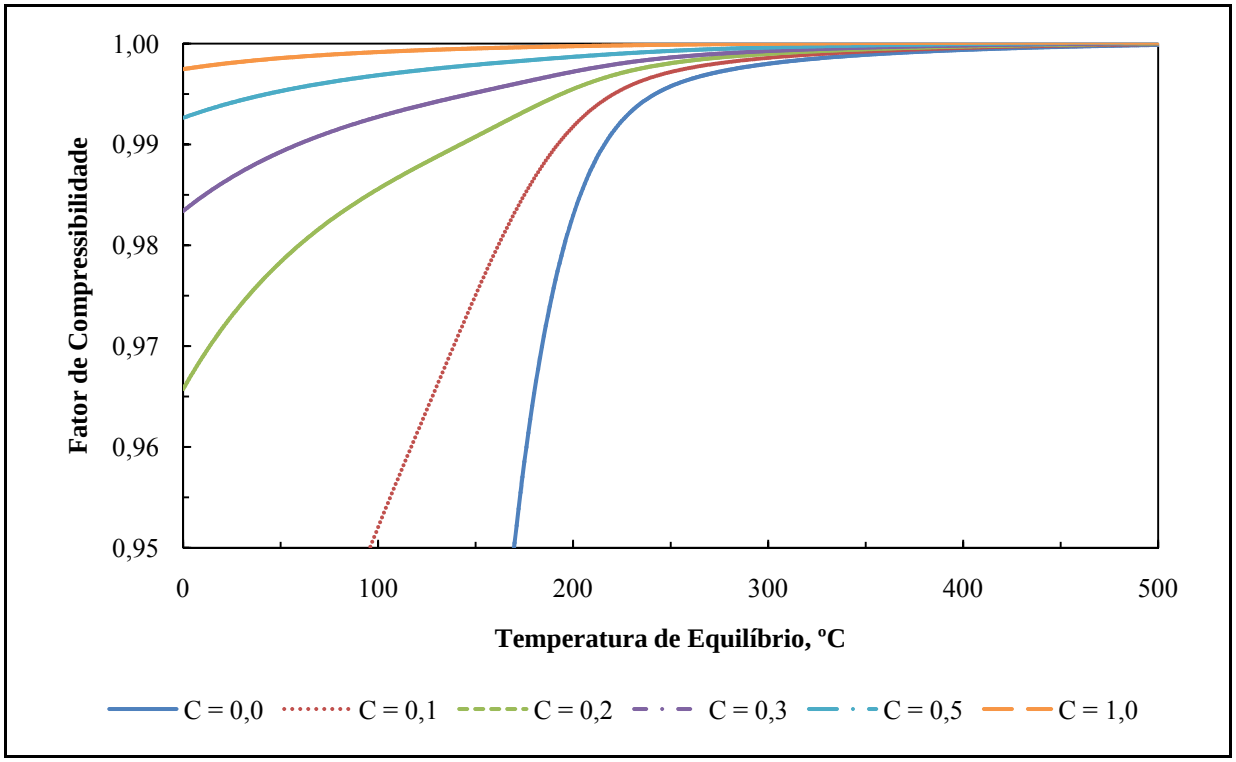
Os dados da Tabela4 também mostram que os Sistemas 2 e 3 são os modelos composicionais mais adequados, dentre os modelos propostos, para representar a decomposição do OMI, apresentando distribuições de erros relativos médios bastante semelhantes. O modelo composicional do Sistema 2 foi aquele cujas simulações apresentaram

os menores erros relativos médios. Ainda assim, tendo em vista que a pequena diferença entre as distribuições de erros dos Sistemas 2 e 3 pode ser consequência dos elevados erros associados aos dados empíricos e admitindo-se que, por ser um modelo composicional mais completo, o Sistema 3 tem maior potencial para representar adequadamente a decomposição do OMI, optou-se por focar o desenvolvimento da pesquisa, deste ponto em diante, no equilíbrio químico do Sistema 3.

5.1.4 Avaliação da validade da hipótese de gás ideal

A **Erro! Fonte de referência não encontrada.**14 apresenta os valores estimados para o fator de compressibilidade da mistura do Sistema 3 em equilíbrio, em função da temperatura de equilíbrio, para várias frações da quantidade irrestrita de equilíbrio de C(s), *C*, estas últimas feitas constantes.

Figura 14 – Fatores de compressibilidade do Sistema 3 em função da temperatura de equilíbrio a frações constantes da quantidade irrestrita de equilíbrio de C(s).



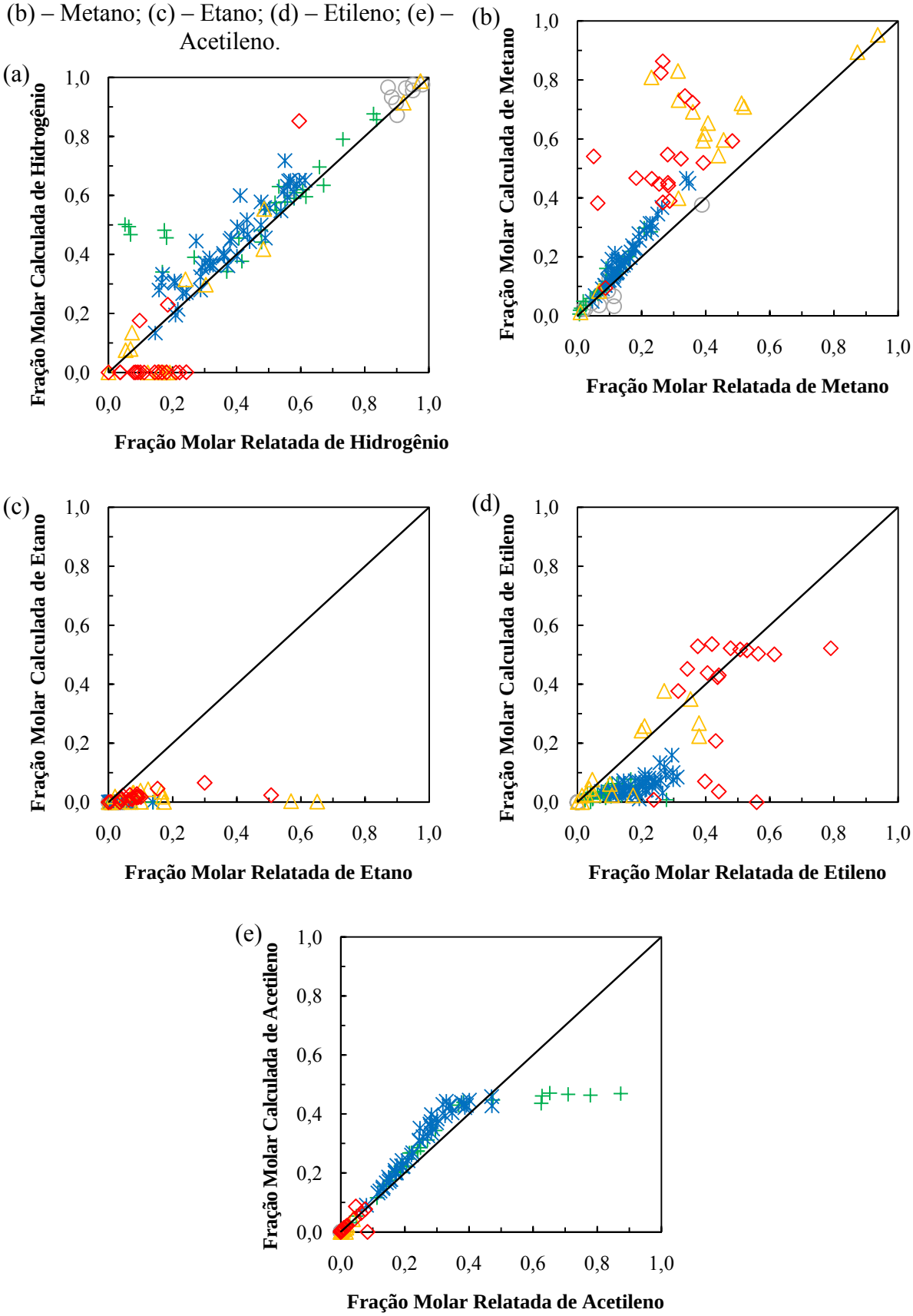
Sendo o fator de compressibilidade do gás ideal igual a um, a hipótese de comportamento de gás ideal é aproximadamente válida para fatores de compressibilidade próximos de um. Desta forma, pode-se admitir, com boa segurança, que a hipótese de gás ideal para o modelo de decomposição térmica do OMI correspondente à associação entre o modelo composicional proposto no Sistema 3 e o modelo termodinâmico com otimização da quantidade de C(s) é válida para temperaturas superiores a 200 ºC, para toda a faixa de *C*. A validade da hipótese é significativamente maior, a temperaturas mais baixas, para *C* maior do que 0,2.

Tendo em vista que, a temperaturas baixas, não é possível diferenciar a decomposição térmica do OMI associada à temperatura de operação normal do transformador da decomposição associada a um defeito incipiente, a hipótese de gás ideal assumida para o modelo, para fins de classificação de defeitos, é bastante razoável.

5.1.5 Comparação entre frações molares preditase frações molaresrelatadas

A **Erro! Fonte de referência não encontrada.**15 apresenta as frações molares ótimas, preditas com o Sistema 3 no cenário com quantidade otimizada de C(s), resultantes da minimização dos somatórios dos quadrados dos resíduos relativos em comparação aos 117 casos do banco de dados da *IEC*. Os gráficos apresentam as frações molares ótimas em função das frações molares relatadas para cada espécie de interesse.Os tipos de defeitos incipientes correspondentes estão identificados através dos diferentes símbolos. A **Erro! Fonte de referência não encontrada.**15 fornece, portanto, subsídios para a avaliação da adequação do modelo proposto aos dados da *IEC*, tanto por espécie de interesse, quanto por tipo de defeito.

Figura 15– Frações molares preditas versus frações molares relatadas. (a) – Hidrogênio; (b) – Metano; (c) – Etano; (d) – Etileno; (e) – Acetileno.



○DP +D1 ✳D2 △T1/T2 ◇T3

A **Erro! Fonte de referência não encontrada.**15 (a) indica que as frações molares preditas de hidrogênio mostraram boa concordância com os dados empíricos relatados, exceto para defeitos térmicos de alta temperatura, para os quais o modelo prevê uma ausência não relatada de hidrogênio. A **Erro! Fonte de referência não encontrada.**15 (b) indica que as frações molares preditas de metano também mostraram boa concordância com os dados relatados, porém, em muitos casos, os valores preditos foram maiores do que os dados relatados para defeitos térmicos. A **Erro! Fonte de referência não encontrada.**15 (c) indica que as frações molares preditas de etano mostraram pouca concordância com os dados relatados para todos os tipos de defeitos incipientes: todos os valores preditos pelo modelo foram muito menores do que os dados empíricos relatados, o que está de acordo com o comportamento observado nos perfis de frações molares de etano das Seções 5.1.1 e 5.1.2. A **Erro! Fonte de referência não encontrada.**15 (d) indica que as frações molares preditas de etileno mostraram, de um modo geral, alguma concordância com os dados relatados, ainda que o modelo tenda a superestimar as frações molares para defeitos térmicos e subestimar as frações molares para defeitos elétricos. A **Erro! Fonte de referência não encontrada.** (e) indica que as frações molares preditas de acetileno mostraram boa concordância com frações molares relatadas menores do que 0,45: para todos os dados relatados maiores do que este valor, o modelo prevê frações molares próximas a 0,45. Também é digno de nota que, exceto para as predições de frações molares de acetileno, todas as predições, para os casos de defeitos térmicos de alta temperatura, mostraram baixa concordância com os dados empíricos relatados.

A relativamente baixa aderência das frações molares preditas às frações molares dos casos do banco de dados da *IEC* é devida não somente a erros associados à modelagem do fenômeno, mas também a erros associados ao próprio banco de dados empíricos, conforme já mencionado. Especificamente para o caso do acetileno, vale notar que o comportamento observado na **Erro! Fonte de referência não encontrada.** (e) é semelhante ao que seria esperado quando do acúmulo de gases dissolvidos no OMI com o tempo, ou seja, as frações molares empíricas poderiam, com o tempo, alcançar valores maiores do que o máximo previsto pelo modelo de decomposição térmica. Estudos futuros sobre a contribuição destes fatores podem ajudar a esclarecer melhor esta discussão.

5.1.6 Avaliação deresultados do problema de otimização bidimensional

A fim de expor as características do problema de otimização bidimensional, a Figura apresenta os erros relativos médios de casos aleatoriamente selecionados, agrupados por suas classificações de defeitos, conforme banco de dados da *IEC*, em função do percentual da quantidade irrestritade equilíbrio de C(s). Em cada caso, a temperatura foi mantida constante em seu valor ótimo.

É possível observar que a função objetivo pode apresentar diferentes perfis, incluindo a ocorrência de mínimos locais. Sendo assim, a aplicação de um método de otimização do tipo força bruta proporcionou maior segurança na identificação dos mínimos globais, sem, contudo, demandar um esforço computacional proibitivo, tendo em vista os intervalos de busca relativamente pequenos.

É, também, interessante observar que o erro mínimo não foi obtido no cenário de C(s) irrestrito em nenhum destes casos.Na maioria dos casos, o erro mínimo foi obtido no cenário intermediário de quantidade de C(s), conforme o esperado, e, em alguns casos, o erro mínimo foi obtido no cenário de quantidade de C(s) igual a zero. Estendendo-se esta análise a todos os 117 casos apresentados no banco de dados da*IEC*, a otimização da quantidade de C(s) resultou em erros menores em 71,8% dos casos, quando comparados aos erros associados aos cenários com quantidades de C(s) irrestrita ou igual a zero. Nos outros 28,2% dos casos, os erros mínimos foram obtidos no cenário com quantidade de C(s) igual a zero. Em nenhum dos 117 casos, o erro mínimo foi obtido no cenário de quantidade de C(s) irrestrita. Como já afirmado anteriormente, o cenário com quantidade de C(s) irrestrita leva a um sistema em equilíbrio onde, essencialmente, estão presentesapenas as espécies hidrogênio e metano, o que, geralmente, não reproduz os dados empíricos relatados. Por tal motivo, o cenário com quantidade otimizada de C(s) configura-se em uma opção mais adequada frente ao cenário com quantidade irrestrita de C(s), para todos os casos do banco de dados da *IEC*.

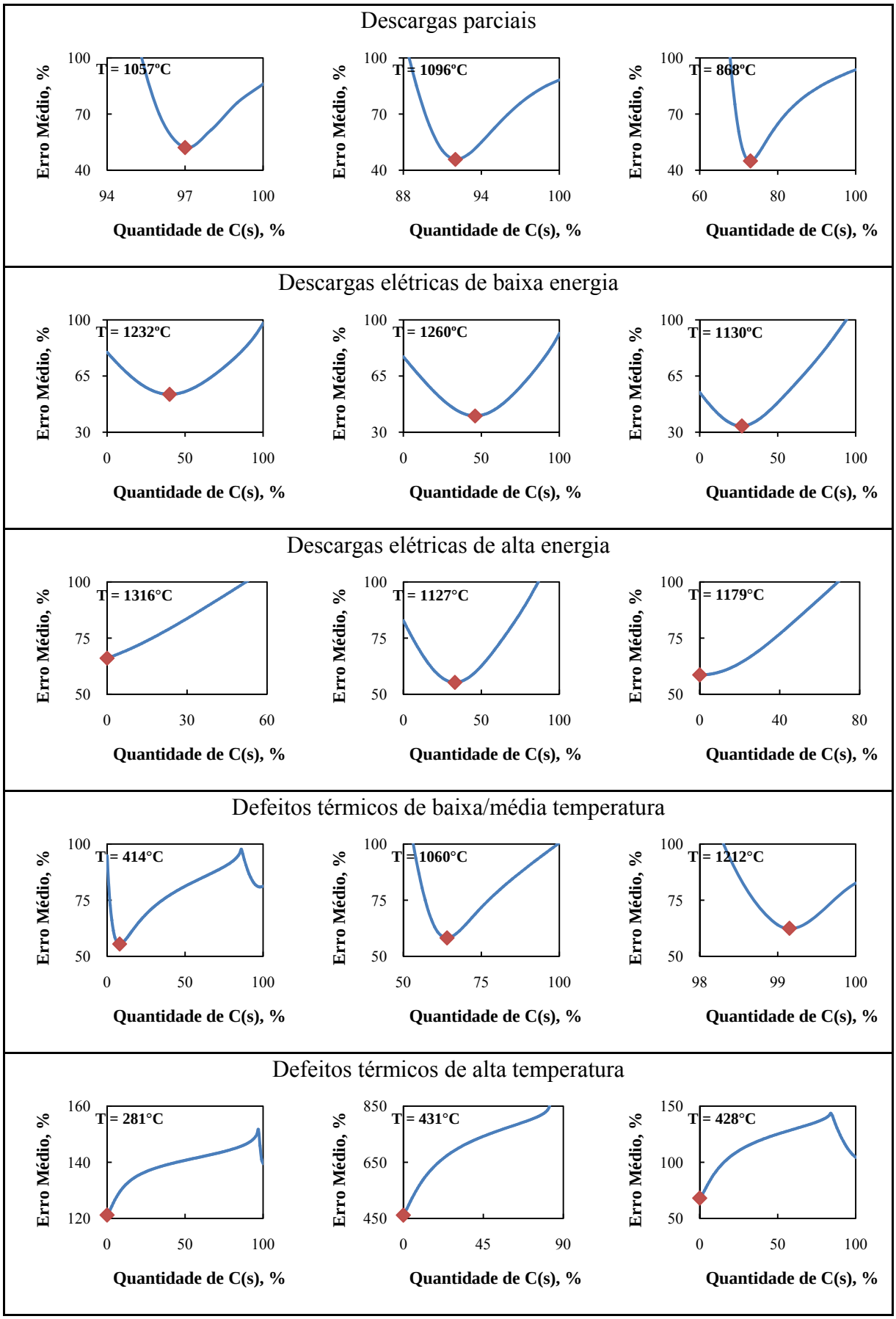


Figura 16– Erros relativos médios em funçãodo percentual da quantidade irrestrita de equilíbrio de C(s) a temperatura constante.

5.2 Método de Diagnóstico T-C

Esta seção contempla os resultados obtidos nas etapas de desenvolvimento do método de diagnóstico com base fenomenológica, o método T-C, conforme metodologia descrita no Capítulo 4.

5.2.1 Mapas de defeitos

A Figura 17 apresenta o mapa de defeitos incipientes, antes de ser dividido em regiões, onde DP significa descargas parciais, D1 significa descargas elétricas de baixa energia, D2 significa descargas elétricas de alta energia, T1/T2 significa defeitos térmicos de baixa/média temperatura e T3 significa defeitos térmicos de alta temperatura.O referido mapa de defeitos foi obtido a partir do ajuste, através da solução de problemas de otimização bidimensionais, do modelo de decomposição aos 117 padrões de gases dissolvidos do banco de dados da *IEC*. Vale ressaltar que o modelo de decomposição mencionado consiste da aplicação do Sistema 3 ao modelo termodinâmico com otimização da quantidade de C(s). Para a elaboração dos mapas de defeitos, foi utilizada a hipermatriz de frações molares preditas mais refinada, ou seja, a hipermatriz com dimensões 2001x101x5, com incrementos de 0,01 na fração da quantidade irrestrita de equilíbrio de C(s).

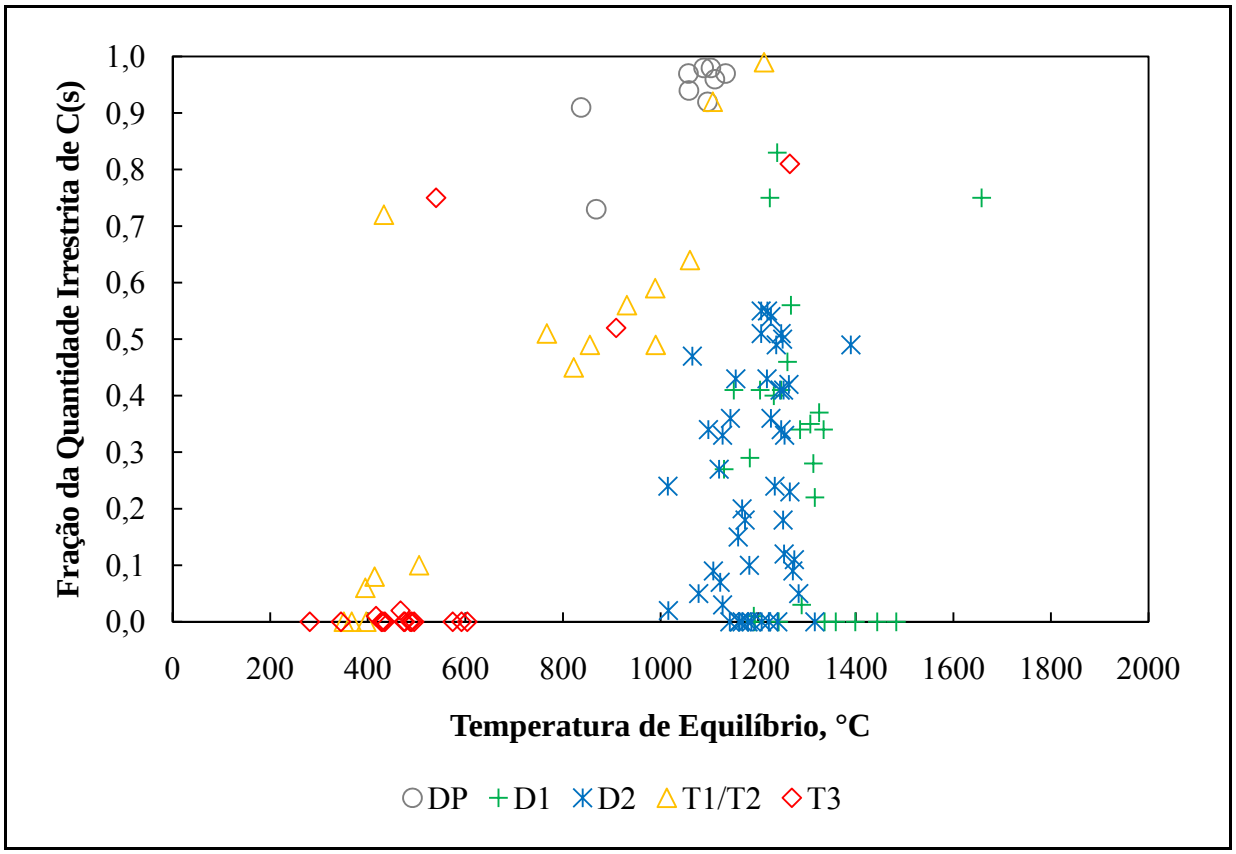


Figura 17– Mapa de defeitos incipientes sem subdivisões.

Observa-se que os dados empíricos se apresentam bem distribuídos no gráfico e que os binários T-C correspondentes aos defeitos incipientes dos tipos DP, defeitos térmicos, DT (T1/T2 e T3), e descargas elétricas, DE (D1 e D2), se apresentam agrupados, o que indica o potencial do método proposto em classificar defeitos incipientes por AGD. Observa-se, ainda, que a maioria dos dados de descargas parciais foi plotada em uma região do gráfico correspondente a elevadas frações da quantidade irrestrita de equilíbrio de C(s), os dados de defeitos térmicos foram plotados em regiões de baixas temperaturas e as descargas elétricas foram plotadas em regiões de altas temperaturas, o que corrobora qualitativamente com as características dos defeitos (4,5).

Uma inspeção visual da Figura 17 possibilitou a idealização de delimitações para separar os dados plotados em 3 regiões triangulares, visando à maximização de diagnósticos corretos do método T-C: i) A região de DP corresponde ao triângulo com vértices em (830; 1), (830; 0,6) e (1218; 1), ii) a região de DT corresponde ao triângulo com vértices em (1218; 1), (250; 0) e (900; 0) e iii) a região de DE corresponde ao triângulo com vértices em (900; 0), (1570; 0) e (1218; 1). Além disso, regiões debinários T-C pouco prováveis, isto é, baixa temperatura-elevada fração deC(s) e alta temperatura-baixa fração de C(s), que correspondem a padrões de gases dissolvidos teoricamente pouco prováveis, se mostraram não povoadas e

não fornecem classificação de defeitos. A partir destas observações, a Figura 18 apresenta o mapa de defeitos incipientes dividido nas regiões de DP, DT e DE.

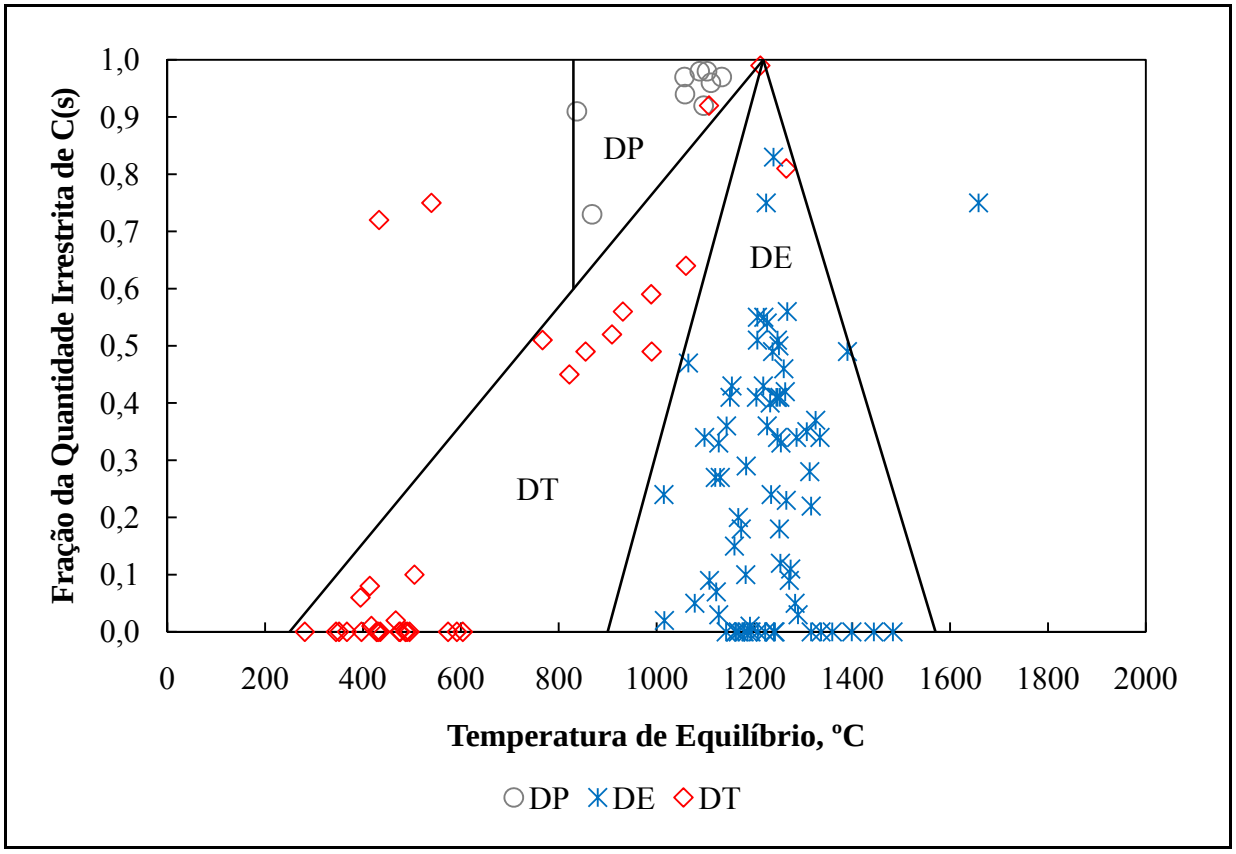


Figura 18– Mapa de defeitos incipientes subdividido em três regiões de defeitos.

A Figura 19 apresenta o mapa de defeitos incipientes dividido nas regiões DP, T1/T2, T3, D1 e D2, de acordo com os tipos de defeitos incipientes listados no banco de dados da *IEC*. Novamente, o procedimento de delimitação das regiões no mapa foi executado visando à maximização do desempenho do método T-C.

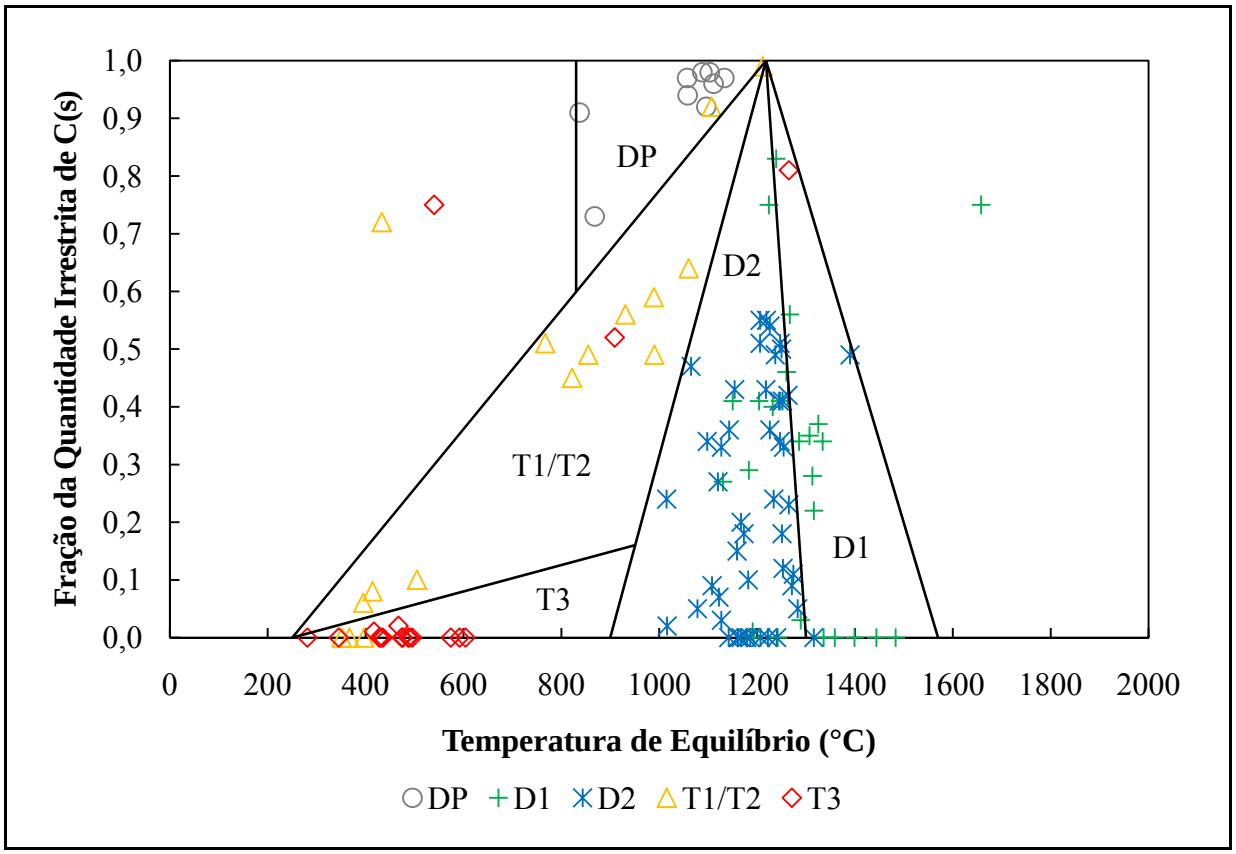


Figura 19– Mapa de defeitos incipientes subdividido em cinco regiões de defeitos.

Na Figura 19, a região DT da Figura 18 foi subdividida nas regiões T1/T2 e T3 por uma reta passando pelos pontos (250; 0) e (950; 0,16). Da mesma forma, a região DE foi subdividida nas regiões D1 e D2 por uma reta passando pelos pontos (1218; 1) e (1300; 0).

O procedimento geral para a aplicação do método T-C está descrito no APÊNDICE A.

5.2.2 Análise de desempenho do método T-C

ATabela 5 apresenta os percentuais de diagnósticos corretos dados pelo método T-C e pelos métodos de Rogers, de Doernenburg, da *IEC* e de Duval, resultantes da classificação dos casos do banco de dados da *IEC* nos três tipos de defeitos da divisão menos refinada.

Tabela 5– Desempenho dos métodos na classificação em três tipos de defeitos.

Método de diagnóstico	Diagnósticos corretos (%)
T-C (método proposto)	96
Rogers	57
Doernenburg	63
IEC	76
Duval	99

Como visto na Tabela 5, o método T-C apresentou desempenho bastante superior, na classificação em três regiões, em comparação aos desempenhos dos três métodos clássicos baseados em razões: Rogers, Doernenburg e *IEC*. Já em comparação ao método de Duval, o método T-C apresentou um desempenhobastante próximo, apesar um pouco inferior.

A Tabela 6 apresenta o desempenho dos métodos na classificação dos casos do banco de dados da *IEC*nos cinco tipos de defeitos da divisão mais refinada.

Observa-se uma perda de desempenho generalizada na Tabela 6 em comparação à Tabela 5, conforme o esperado em uma classificação mais refinada. A inspeção da Figura 19 revela que os dados de DE não puderam ser satisfatoriamente separados em D1 e D2, o que, certamente, impacta, no percentual de diagnósticos corretos. Tal observação pode indicar que outros parâmetros além de temperatura e fração da quantidade irrestrita de equilíbrio de C(s) se fazem necessários para uma separação mais adequada deste tipo de defeitos.

Além disso, a padronização conservadora das respostas dos métodos de diagnóstico, anteriormente citada, levou às relativamente pequenas diferenças entre os desempenhos nas classificações em 3 e em 5 regiões, observadas para alguns destes métodos. O caso mais extremo foi observado para o método de Doernenburg, para o qual o desempenho nas classificações em 3 e em 5 regiões é o mesmo.

Tabela 6– Desempenho dos métodos na classificação em cinco tipos de defeitos.

Método de diagnóstico	Diagnósticos corretos (%)
T-C (método proposto)	80
Rogers	53
Doernenburg	63
IEC	69
Duval	89

Em ambas as classificações, em 3 e em 5 regiões, o desempenho dos métodos de Rogers, de Doernenburg e da *IEC*, os métodos baseados em razões, claramente se mostraram inferiores quando comparados aos métodos de Duval e T-C, não baseados em razões. Como a seleção das razões é baseada no modelo de Halstead (6), os desempenhos apresentados podem ser um indício de que a baixa concordância deste modelo com os dados empíricos prejudica a qualidade dos métodos de diagnóstico ou ainda que informações relevantes sejam perdidas quando da transformação das concentrações dos gases dissolvidos em razões.

O método de diagnóstico de Duval, por sua vez, apresentou os maiores desempenhos. No entanto, trata-se de um método empírico e, portanto, a qualidade de suas predições está limitada à qualidade e à abrangência dos dados empíricos base. O método de Duval não identifica regiões de classificação desconhecida ou sem classificação, o que implica que qualquer conjunto de concentrações de gases dissolvidos será classificado como um defeito, mesmo um conjunto teoricamente improvável. Além disso, este método descarta duas dimensões do problema, as concentrações de H_2 e C_2H_6, e é possível que informações relevantes sejam perdidas neste processo.

Por outro lado, o método de diagnóstico T-C é baseado em modelosde equilíbrio termodinâmico e composicional mais adequados, quando comparados aos de Halstead, e todas as informações de gases dissolvidos fornecidas são exploradas, tendo em vista que o método aplica as concentrações das 5 espécies de interesse para calcular os binários T-C correspondentes. A base fenomenológica do método torna possível estabelecer inferências úteis, a saber: as regiões, já descritas, correspondentes a concentrações de gases dissolvidos teoricamente improváveis podem ser utilizadas para se verificar a validade dos resultados de um ensaio de gases dissolvidos, já que dados válidos não deveriam ser observados nestas regiões. Em relação ao desempenho, deve-se observar que os resultados do método T-C foram impactados de maneira negativa pela falta de regiões de múltiplos defeitos, tendo em vista que os critérios conservadores adotados beneficiaram os métodos de diagnóstico que apresentam tais regiões. Ainda assim, o método T-C exibiu desempenho próximo ao desempenho do método de Duval. Finalmente, o procedimento para a aplicação do método T-C pode parecer mais complexo do que aqueles dos métodos clássicos, porém esta questão é facilmente superada se o método T-C for implementado através de uma rotina computacional ou mesmo de uma planilha eletrônica.

Por fim, é válido lembrar que o banco de dados da*IEC* foi construído a partir de informações oriundasde equipamentos em operação e os padrões calculados estão sujeitos a erros intrínsecos, conforme discutido na Seção 1.3.1. Portanto, é possível que alguns dados

empíricos tenham sido incorretamente classificados, o que, por sua vez, contribuiria para a localização incorreta de alguns binários T-C nos mapas de defeitos incipientes e, em última análise, para uma redução do desempenho do método de diagnóstico proposto.

CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou e avaliou diferentes propostas de modelagem termodinâmica e composicional para a decomposição térmica do óleo mineral isolante. Um novo método de diagnóstico por análise de gases dissolvidos, o método T-C, desenvolvido a partir de um modelo mais adequado do que as opções existentes na literatura, aprimorado com uma contribuição inspirada na cinética do fenômeno de decomposição térmica do óleo mineral isolante foi proposto e avaliado. Uma comparação entre o novo método de diagnóstico e os métodos clássicos foi conduzida com sucesso, resultando, ainda, em discussões a respeito das bases fundamentais destes métodos.

Os perfis de frações molares em função da temperatura, obtidos nos cenários de quantidade de C(s) no equilíbrio disponíveis na literatura, mostraram, em uma avaliação qualitativa inicial, que o cenário com quantidade irrestrita de C(s) apresentava pouca concordância com os dados empíricos e, ainda, que o cenário com quantidade de C(s) igual a zero teria maior potencial para representar adequadamente a decomposição térmica do óleo mineral isolante. No entanto, em uma avaliação quantitativa subsequente, ambos os cenários de quantidade de C(s) no equilíbrio se mostraram pouco adequados para representar o fenômeno.

O modelo de decomposição térmica com especificação da quantidade de C(s), isto é, quando, além da temperatura, a quantidade de equilíbrio de C(s) é também especificada, foi capaz de se adaptar a ambas as hipóteses disponíveis na literatura quanto à quantidade de C(s) no equilíbrio. Além disso, o modelo proposto tornou possível a simulação de cenários intermediários da quantidade de C(s) no equilíbrio, com o objetivo de levar em consideração, de certa forma, a cinética do fenômeno. Os resultados de simulação bidimensional, obtidos com este modelo, mostraram maior concordância com os dados empíricos do que os resultados obtidos a partir dos modelos clássicos disponíveis na literatura.

O modelo termodinâmico com otimização da quantidade de C(s) proposto provou ser um avanço na reprodução de dados empíricos quando associado a um modelo composicional adequado. Neste trabalho, o modelo composicional, cujas moléculas do óleo mineral isolante eram representadas por $C_{20}H_{42}$, que, por sua vez, se degradava em 59 espécies foi considerado o mais adequado.Os resultados de simulação obtidos com o modelo com otimização da quantidade de C(s) foram aplicados, com sucesso, no desenvolvimento de um método de diagnóstico com base fenomenológica, o método T-C.

A comparação entre os desempenhos dos métodos revelou que o método T-C obteve êxito satisfatório em classificar diferentes tipos de defeitos incipientes através da minimização dos resíduos entre os padrões de gases dissolvidos e as predições do modelo de decomposição do óleo para a obtenção das temperaturas de equilíbrio e das frações das quantidades irrestritas de equilíbrio de C(s) ótimos, os binários T-C. O desempenho do método T-C na classificação de defeitos associadosaos dados de gases dissolvidos, mostrou-se consideravelmente superior aos desempenhos dos métodos de Rogers, de Doernenburg e da *IEC*, os métodos de razões, mas ligeiramente inferior ao desempenho do método de Duval.

Os baixos desempenhos dos métodos de razões indicam que ou o modelo de decomposição que os serve de base ou a utilização de razões de concentrações podem não ser as escolhas mais adequadas.

Ainda que o método de Duval tenha apresentado os maiores desempenhos, a base fenomenológica do método T-C não deve ser menosprezada, pois ela possibilita estabelecer inferências teóricas úteis, que permitem, por exemplo, verificar a validade dos resultados de ensaios de gases dissolvidos.

Finalmente, mesmo que o método T-C tenha sido satisfatoriamente empregado na classificação de defeitos incipientes, estudos adicionais se fazem necessários visando o desenvolvimento de um modelo de decomposição ainda mais adequado, especialmente em relação à baixa concordância das frações molares preditas de etano com os dados empíricos relatados, aos desvios encontrados nos casos de defeitos térmicos de alta temperatura e à difícil separação entre descargas elétricas de baixa e de alta energias.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Durante o desenvolvimento deste trabalho de pesquisa, foram observadas algumas oportunidades para novos trabalhos na área, a saber:

1) Construir bancos de dados maiores e mais confiáveis com concentrações de gases dissolvidos associadas a defeitos incipientes;

2) Desenvolver um modelo de decomposição térmica do óleo mineral isolante que considereo acúmulo de gases dissolvidos com o tempo, para fins de classificação de defeitos;

3) Desenvolver um modelo de decomposição térmica do óleo mineral isolante que considere a ocorrência simultânea de múltiplos defeitos incipientes;

4) Desenvolver um modelo de decomposição térmica do óleo mineral isolante que forneça uma estimativa sobre o tamanho da área do equipamento afetada por um defeito incipiente;

5) Desenvolver modelos de decomposição térmica e métodos de diagnóstico com base fenomenológica, também, para óleo vegetal isolante e para óleo sintético isolante.

REFERÊNCIAS

ROGERS, R. R. IEEE and IEC Codes to Interpret Incipient Faults in Transformers, Using Gas in Oil Analysis. *IEEE Trans. Electr. Insul.*, v. EI-13, n. 5, p. 349-354, out. 1978.

ASTM INTERNATIONAL, *D923 – 07*: Standard Practices for Sampling Electrical Insulating Liquids. West Conshohocken, 2007.

ASTM INTERNATIONAL, *D3612 – 02 (2009)*: Standard Test Method for Analysis of Gases Dissolved in Electrical Insulating Oil by Gas Chromatography. West Conshohocken, 2009.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMISSION, *IEC 60599:1999+A1:2007*: Mineral Oil-Impregnated Electrical Equipment in Service – Guide to the Interpretation of Dissolved and Free Gases Analysis. Geneva, CHE, 2007.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS, *IEEE Std C57.104-2008*: IEEE Guide for the Interpretation of Gases Generated in Oil-Immersed Transformers. New York, 2009.

HALSTEAD, W. D. Thermodynamic Assessment of the Formation of Gaseous Hydrocarbons in Faulty Transformers. *J. Inst. Pet.*, v. 59, n. 569, p. 239-241, set. 1973.

LOWE, R. I. Artificial Intelligence Techniques Applied to Transformer Oil Dissolved Gas Analysis. In: INTERNATIONAL CONFERENCE OF DOBLE CLIENTS, 1985, Boston, MA. *Proceedings of the 1985 International Conference of Doble Clients*.Watertown, MA: Doble Engineering Company, 1985.

BARRETT, K. A. Dissolved Gas-in-oil Analysis – An Expert System.In: INTERNATIONAL CONFERENCE OF DOBLE CLIENTS, 1989, Boston, MA. *Proceedings of the 1989 International Conference of Doble Clients*.Watertown, MA: Doble Engineering Company, 1989.

TOMSOVIC, K.; TAPPER, M.; INGVARSSON, T. A Fuzzy Information Approach to Integrating Different Transformer Diagnostic Methods.*IEEE Trans. Power Delivery*, v. 8, n. 3, p. 1638-1646, jul. 1993.

ZHANG, Y.; DING, X.; LIU, Y.; GRIFFIN, P. J. An Artificial Neural Network Approach to Transformer Fault Diagnosis.*IEEE Trans. Power Delivery*, v. 11, n. 4, p. 1836-1841, out. 1996.

WANG, Z.; LIU, Y.; GRIFFIN, P. J. A Combined ANN and Expert System Tool for Transformer Fault Diagnosis. *IEEE Trans. Power Delivery*, v. 13, n. 4, p. 1224-1229, out. 1998.

HUANG, Y.-C. A New Data Mining Approach to Dissolved Gas Analysis of Oil-Insulated Power Apparatus.*IEEE Trans. Power Delivery*, v. 18, n. 4, p. 1257-1261, out. 2003.

FEI, S.-w.; WANG, M.-J.; MIAO, Y.-b.; TU, J.; LIU, C.-l. Particle swarm optimization-based support vector machine for forecasting dissolved gases content in power transformer oil. *Energy Convers.Manage.*, v. 50, p. 1604-1609, 2009.

FEI, S.-w.; ZHANG, X.-b. Fault Diagnosis of Power Transformer Based on Support Vector Machine with Genetic Algorithm. *Expert Syst. Appl.*, v. 36, p. 11352-11357, 2009.

WU, H.; LI, X.; WU, D. RMP Neural Network Based Dissolved Gas Analyzer for Fault Diagnostic of Oil-filled Electrical Equipment. *IEEE Trans. Dielectr. Electr.Insul.*, v. 18, n. 2, p. 495-498, abr. 2011.

MIRANDA, V.; CASTRO, A. R. G.; LIMA, S. Diagnosing Faults in Power Transformers with Autoassociative Neural Networks and Mean Shift. *IEEE Trans. Power Delivery*, v. 27, n. 3, p. 1350-1357, jul. 2012.

KIM, S.-w.; KIM, S.-j.; SEO, H.-d.; JUNG, J.-r.; YANG, H.-j.; DUVAL, M. New Methods of DGA Diagnosis using IEC TC 10 and Related Databases Part 1: Application of Gas-ratio Combinations. *IEEE Trans. Dielectr. Electr.Insul.*, v. 20, n. 2, p. 685-690, abr. 2013.

LEE, S.-j.; KIM, Y.-m.; SEO, H.-d.; JUNG, J.-r.; YANG, H.-j.; DUVAL, M. New Methods of DGA Diagnosis using IEC TC 10 and Related Databases Part 2: Application of Relative Content of Fault Gases. *IEEE Trans. Dielectr. Electr.Insul.*, v. 20, n. 2, p. 691-696, abr. 2013.

NYNÄS NAPHTHENICS AB. *Transformer Oil Handbook*. 1. ed. Sweden: Nynäs Naphthenics AB, 2004.

COLTMAN, J. W. The Transformer.*IEEE Ind. Appl. Mag.*, v. 8, n. 1, p. 8-15, jan./fev. 2002.

GUARNIERI, M. Who Invented the Transformer?.*IEEE Ind. Electron. Mag.*, v. 7, n. 4, p. 56-59, dez. 2013.

DUVAL, M.;DEPABLO, A. Interpretation of Gas-in-oil Analysis Using New IEC Publication 60599 and IEC TC 10 Databases. *IEEE Electr. Insul. Mag.*, v. 17, n. 2, p. 31-41, mar./abr. 2001.

SHIRAI, M.; SHIMOJI, S.; ISHII, T. Thermodynamic Study on the Thermal Decomposition of Insulating Oil. *IEEE Trans. Electr. Insul.*,v. EI-12, n. 4, p. 272-280, ago. 1977.

BARTNIKAS, R. *Engineering Dielectrics*. Chelsea, MI: ASTM International, 1994. 8 v. V. 3: Electrical Insulating Liquids.

SMITH, J. M.; VAN NESS, H. C.; ABBOTT, M. M. *Introdução à Termodinâmica da Engenharia Química*. 7. ed. New York: McGraw-Hill, 2004.

POLING, B. E.; PRAUSNITZ, J. M.; O'CONNELL, J. P. *The Properties of Gases and Liquids*., 5. ed. New York: McGraw-Hill, 2001.

PRESS, W. H.; TEUKOLSKY, S. A.; VETTERLING, W. T.; FLANNERY, B. P.; *Numerical Recipes*: The Art of Scientific Computing. 3. ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.

ASTM COMMITTEE D-27. *Research Report RR # D27-1016*: Inter-Laboratory Study to Establish Precision Statements for ASTM D3612, Standard Test Method for Analysis of Gases Dissolved in Electrical Insulating Oil by Gas Chromatography. West Conshohocken: ASTM International, 2003. 86 p. Relatório técnico.

APÊNDICE A – Procedimento de aplicação do método T-C

O procedimento geral de aplicação do método T-C de diagnóstico por AGD é descrito a seguir. Adicionalmente, para aqueles que tiverem interesse, será disponibilizada uma planilha eletrônica para a pronta implementação do método a partir de um dado conjunto de concentrações de gases dissolvidos. Para obter a planilha, basta uma simples solicitação através do e-mail viniciusgmc@hotmail.com.

Procedimento de Aplicação do Método T-C:

1) Compare a concentração de cada espécie de interesse (H_2, CH_4, C_2H_6, C_2H_4 e C_2H_2) com os respectivos valores máximos aceitáveis. Recomenda-se adotar como valores típicos máximos os percentis 90 das concentrações; (4)

2) Se, pelo menos, uma dentre as concentrações dos gases exceder o valor máximo aceitável, vá para o passo 3. Caso contrário, não há evidência suficiente da existência de um defeito e o equipamento pode ser considerado "Normal";

3) Transforme o conjunto de concentrações em um padrão de gases dissolvidos através do cálculo das frações molares aproximadas normalizadas $\overline{y}_i$, como segue, onde c é a concentração volumétrica da espécie de interesse:

$$\overline{y}_i = \frac{c_i}{\sum_l c_l}$$

4) Resolva o problema de otimização para encontrar o binário T-C que minimiza o somatório dos quadrados dos resíduos relativos entre o padrão predito pelo modelo e o padrão calculado no passo 3. As predições são obtidas através da resolução do sistema de equações do modelo de equilíbrio com especificação da quantidade de C(s). Alternativamente, o usuário pode resolver o sistema de equações, uma única vez, para os intervalos de interesse completos de temperatura, T, e de fração da quantidade irrestrita de equilíbrio de C(s), C, e salvar os resultados para facilitar consultas futuras;

5) Construa o mapa de defeitos incipientes plotando as retas que delimitam as regiões de defeitos, conforme a Figura 19. Plote o binário T-C obtido no mapa de defeitos incipientes;

6) Classifique o defeito incipiente existente em “Descargas parciais (DP)”, “Defeito térmico de baixa/média temperatura (T1/T2)”, “Defeito térmico de alta temperatura (T3)”, “Descargas elétricas de baixa energia (D1)”, “Descargas elétricas de alta energia (D2)” ou “Defeito não identificável”, em função da região em que o binário T-C tenha sido plotado. Cabe ressaltar que as regiões de defeitos não identificáveis podem, também, caracterizar incoerência nas concentrações de gases dissolvidos informadas.

APÊNDICE B – Produção científica

Neste apêndice, apresenta-se a produção científica originada a partir da pesquisa desenvolvidano curso de mestrado. Dois artigos científicos foram submetidos e aprovados para publicação, conforme referências listadas a seguir.

CRUZ, V. G. M.; COSTA, A. L. H.; PAREDES, M. L. L. Simulation of Thermal Decomposition of Mineral Insulating Oil.*Braz. J. Chem. Eng.*, aprovado em 2014para publicação.

CRUZ, V. G. M.; COSTA, A. L. H.; PAREDES, M. L. L.Development and Evaluation of a New DGA Diagnostic Method Based on Thermodynamics Fundamentals.*IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, aprovado em 2014para publicação.