

## DETECÇÃO, DIAGNÓSTICO E CORREÇÃO DE FALHAS: UMA PROPOSIÇÃO CONSISTENTE DE DEFINIÇÕES E TERMINOLOGIAS

*DETECTION, DIAGNOSIS AND FAULT CORRECTION: A CONSISTENT PROPOSITION OF DEFINITIONS AND TERMINOLOGY*

Isabel Sartori<sup>1</sup>, Carolina Azerêdo Amaro<sup>2</sup>, Maurício Bezerra de Souza Júnior<sup>3</sup>, Marcelo Embiruçu<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal da Bahia, Programa de Engenharia Industrial.

E-mail: sartori@ufba.br

<sup>2</sup>Universidade Federal da Bahia, Programa de Engenharia Industrial.

E-mail: carol.amaro@gmail.com

<sup>3</sup>Universidade Federal do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Química

E-mail: mbsj@eq.ufrj.br

<sup>4</sup>Universidade Federal da Bahia, Programa de Engenharia Industrial.

E-mail: embirucu@ufba.br

### RESUMO

A crescente complexidade dos sistemas industriais e o consequente aumento da automação e instrumentação dos processos têm tornado os sistemas de detecção, diagnóstico e correção de falhas (*Fault Detection, Diagnosis and Correction, FDDC*) cada vez mais importantes. Neste trabalho é feita uma reflexão sobre a pesquisa em detecção, diagnóstico e correção de falhas, a partir de uma análise crítica das definições e terminologias utilizadas. Dessa forma, são propostas as terminologias e definições que parecem mais apropriadas para a área, suas atividades básicas e seus objetos de estudo, a partir do confronto das visões de diversos autores, já que isto não foi feito até o momento por nenhum trabalho da literatura. Também são apontados os principais sistemas industriais investigados nos últimos anos para a resolução de problemas de FDDC, e são averiguadas quais são as técnicas mais aplicadas na resolução destes problemas.

**Palavras-chave:** Detecção, diagnóstico e correção de falhas; processos industriais; definições; terminologia.

### ABSTRACT

The increasing complexity of industrial systems and the consequent growth in instrumentation and process automation have given FDDC - Fault Detection, Diagnosis and Correction - systems an increasingly important role. This paper reflects on research into fault detection, diagnosis and correction through a critical analysis of the definitions and terminology used. The terminology and definitions that seem most appropriate for the research field, for its activities and for its object of study are proposed to conciliate the clash of visions of various authors, since this was not done yet by any work of literature. Furthermore, the most commonly studied industrial systems are highlighted as well as the most commonly used techniques in recent works with applications in these industrial problems.

**Keywords:** Fault detection, diagnosis and correction; industrial processes; definitions; terminology.

### 1 – INTRODUÇÃO

A crescente demanda por desempenho e qualidade associada a uma maior eficiência econômica e ambiental têm tornando os sistemas de detecção, diagnóstico e correção de falhas (*Fault Detection, Diagnosis and Correction, FDDC*) cada vez mais importantes para os processos industriais. Já existem diversos artigos de revisão (*reviews* ou *surveys*) consagrados e livros clássicos nesta área em língua inglesa que ressaltam a importância e aplicabilidade dos sistemas de FDDC. A maioria destes trabalhos consiste na descrição das diferentes técnicas de FDDC e suas aplicações como, por exemplo, Frank e Koppen-Seliger (1997a, b), Leonhardt e Ayoubi (1997), Chiang *et alii* (2001), Venkatasubramanian *et alii* (2003a, b, c), Liao (2005), Nandi *et alii* (2005), Isermann (2006), Uraikul *et alii* (2007), dentre outros. Os poucos autores que fazem classificação das técnicas e definem a terminologia utilizada não justificam as diferenças entre a sua abordagem e a dos demais autores, não existindo um

confronto ou consenso entre as diferentes propostas.

O entendimento das contribuições de diversos autores e a comparação entre as diferentes abordagens da área são prejudicados pela falta de consistência na terminologia utilizada. A falta de consistência dos termos da área já foi evidenciada e sugestões com o objetivo de padronizar as definições foram feitas (IEC, 1990; ISO e IEC, 1993; Isermann e Ballé, 1997). Entretanto, percebe-se que esta deficiência ainda não foi sanada e que falta um trabalho que confronte as abordagens de diferentes autores.

IEC (1990), um trabalho da Comissão Internacional de Eletrotécnica (*International Electrotechnical Commission, IEC*), definiu os termos correlacionados com as falhas no âmbito da qualidade de serviços de natureza eletrotécnica. Posteriormente, ISO e IEC (1993), um trabalho da Organização Internacional de Padronização (*International Organization for Standardization, ISO*) juntamente com a IEC, tiveram o objetivo de suprir necessidades da área de tecnologia da informação. Este trabalho explicita ao longo do seu texto as suas diferenças em relação a IEC (1990).

Isermann e Ballé (1997) é um trabalho gerado a partir de discussões feitas no âmbito do Comitê Técnico SAFEPROCESS (*Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety of Technical Processes*, Simpósio em Detecção de Falhas, Supervisão e Segurança de Processos Técnicos) da IFAC (*International Federation of Automatic Control*, Federação Internacional de Controle Automático). A grande diferença entre as definições das normas e dos artigos é explicada pelo histórico da área, que foi iniciada como uma atividade da área de manutenção - pertencente à área de confiabilidade, disponibilidade e manutenibilidade (*Reliability, Availability and Maintainability*, RAM) - e atualmente é realizada em grande parte pela operação, sendo vista na maioria dos casos como uma sub-área do controle de processos.

Se a terminologia utilizada na língua inglesa já não é consistente, uma inconsistência maior é percebida na terminologia em língua portuguesa. Enquanto que em inglês já foram escritos alguns trabalhos com o objetivo de definir os termos usados na área de FDDC, em português é desconhecida a existência de literatura nesta área, existindo apenas a versão de IEC (1990); ABNT (1994), uma norma da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). Como esta norma é ligada à área de manutenção, a tradução dos termos algumas vezes não é a mesma dos trabalhos com origem na área de controle. A maioria das teses e dissertações adota a classificação das técnicas e a terminologia apresentadas em trabalhos renomados em língua inglesa. No entanto, a falta de trabalhos que discutam essa deficiência em língua portuguesa faz com que traduções diferentes para os mesmos termos sejam utilizadas por diferentes autores, propagando o problema.

O objetivo deste trabalho é fazer uma análise crítica das definições e terminologias utilizadas na área de detecção, diagnóstico e correção de falhas, recomendando as formas mais apropriadas e adequadas a serem utilizadas, especialmente em língua portuguesa, enfatizando ainda as técnicas mais utilizadas nas diferentes aplicações industriais. A partir do confronto das visões de diversos autores são estabelecidos o conceito, a definição e a terminologia da área de pesquisa, na seção 2, as terminologias, definições básicas e conceitos dos seus objetos de estudo, na seção 3, as principais tarefas de sistemas de FDDC, na seção 4, e os tipos de falhas na seção 5. Na seção 6, são apresentadas as principais áreas de aplicações em problemas industriais, bem como as técnicas mais utilizadas, e na seção 7 são apresentadas as conclusões e comentários finais do trabalho.

## 2 – CONCEITO E DENOMINAÇÃO DA ÁREA DE PESQUISA

Em processos industriais, existem muitas denominações para o sistema que objetiva assegurar o sucesso das operações planejadas por meio do reconhecimento de anormalidades no comportamento do processo e da assistência para a tomada de ações de correção. Para denominar este tipo de sistema, podem ser encontrados os termos “diagnóstico de falhas” (Frank *et alii*, 2000; Patton, 1993), “detecção de falhas” (Willsky, 1976) e “detecção e

diagnóstico de falhas” (Gertler, 1988; Isermann, 1997; Isermann e Ballé, 1997; Venkatasubramanian *et alii*, 2003a). O último termo é o mais utilizado na literatura, inclusive em língua portuguesa (como, por exemplo, em Tinós, 1999; Fernandes, 2007; Rivera, 2007; Teixeira, 2000; Palma *et alii*, 2002), sendo também o mais abrangente para a definição dada no início do parágrafo. Porém, a detecção e o diagnóstico de falhas podem adicionalmente ser acoplados às ações de correção das falhas, formando um sistema mais abrangente, e, neste caso, a denominação mais abrangente para a área de pesquisa e, portanto, recomendada, seria “detecção, diagnóstico e correção de falhas”. Esta área foi também nomeada de “gerenciamento de eventos anormais” (*abnormal event management*) por Venkatasubramanian *et alii* (2003a) e de “monitoramento de processos” (*process monitoring*) por Chiang *et alii* (2001). O uso da expressão “monitoramento de processos” pode causar confusões, pois esta já é amplamente utilizada em controle de processos, e alguns autores (por exemplo, Teixeira, 2000) utilizam-na como sinônimo da própria atividade de detecção de falhas, que é apenas uma das etapas desta área de pesquisa. O termo “gerenciamento de eventos anormais” tem o mérito de englobar as diversas ações, atividades ou etapas (detecção, diagnóstico e correção) em uma única expressão (gerenciamento). Porém, esta terminologia não é utilizada por muitos autores, além de que os próprios autores que mais utilizam esta expressão não definem formalmente o que é um “evento anormal”. Além disso, os diversos elementos ou fases que permeiam as falhas não envolvem apenas eventos, mas também condições e estados, como será discutido adiante. Portanto, um termo adequado poderia ser “gerenciamento de anormalidades” (*abnormality management*) ou “gerenciamento de falhas” (*fault management*). Porém, reiteramos a recomendação anterior (“detecção, diagnóstico e correção de falhas”), a fim de não incluir mais uma nova terminologia em uma área que necessita uma uniformização de nomenclatura.

As siglas utilizadas são, na maioria dos casos, formadas pela abreviação das atividades ou etapas que fazem parte deste sistema. Para representar o termo “detecção e diagnóstico de falhas” (*fault detection and diagnosis*) muitos autores utilizam a sigla FDD (Rueda *et alii*, 2005; Zogg *et alii*, 2006; Isermann, 2006) ou, quando em português, DDF (Tinós, 1999; Fernandes, 2007). Alguns poucos autores utilizam FDIA (em inglês: Frank *et alii*, 2000; em português: Palma *et alii*, 2002) ao invés de FDD, já que para eles o diagnóstico de falhas consiste nas tarefas de isolamento ou isolação (*Isolation*, I) e análise (*Analysis*, A) das falhas. Desta forma, sugerimos FDI, quando consideradas apenas as etapas de detecção e isolamento das falhas (*fault detection and isolation*), situação esta que ainda é mais comum na maioria dos sistemas reais (Palma *et alii*, 2002) e a maior parte dos artigos (Frank, 1990; Fernandes, 2007), que utilizam as siglas FDI ou DIF (em língua portuguesa) para representar estes sistemas. Quando considerada adicionalmente a etapa de análise, e com o objetivo de contemplar a sigla de maior utilização, sugerimos FDD, ao invés de FDIA, e quando a etapa de correção for também incluída a sigla adequada é

FDDC, sigla também utilizada para definir a área de pesquisa. A fim de evitar uma profusão desnecessária de siglas, sugerimos utilizar aquelas oriundas dos termos em inglês, já que elas são internacionalmente conhecidas.

### 3 – DEFINIÇÕES DOS OBJETOS DE ESTUDO DA ÁREA

Existe na literatura contradição e/ou superposição de definições e terminologias. Há também inconsistências nas traduções para a língua portuguesa. Assim, a principal contribuição desta seção é propor, após a análise crítica das terminologias encontradas na literatura, uma síntese das definições e uma tradução dos termos relacionados aos objetos de estudo da área de FDDC (tais como *defect*, *malfunction*, *error*, *mistake*, e especialmente *failure* e *fault*, os mais utilizados) que resolva estas contradições e/ou superposições. Outra contribuição original é mostrar a correlação existente entre todos estes objetos.

#### 3.1 Condição de falha (*fault*) versus evento de falha (*failure*), defeito (*defect*) e mau funcionamento (*malfunction*)

Muitos trabalhos de FDDC definem um “objeto de estudo” que caracteriza “qualquer desvio de uma característica (de um sistema/processo) em relação aos seus requisitos” (Tabela 1). Vários trabalhos também definem um outro “objeto de estudo” que caracteriza “o término da capacidade (de um sistema/processo) de desempenhar a função requerida sob condições especificadas”, sendo que o primeiro “objeto de estudo” pode, ou não, dar origem ao segundo (Tabela 1). Em relação a este segundo “objeto de estudo”, embora alguns autores (IEC, 1990) o restrinjam ao término total da capacidade funcional, a maioria dos autores (ISO e IEC, 1993; Isermann, 1997; Tinós, 1999; Fernandes, 2007) considera a incapacidade como total ou parcial (redução da capacidade), desde que seja inaceitável, reconhecendo duas situações distintas: i) incapacidade total ou parada completa; ii) incapacidade parcial ou irregularidade, intermitente ou não, no preenchimento da função.

Encontra-se, nos diferentes trabalhos, o termo *fault* associado tanto ao primeiro “objeto” (p.e.: ISO e IEC, 1993; Frank, 1990; Isermann, 1984, 1997) quanto ao segundo “objeto” (p.e.: IEC, 1990), o mesmo ocorrendo com o termo *failure*, que é associado ao primeiro “objeto” por Venkatasubramanian et alii (2003a), e ao segundo “objeto” por IEC (1990), ISO e IEC (1993) e Isermann e Ballé (1997). Ambos os “objetos de estudo” estão associados genericamente ao que se entende pelo termo “falha” em língua portuguesa.

Porém, tendo definições diferentes, não é recomendável utilizar o mesmo termo “falha” para estes dois “objetos de estudo” e parece ser necessário propor terminologias distintas para eles, embora existam autores que, mesmo reconhecendo diferenças conceituais entre os mesmos, utilizam os dois termos *fault* e *failure* como sinônimos, com o argumento de simplificação no uso da terminologia (Gertler, 1988). Reforça ainda a necessidade

desta diferenciação de terminologias o fato de que na área de FDDC *fault* vem sendo traduzido como “falha”, mesma tradução que a área de RAM vem utilizando há mais tempo para o termo *failure*. A denominação *failure*, embora não muito utilizada em FDDC, muitas vezes tem sido traduzida como “defeito” nesta área, apesar do termo *defect* quase não ser encontrado na literatura de FDDC, onde diversos autores associam a *failure* também o termo *breakdown*. Como FDDC e RAM são relacionados e têm interesses em comum, não é recomendável que existam discordâncias entre os termos e definições propostos nestas duas áreas. A necessidade de se utilizar traduções diferentes foi também reconhecida por ABNT (1994) que utilizou “pane” para a tradução de *fault* e “falha” para a tradução de *failure*.

A primeira situação do segundo “objeto de estudo” (parada completa ou incapacidade total) é aquela que, em geral, é associada ao termo *failure* (ou ao termo *fault*, por alguns poucos autores, conforme discutido anteriormente), enquanto que a segunda situação (irregularidade, intermitente ou não) é definida por alguns autores (Isermann e Ballé, 1997) com o termo *malfunction* (mau funcionamento), termo este que, embora apareça com certa regularidade na literatura da área, tem a sua definição formal encontrada apenas nesta referência mencionada.

Desta forma, em consonância com a maioria dos trabalhos da área e tendo em vista ainda a associação que é feita entre os termos defeito e *failure*, conforme mencionado anteriormente, adotaremos aqui os termos “condição de falha” (ou anormalidade, conforme usado por alguns autores) para o primeiro “objeto de estudo” e defeito para o segundo (quando referido em sentido amplo, ou seja, não diferenciando entre incapacidade total ou irregularidade), associando-os aos termos em inglês *fault* e *defect*, respectivamente. Advogamos a utilização dos termos defeito e *defect*, apesar da sua incipiente utilização na área de FDDC, conforme mencionado anteriormente, por julgarmos importante a existência de um termo que englobe os dois tipos de “incapacidade de desempenho de função” (total e parcial) reconhecidos pela literatura. Para os tipos de defeito são adotados os termos “evento de falha” (*failure*), quando caracterizada incapacidade total ou parada completa, e “evento de mau funcionamento” (*malfunction event*), quando caracterizada incapacidade parcial ou irregularidade, intermitente ou não.

Portanto, propomos definições e traduções que nos parecem as mais abrangentes e úteis para a área em questão (FDDC), evitando, inclusive, contradições com outras áreas correlatas como RAM (Tabela 2):

- Condição de falha (*Fault*) ou anormalidade (*abnormality*) é qualquer desvio de uma característica em relação aos seus requisitos, podendo, ou não, afetar a capacidade de desempenhar uma função requerida - ocasionar um evento de falha (*failure*) ou um evento de mau funcionamento (*malfunction event*);

Tabela 1 – Objetos de estudo da área de pesquisa: visão de diferentes autores

REFERÊNCIA	CAUSA	CONDIÇÃO	EVENTO	ESTADO	SINTOMA
Himmelblau (1978)	Equipamento, ou parte dele, que está causando a falha, ou seja, que está violando as condições suficientes para a satisfação das especificações de desempenho do processo. ( <i>causes of faults</i> ). Exemplos: distribuição, mistura ou lubrificação inapropriada, superaquecimento, sedimentação, projeto inadequado, vazamento, defeitos na construção, falta de energia, quebra de instrumento, erro humano, efeitos climáticos e outros.	Um desvio de uma variável observada ou de um parâmetro calculado associado com um processo, em relação a uma faixa aceitável ( <i>fault</i> ou <i>malfunction</i> ). Uma <i>fault</i> implica em uma degradação do desempenho, mas não será necessariamente uma <i>failure</i> . Exemplos de <i>fault</i> : desvios de pressão, temperatura, vazão, nível, propriedades de fluidos, vibração excessiva, corrosão, erosão, cavitação, entre outros.	É considerada como uma completa inoperabilidade do equipamento ou processo ( <i>failure</i> ). Isto é, o equipamento ou instrumento irá perder a capacidade de realizar a função especificada.		Não faz uma definição explícita, mas apresenta alguns exemplos de sintomas, por exemplo, em válvulas de controle, tais como: passagem de fluido quando a válvula está fechada, válvula ventilando para a atmosfera quando deveria estar em posição de fechamento, entre outros.
Isermann (1984), Isermann (1997), Isermann e Ballé (1997)	Não trazem uma definição explícita, mas se referem ao fato de que ela ( <i>cause of fault</i> ) é determinada no diagnóstico. Definem ainda <i>perturbation</i> (uma entrada atuando sobre um sistema, resultando em um desvio temporário em relação ao estado em curso) e <i>disturbance</i> uma (entrada desconhecida, e não controlada, atuando sobre um sistema).	Um desvio não permitido de um comportamento aceitável, padrão ou usual de pelo menos uma propriedade característica ou parâmetro de uma variável ou sistema que leva à incapacidade de cumprir o objetivo pretendido ( <i>fault</i> ). É um “estado” que pode levar a uma <i>malfunction</i> ou <i>failure</i> do sistema	Uma interrupção permanente de uma habilidade do sistema de realizar uma função requerida sob condições operacionais especificadas ( <i>failure</i> ) ou uma irregularidade intermitente no preenchimento de uma função desejada do sistema ( <i>malfunction</i> ).		Uma mudança observável ( <i>symptom</i> ). Exemplos: desvio entre um valor medido ou calculado (de uma variável de saída) e o valor verdadeiro, especificado ou teoricamente correto ( <i>error</i> ); indicador de <i>fault</i> baseado no desvio entre medidas e cálculos baseados em modelos ( <i>residual</i> ). Relacionados aos sintomas, se referem também aos termos <i>fault features</i> (características da falha) e <i>fault signatures</i> (“assinaturas” das falhas).
Gertler (1988)	-	Utiliza <i>fault</i> e <i>failure</i> como sinônimos, se referindo a situações, condições e eventos onde “algo está errado no sistema”, embora reconheça que o primeiro conota um problema tolerável, enquanto o segundo sugere uma parada completa. Se refere a <i>fault</i> ainda como “discrepâncias entre valores medidos e verdadeiros” ou “deslocamentos ( <i>shift</i> ) ou mudanças ( <i>change</i> ), abruptos ou graduais, em variáveis ou parâmetros da planta”.		-	Utiliza os termos <i>symptom</i> e <i>signature</i> , embora não forneça uma definição formal.
Frank (1990)	Se refere apenas ao fato de que ela ( <i>fault cause</i> ) é determinada no diagnóstico.	Qualquer tipo de mau funcionamento que leva a uma anormalidade inaceitável no desempenho global do sistema ( <i>fault</i> ).		Anormalidade inaceitável no desempenho global do sistema.	Utiliza o termo <i>fault signature</i> (“assinatura” da falha) como um sinal que define os efeitos associados a uma falha ( <i>fault</i> ), e que é obtido a partir de algum tipo de sistema de gerenciamento de falhas ( <i>faulty system model</i> ).
ISO e IEC (1993)	Não faz uma definição formal, embora se refira aos termos <i>mistake</i> ou <i>human error</i> como uma ação humana, ou falta desta, que pode produzir um resultado indesejável.	Uma condição anormal ( <i>abnormal condition</i> ) que pode causar uma redução ou perda da capacidade em desempenhar uma função requerida ( <i>fault</i> ).	Término da capacidade em desempenhar a função requerida ( <i>failure</i> ).	Estado onde o sistema não é mais capaz de desempenhar a função requerida (“F” state).	Não define formalmente, mas descreve <i>error</i> como a diferença entre um valor ou uma condição observada ou medida e a correspondente condição ou valor verdadeiro, especificado ou teórico. O <i>error</i> pode ser causado por uma <i>fault</i> .
IEC (1990), ABNT (1994)	Circunstância relativas ao projeto, fabricação ou uso que conduzem a uma falha - <i>failure cause</i> (IEC, 1990) ou causa da falha (ABNT, 1994). Exemplo: ação humana que produz um resultado diferente daquele que se pretendia ou dever-se-ia obter - <i>mistake</i> ou <i>human error</i> (IEC, 1990) ou engano ou erro humano (ABNT, 1994).	Qualquer desvio de uma característica em relação aos seus requisitos; pode ou não afetar a capacidade em desempenhar a função requerida - <i>defect</i> (IEC, 1990) ou defeito (ABNT, 1994).	Término da capacidade em desempenhar a função requerida - <i>failure</i> (IEC, 1990) ou falha (ABNT, 1994). A <i>failure</i> é um evento que é seguido por uma <i>fault</i> .	Estado caracterizado pela incapacidade de desempenhar uma função requerida - <i>fault</i> (IEC, 1990) ou pane (ABNT, 1994). Geralmente é resultado de uma <i>failure</i> anterior, mas pode existir sem uma <i>failure</i> .	Não define formalmente, mas descreve <i>error</i> (IEC, 1990) ou erro (ABNT, 1994) como a diferença entre um valor ou uma condição observada ou medida e a correspondente condição ou valor verdadeiro, especificado ou teórico. O erro ( <i>error</i> ) pode ser causado por uma pane ( <i>fault</i> ).
Venkatasubramanian et alii (2003a)	As causas subjacentes a uma <i>fault</i> ( <i>basic event</i> ou <i>root cause</i> ou <i>malfunction</i> ou <i>failure</i> ).	Um desvio de uma variável observada ou de um parâmetro calculado associado com um processo, em relação a uma faixa aceitável ( <i>fault</i> ). Uma anormalidade de processo ou “sintoma” ( <i>abnormal event</i> ).	-	-	Observações que são relacionadas às falhas e que podem ser utilizadas no seu diagnóstico ( <i>symptoms</i> ). Se referem ainda aos termos <i>fault signature</i> (“assinatura” da falha) e <i>feature-space</i> (espaço de características). Citam também os resíduos ( <i>residual</i> ) como uma forma ou tipo de sintoma.

- Defeito (*defect*) é o término da capacidade de desempenhar a função requerida sob condições especificadas, sugerindo: i) incapacidade total ou parada completa (evento de falha, *failure*); ou ii) incapacidade parcial ou irregularidade, intermitente ou não, no preenchimento da função (evento de mau funcionamento, *malfunction event*).

### 3.2 Categorias ou classificações e outros objetos de estudo

A despeito da diferenciação feita na seção anterior, os termos *fault* e *failure* estão intimamente ligados, sendo que é possível relacionar as mesmas atividades aos dois termos (por exemplo: detecção de falha). Assim, nem sempre esta diferenciação precisa estar explícita, podendo ser utilizado apenas o termo “falha”. O importante é que o sentido do emprego do termo esteja claro, sendo recomendada a utilização das terminologias diferenciadas em contextos que possam deixar alguma dúvida. Por outro lado, é importante ressaltar que, além da questão didática, os principais objetivos de definir os termos da área são: o entendimento correto do que se lê e a utilização adequada dos termos quando se escreve, além da correta compreensão das suas relações de causa e efeito.

Neste ponto é importante classificar os objetos de estudo nas chamadas “fases” da falha (alguns autores utilizam também os termos etapas, eventos ou estados da falha para esta classificação, mas utilizaremos aqui o termo “fases”, já que associaremos os termos “evento” e “estado” a fases específicas). Existe uma sucessão de situações (fases) de falha que são descritas com algumas variações por diferentes autores, que poderiam ser sintetizadas da seguinte forma: uma causa origina uma condição que pode culminar em um evento que conduz a um estado, e este conjunto de situações pode ser detectado e diagnosticado por meio de sintomas. Nesta sentido, a *fault* pode ser interpretada como o elemento ou objeto central da fase “condição” da falha. Esta fase é caracterizada por uma condição anormal que pode causar uma redução ou perda da capacidade em desempenhar uma função requerida. Portanto, o termo “condição” quer aqui denotar uma situação do sistema que pode, ou não, conduzir a uma efetiva falha (defeito), que caracteriza a fase seguinte. Portanto, a “condição” é uma fase de potencial de defeito, enquanto a fase “evento” se configura em um (efetivo) defeito, caracterizado por um evento de falha (*failure*) ou por um evento de mal funcionamento. Assim, o defeito é geralmente resultado de uma condição de falha (*fault*).

Embora não claramente definida pela maioria dos autores, é possível definir a “fase estado” como aquela posterior à “fase evento”, ou seja, a fase que caracteriza a situação do processo/sistema como resultado da ocorrência de um defeito. Portanto, esta fase é o estado caracterizado pela perda (total ou parcial) da capacidade de desempenhar a função requerida sob condições especificadas. Neste caso, em função da associação que é feita entre os termos *failure* e *breakdown*, e da associação que é feita entre o termo “pane” e o conceito aqui definido para o termo *failure*, sugerimos o emprego do termo “pane” (ou *breakdown* em língua inglesa) para o estado resultante de

um evento de falha (*failure*) e o emprego do termo “estado de mal funcionamento” (*malfunction state*) para o estado decorrente de um evento de mal funcionamento (*malfunction event*). Assim como a diferenciação entre *fault* (condição) e *failure* (evento) nem sempre precisa estar explícita, o mesmo se aplica ao estado. Na realidade, neste caso a diferenciação é ainda mais sutil. Como colocado anteriormente, a maioria dos autores trazem definições em que é difícil separar o evento do estado. De fato, apenas IEC (1990), ABNT (1994) e ISO e IEC (1993) trazem este conceito de forma explícita, sendo que esta última referência se exime inclusive de fornecer uma terminologia específica, se referindo a ela como um “*F*” *state*. De acordo com IEC (1990) e ABNT (1994), o estado de falha geralmente é resultado de um evento anterior (por exemplo, uma *failure*), mas pode existir sem este evento ou defeito, tipicamente nos casos das falhas de projeto.

A fase seguinte é o sintoma, onde “as falhas se revelam”. Ou seja, os sintomas são observações ou sinais que são relacionados ou associados às falhas (condição, evento e/ou estado) e que podem ser utilizados na sua detecção e no seu diagnóstico. Relacionados aos sintomas, alguns autores se referem também aos termos *fault signatures* (“assinaturas” das falhas), *fault features* (características da falha) e *feature-space* (espaço de características). É associado ainda aos sintomas o termo erro (*error*), definido como um desvio (diferença) entre um valor medido/calculado ou uma condição observada e a correspondente condição ou valor verdadeiro, especificado ou teoricamente correto (ABNT, 1994; Isermann e Ballé, 1997). Quando os desvios são obtidos por meio de modelos usa-se frequentemente o termo resíduos (*residual*).

Anterior às fases “condição” e “evento”, está a “fase causa”, ou a causa da falha propriamente dita. As causas subjacentes à condição, ao evento e ao estado de falha são chamadas de eventos básicos (*basic events*) ou causas-raiz (*root causes*), ou simplesmente de causas da falha (*fault cause*) (Venkatasubramanian *et alii*, 2003a). Um sistema pode ter uma composição hierárquica de vários níveis (subsistemas). Desta forma, a falha de um dado subsistema pode ser a causa da ocorrência de uma falha em um sistema mais abrangente (ISO e IEC, 1993). Um exemplo típico de causa é o erro humano (*mistake*; encontra-se também o termo *error* para designar este tipo de erro, embora não nos pareça adequada esta utilização, em face da definição anteriormente dada e a sua associação com sintoma). ISO e IEC (1993) definem *mistake* (erro humano ou engano) como a ação humana, ou falta desta, que produz um resultado diferente daquele que se pretendia ou que se deveria obter. Outros tipos genéricos de causas são definidos por Isermann e Ballé (1997): *perturbation* (perturbação), uma entrada atuando sobre um sistema, resultando em um desvio temporário em relação ao estado em curso; *disturbance* (distúrbio), uma entrada desconhecida (e não controlada) atuando sobre um sistema. Estes dois conceitos podem ser sintetizados em um único, de uma forma mais aderente ao que é amplamente utilizado na área de controle de processos: perturbação ou distúrbio é uma entrada não controlada (desconhecida ou não)

atuando sobre um sistema, resultando em um desvio (temporário ou não) em relação ao estado em curso.

### 3.3 Correlação existente entre as fases da falha e os objetos de estudo de FDDC

Conforme colocado anteriormente, as fases da falha são uma sucessão de situações, existindo uma correlação e uma certa relação de causa e efeito entre elas. A Figura 1 apresenta de uma forma original, para um mesmo nível hierárquico de subsistema, esta relação de causa e efeito dos termos tratados nesta seção, ilustrando, além dos objetos de estudo, as suas terminologias e exemplos (vale ressaltar que as causas e os sintomas podem ser vários, podendo ainda pertencer simultaneamente a mais de um nível hierárquico). Uma anormalidade (*abnormality*) ou condição de falha (*fault*) que culmina em um evento (defeito, *defect*) que leva ao estado de falha (“F” *state*) pode acontecer no sistema. Se este estado foi caracterizado pela perda total da capacidade funcional (*pane*, *breakdown*), o evento anterior ao estado de falha é uma

*failure* (evento de falha). No entanto, se a perda da capacidade funcional foi parcial (estado de mal funcionamento, *malfunction state*), um evento de mau funcionamento (*malfunction event*) foi o que ocorreu anteriormente. As causas subjacentes à condição de falha, ao defeito e ao estado de falha são chamadas de causas-raiz (*root causes*), causas da falha (*fault causes*) ou eventos básicos (*basic events*). Dentre as diversas causas possíveis, estão as perturbações (*perturbation*) ou distúrbios (*disturbance*) e o engano (*mistake*). Tanto o estado de falha como as suas causas são percebidos por meio dos sintomas (*symptoms*) ou das “assinaturas” das falhas (*fault signatures*). Um dos sintomas mais conhecidos é o erro (*error*)/resíduo (*residual*). O conjunto de sintomas, por sua vez, é uma das entradas das etapas de detecção e diagnóstico de falhas (figura 2). É importante ressaltar que, embora não esteja representado, o erro, o engano e a perturbação ou distúrbio podem também acontecer sem estarem relacionados à existência de falhas no sistema.

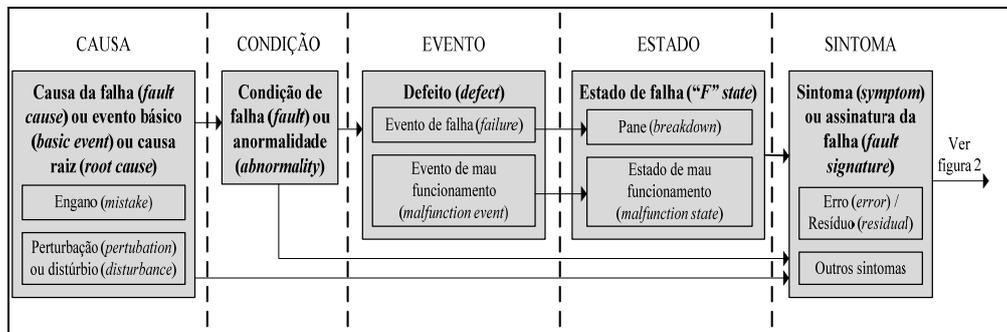


Figura 1 – Correlação entre os objetos de estudo da área de pesquisa.

A Tabela 1 faz uma compilação da visão de diferentes autores em relação aos termos e conceitos/definições descritos nas seções anteriores, enquanto que as Tabelas 2 e 3 trazem a síntese aqui proposta para esses termos e definições. Nesta síntese, procurou-se ser aderente à maioria dos autores. Em termos de terminologias, a maior oposição se dá em relação a IEC (1990) e ABNT (1994), o que é natural, já que estas referências estão em oposição à maioria das outras, especialmente a ISO e IEC (1993), que é uma norma mais recente, e por isso foi mais valorizada. Deve ser notado, no entanto, que esta oposição ou conflito se dá apenas em relação aos termos, já que há grande coincidência em relação às fases da falha e suas definições.

Tabela 2 – Objetos de estudo da área de pesquisa: síntese proposta por este trabalho

	causa	Condição	Evento	Estado	Sintoma
Termo na língua portuguesa	Causa da falha ou evento básico ou causa-raiz.	Condição de falha ou anormalidade.	Defeito, podendo significar incapacidade total (evento de falha) ou parcial (evento de mau funcionamento).	Estado de falha, total (pane) ou parcial (estado de mal funcionamento).	Sintoma.
Termo na língua inglesa	<i>Fault cause</i> ou <i>basic event</i> ou <i>root cause</i> .	<i>Fault</i> ou <i>abnormality</i> .	<i>Defect</i> , total ( <i>failure</i> ) ou parcial ( <i>malfunction event</i> ).	“ <i>F</i> ” <i>state</i> , total ( <i>breakdown</i> ) ou parcial ( <i>malfunction state</i> ).	<i>Symptom</i> .
Definição	As causas subjacentes à condição, ao evento e ao estado de falha.	Qualquer desvio de uma característica em relação aos seus requisitos. Pode, ou não, afetar a capacidade de desempenhar uma função requerida (ocasionar um evento de falha ou um evento de mau funcionamento).	Término da capacidade de desempenhar a função requerida sob condições especificadas, sugerindo: incapacidade total ou parada completa (evento de falha); incapacidade parcial ou irregularidade, intermitente ou não, no preenchimento da função (evento de mau funcionamento).	Estado caracterizado pela perda (total ou parcial) da capacidade de desempenhar a função requerida sob condições especificadas.	Observações ou sinais que são relacionados ou associados às falhas e que podem ser utilizados na sua detecção e no seu diagnóstico.

Tabela 3 – Outros termos associados aos conceitos de causa e sintoma

Causa	Sintoma
<i>Perturbação (perturbation) ou distúrbio (disturbance) é um tipo de causa caracterizada por uma entrada não controlada (desconhecida ou não) atuando sobre um sistema, resultando em um desvio (temporário ou não) em relação ao estado em curso. Erro humano ou engano (mistake) é um tipo de causa caracterizada por ação humana, ou falta desta, que produz um resultado diferente daquele que se pretendia ou que se deveria obter.</i>	<i>Fault signatures</i> (“assinaturas” das falhas), <i>fault features</i> (características da falha) e <i>feature-space</i> (espaço de características). <i>Erro (error): desvio (diferença) entre um valor medido/calculado ou uma condição observada e a correspondente condição ou valor verdadeiro, especificado ou teoricamente correto.</i> <i>Quando este desvio é obtido por meio de cálculos baseados em modelos, usa-se frequentemente o termo resíduo (residual).</i>

#### 4 – PRINCIPAIS TAREFAS DE SISTEMAS DE FDDC

Existem diversos métodos utilizados na literatura para se construir um sistema de FDDC. Cada método tem suas etapas específicas, que não serão aqui abordadas. O objetivo desta seção é abordar as tarefas ou atividades comuns à maioria dos sistemas de FDDC, independente do método utilizado. As principais contribuições desta seção são propor a terminologia adequada e uma definição abrangente e consistente para cada uma destas tarefas ou atividades, o que inclui especificar de forma clara e inequívoca quais são as suas variáveis de entrada e de saída, já que aqui também observa-se contradições e superposições na literatura. As tarefas que serão discutidas são a detecção, o diagnóstico e a correção de falhas, que, neste caso, devem ser entendidas em um contexto mais amplo, ou seja, podendo se referir ao estado, ao evento, à condição e até mesmo à causa da falha. Da mesma forma, embora o termo em inglês aqui utilizado para traduzir falha seja *fault*, pois é o termo genericamente referido a estas tarefas, “*fault*” aqui também deve ser entendido num sentido mais amplo, podendo significar “*malfunction*”, “*failure*”, “*defect*”, “*breakdown*”, entre outros.

#### 4.1 Detecção de falhas

Detecção de falhas (*fault detection*) é a determinação da presença de uma falha no sistema e do tempo de detecção (Isermann e Ballé, 1997; Frank *et al.*, 2000; Venkatasubramanian *et alii*, 2003a), o que é feito a partir da observação de sintomas. Esta etapa indica, em certo tempo, que algo está errado com o sistema, que existe um comportamento indesejável ou inaceitável.

Alguns autores não associam a determinação do tempo de detecção a esta etapa e sim à etapa seguinte, a de diagnóstico (Gertler, 1988; IEC, 1990; Chiang *et alii*, 2001). No entanto, não compartilhamos desta classificação. Dificilmente irá se determinar a ocorrência da falha sem que se possa conhecer o tempo em que foi realizada esta determinação.

Esta etapa também é chamada de monitoramento/monitoração por alguns autores (Isermann, 1984; Teixeira, 2000). Além deste termo, IEC (1990) usa também o termo “supervisão” com o mesmo sentido. Não recomendamos a utilização destes termos devido à confusão que podem causar por serem termos amplamente usados na área de controle de processos, como já mencionado anteriormente.

A detecção de falhas é realizada por meio do registro de informações, do reconhecimento e da indicação de anormalidades no comportamento do sistema em um tempo determinado (Isermann e Ballé, 1997). Essa operação pode ser feita por meio de diversas formas, desde o simples acompanhamento de alguma variável do sistema até a análise da diferença (chamada de resíduo) entre o valor medido de uma variável e o seu respectivo valor estimado por um modelo matemático (chamada de detecção de falhas com redundância analítica) ou medido por um instrumento extra que realiza uma medida equivalente (chamada de detecção de falhas com redundância física ou de *hardware*).

#### 4.2 Diagnóstico de falhas

O diagnóstico de falhas (*fault diagnosis*) é a determinação das características das falhas detectadas. Essas características variam de acordo com o objetivo de cada sistema, sendo que a localização e a causa são as mais corriqueiramente abordadas na literatura. De forma abrangente, o diagnóstico de falhas pode determinar o tipo, a localização, o tamanho (magnitude), a causa, o instante e o comportamento com o tempo (Isermann e Ballé, 1997; Venkatasubramanian *et alii*, 2003a). Alguns autores dizem que o tempo de detecção é determinado nesta etapa, ao invés do tempo de ocorrência da falha (Isermann e Ballé, 1997). Como colocado anteriormente, consideramos que a determinação do tempo de detecção é uma atividade da própria detecção, ficando a cargo da tarefa de diagnóstico a determinação do tempo de ocorrência da falha (Isermann e Ballé, 1997; Venkatasubramanian *et al.*, 2003a). Vale ressaltar que estes tempos não são a mesma coisa, visto que pode existir uma diferença de tempo entre a ocorrência da falha e a sua detecção.

O diagnóstico de falhas pode ser dividido nas etapas de isolamento e análise das falhas. Na etapa de isolamento ou classificação (*fault isolation or classification*) o objetivo é determinar a falha existente, por meio da determinação do tipo, da localização e do tempo de sua ocorrência. Alguns autores, por exemplo Frank *et alii* (2000), consideram que a definição do tipo da falha faz parte da etapa seguinte (análise). No entanto, não nos parece adequada a classificação de Frank e colaboradores, uma vez que o objetivo do isolamento é determinar a falha existente.

A tarefa de análise ou identificação de falha (*fault analysis or identification*) é definida como todo detalhamento posterior da falha (definição do tamanho, da causa, do comportamento com o tempo, dentre outros) (Gertler, 1988; Isermann e Ballé, 1997; Frank *et alii*, 2000). Seu objetivo é avaliar a origem da falha, sua evolução e seu impacto no desempenho do sistema (Fernandes, 2007). Chiang *et alii* (2001), por sua vez, definem esta tarefa como diagnóstico de falha e utilizam o termo identificação de falha para se referirem ao procedimento de determinação das variáveis observadas mais relevantes. Segundo estes autores, o objetivo deste procedimento é focalizar a atenção dos operadores e engenheiros nos subsistemas mais pertinentes para a determinação da falha. Como este procedimento não é a única maneira utilizada para facilitar o diagnóstico de

falhas (Raich e Çinar, 1996), e como acreditamos que ele é normalmente realizado dentro da etapa de isolamento, concluímos que não é necessário considerá-lo como uma etapa separada. Portanto, o diagnóstico de falhas (*fault diagnosis*) pode ser definido como:

- Junção das etapas de isolamento e análise das falhas. Determinação das características (tipo, localização, tamanho, causa, comportamento com o tempo, tempo de ocorrência, etc.) das falhas detectadas.

#### 4.3 Correção de falhas

A etapa de correção de falhas consiste da tomada de ações apropriadas (parada, mudanças na operação, reconfiguração, manutenção ou reparo do sistema), de forma automática ou não, para restabelecer a capacidade de desempenhar a função requerida (ISO e IEC, 1993). Essa etapa é também chamada de recuperação do processo (*process recovery*) ou intervenção (*intervention*) (Chiang *et alii*, 2001). Venkatasubramanian *et alii* (2003a) consideram as ações de correção como sendo ações de controle supervisório já que, assim como outros autores, eles consideram FDDC (AEM, *Abnormal Event Management*, de acordo com a terminologia adotada por estes autores) como um componente-chave do controle supervisório. Dependendo da falha diagnosticada, as seguintes ações de correção podem ser realizadas (Isermann, 2006): a. Operação segura (p.e.: parada da planta); b. Operação confiável (p.e.: mudanças na operação); c. Reconfiguração (p.e.: utilizando outros sensores, atuadores ou componentes redundantes); d. Manutenção; e. Reparo.

#### 4.4 Correlação existente entre as principais atividades de um sistema de FDDC

Nos sistemas de FDDC, de forma geral, primeiramente a falha é detectada para depois serem realizadas as tarefas de isolamento e análise (diagnóstico) da falha. O diagnóstico de falhas fornece então assistência para a tomada de ações de correção e, desta maneira, após as correções terem sido realizadas, a capacidade de desempenhar a função requerida é restabelecida. A figura 2 ilustra as principais atividades que foram descritas para um sistema de FDDC. Além da estrutura mostrada na figura 2, também é comum encontrar as tarefas de detecção e diagnóstico sendo realizadas em uma etapa única, ao invés de duas etapas distintas (Raich e Çinar, 1996).

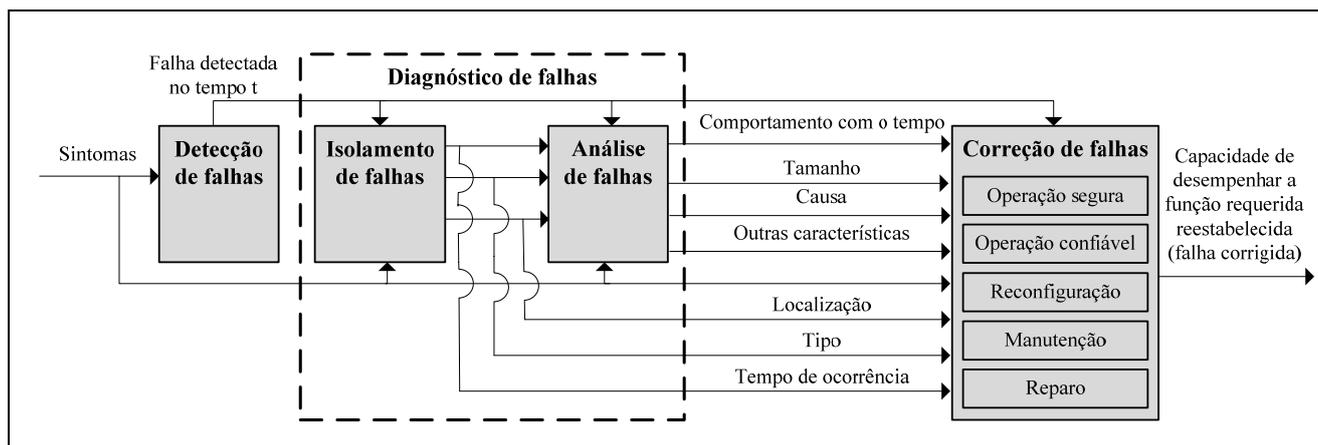


Figura 2 – Principais atividades de sistemas de FDDC.

### 5 – TIPOS DE FALHAS

Na maioria dos casos, a classificação das falhas (condições, eventos ou estados) reflete, de forma explícita ou implícita, a visão dos autores a respeito da estrutura dos sistemas de detecção e diagnóstico (Gertler, 1988). Os tipos de falhas surgem de acordo com as diferentes considerações feitas.

Chiang *et alii* (2001), Frank (1990) e Venkatasubramanian *et alii* (2003a) classificam as falhas de acordo com o local de ocorrência. Já Gertler (1988), Isermann (1997) e Palma *et al.* (2002) consideram o tipo de sinal (sintoma) da falha para estabelecer as categorias de classificação. As falhas foram classificadas em relação à sua evolução temporal por Isermann (1997) e ao conhecimento que se tem sobre elas por Teixeira (2000). ABNT (1994) é o trabalho mais completo neste aspecto, onde são encontrados diversos tipos de falha, que foram definidos de acordo com os critérios de consequência, causa, percepção, resposta e ocorrência da falha.

É importante ressaltar que, embora seja interessante classificar as falhas *do* ponto de vista analítico e didático, é natural que as categorias propostas não consigam descrever

algumas situações reais (Gertler, 1988).

### 6 – TÉCNICAS DE FDDC

A necessidade de lidar com um grande número de dados de falha ou com a ausência de dados bem definidos, aliada ao aumento da complexidade das plantas industriais e das exigências de segurança pessoal e ambiental, tem levado à utilização de técnicas cada vez mais específicas e/ou sofisticadas.

De acordo com Venkatasubramanian *et alii* (2003a), os métodos para diagnóstico de falhas podem ser classificados com base no conhecimento *a priori* utilizado. Assim, a abordagem utilizada pode envolver métodos baseados em modelos ou no histórico do processo, sendo em ambos os casos divididos em métodos quantitativos e qualitativos. A Tabela 4 apresenta as técnicas classificadas com base no conhecimento *a priori* utilizado e foi construído a partir de em alguns trabalhos (Isermann 1997; Isermann e Ballé, 1997; Teixeira, 2000; Venkatasubramanian *et alii*, 2003a, b, c; Blázquez e Miguel, 2005).

Tabela 4 – Classificação das técnicas com base no conhecimento *a priori* utilizado

Modelos		Histórico do processo	
Quantitativos	Qualitativos	Quantitativos	Qualitativos
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Observadores de estados e de saídas</li> <li>• Equações e espaço de paridade</li> <li>• Filtro de Kalman estendido (EKF, <i>Extended Kalman Filter</i>)</li> <li>• Identificação e estimação de parâmetros</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Árvores de falha</li> <li>• Simulação qualitativa (QSIM, <i>Qualitative SIMulation</i>)</li> <li>• Teoria qualitativa de processo (QPT, <i>Qualitative Process Theory</i>)</li> <li>• Grafos direcionados com sinais (SDG, <i>Signed Directed Graph</i>)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Classificadores estatísticos</li> <li>• Redes neuronais (NN, <i>Neural Networks</i>)</li> <li>• Análise de componentes principais (PCA, <i>Principal Component Analysis</i>)</li> <li>• Método dos mínimos quadrados parciais (PLS, <i>Partial Least Squares</i>)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sistemas especialistas (ES, <i>Expert System</i>)</li> <li>• Análise qualitativa de tendências (QTA, <i>Qualitative Trend Analysis</i>)</li> </ul>

No período compreendido entre 2004 e 2009 foram identificados, na área de detecção e diagnóstico de falhas, 545 artigos publicados em periódicos indexados na base de dados *Web of Science* (WS, 2010) com aplicações em problemas industriais, que serão a base das análises apresentadas nesta seção, no texto que segue e nas Tabelas 5 e 6. Foram considerados como trabalhos com aplicação em problemas industriais aqueles que contêm: indústrias de

geração, transmissão e distribuição de energia; indústrias de processos químicos, bioquímicos, farmacêuticos e nucleares; os sistemas mecânicos e indústrias de manufatura; captação, tratamento e distribuição de água; indústria de construção naval e aeroespacial; indústria têxtil, indústria metalúrgica e as demais indústrias de processamento. Não foram considerados, por exemplo, trabalhos aplicados a sistemas de telecomunicação,

sistemas de condicionamento térmico, sistemas de automação predial e sistemas computacionais e de rede. Também não foram considerados trabalhos aplicados à análise de falhas estruturais (relacionadas a ensaios de materiais ou à construção civil) e falhas em equipamentos ou sistemas não industriais.

Diversas técnicas de detecção e diagnóstico de falhas foram utilizadas nos 545 artigos referidos anteriormente, destacando-se as técnicas de base estatística e o uso crescente da inteligência artificial. Mais de 20 técnicas foram aplicadas de forma bem distribuída, o que explica o fato de aproximadamente metade de todos os artigos encontrados contemplar o conjunto das técnicas mais utilizadas, que são as seguintes, em ordem decrescente de utilização: redes neuronais artificiais, lógica fuzzy (difusa, nebulosa), análise de componentes principais, filtro de Kalman, máquina de vetores de suporte (Support Vector Machine, SVM), algoritmo genético (Genetic Algorithm, GA), controle estatístico de processos (Statistical Process Control, SPC), sistemas especialistas, análise discriminante de Fisher, regressão por mínimos quadrados parciais e grafos direcionados com sinais. Dentre as técnicas citadas, destacam-se as sete primeiras, pois estas respondem por quase 90% dos artigos desse grupo, o que mostra a grande participação das técnicas classificadas como inteligência artificial entre os trabalhos mais recentes.

Algumas particularidades podem ser observadas no uso das técnicas citadas acima. Redes neuronais artificiais, por exemplo, são conhecidas por serem tolerante a ruídos, pois são adaptativas e capazes de generalizar (Ozyurt e Kandel, 1996). Então, devido a sua capacidade de modelar sistemas complexos, reconhecer padrões e classificar informações, são largamente utilizadas em diversos sistemas e têm se mostrado capazes de obter bons resultados quando aliadas a outras técnicas. Da mesma forma, a lógica fuzzy, que foi desenvolvida para tratar imprecisões, ambiguidades e incertezas nas informações (Meza et alii, 2006), tem tido aplicação nos mais diversos sistemas, muitas vezes em conjunto com outra técnica. Tanto em um caso quanto no outro, sistemas neuro-fuzzy foram os mais utilizados, quando técnicas híbridas foram aplicadas (Ayoubi e Isermann, 1997). A análise de componentes principais (PCA) envolve um procedimento matemático que transforma um número de possíveis variáveis correlacionadas em um número menor de variáveis não correlacionadas, chamadas de componentes principais. Em sistemas complexos e com muitas variáveis envolvidas, como os sistemas típicos da indústria de processos, a PCA é bastante utilizada, em alguns casos como método de referência para comparação com outras técnicas (Lee et alii, 2006). Já o algoritmo de aprendizagem SVM consiste em uma técnica computacional de aprendizado supervisionado para problemas de reconhecimento de padrões. Este algoritmo tem como objetivo a determinação de limites de decisão que produzam uma separação ótima entre classes, por meio da minimização dos erros (Vapnik, 1995). Em muitos casos é utilizado em combinação com outras técnicas e tem bastante aplicação em problemas de detecção de falhas em motores, equipamentos rotativos e rolamentos, bem como

em sistemas de transmissão de energia elétrica. O algoritmo genético, por ser um algoritmo de otimização e busca, tem sido utilizado principalmente aliado a outras técnicas, em geral como estimador de parâmetros, como em Fei e Zhang (2009). Redes neuronais, lógica fuzzy e SVM são as técnicas com as quais o GA é mais utilizado em conjunto. Dentre os artigos pesquisados, os trabalhos mais citados para cada uma das técnicas mais utilizadas são aqueles mostrados na Tabela 5.

Tabela 5 – Trabalhos mais citados nas diferentes técnicas utilizadas para FDDC

Redes Neuronais	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Niaki e Abbasi, 2005;</li> <li>• Samanta, 2004.</li> </ul>
PCA	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cho et al., 2005;</li> <li>• Choi et al., 2005;</li> <li>• Lee et al., 2004.</li> </ul>
Lógica Fuzzy	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Awadallah et al., 2005;</li> <li>• Lou e Loparo, 2004.</li> </ul>
Filtro de Kalman	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Patwardhan e Shah, 2006.</li> </ul>
SVM	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Chiang et al., 2004;</li> <li>• Samanta, 2004;</li> <li>• Widodo et al., 2007.</li> </ul>
Algoritmo Genético	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Samanta, 2004;</li> <li>• Zhang et al., 2005.</li> </ul>
SPC	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Yoon e MacGregor, 2004.</li> </ul>

As áreas onde esses artigos se concentram são basicamente cinco, de acordo com a classificação da *Web of Science*: engenharia elétrica e eletrônica; automação e sistemas de controle; engenharia química; inteligência artificial e engenharia mecânica, o que está de acordo com os sistemas de aplicação mais utilizados. A maioria dos trabalhos é aplicada em sistemas ligados a geração, transformação e distribuição de energia elétrica (14%), equipamentos da indústria de processos (reatores, colunas, sensores e atuadores) (59%), e motores e rolamentos (21%).

Na Tabela 6 são apresentadas as técnicas mais utilizadas nos sistemas de FDDC aplicados nesses processos e, em cada caso, uma referência é apresentada a título de exemplo.

Tabela 6 – Técnicas mais utilizadas nos sistemas de FDDC aplicados a sistemas elétricos, indústrias de processo, sensores e equipamentos rotativos e rolamentos

Sistemas de geração, transformação e distribuição de energia	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Redes neuronais (Hung e Wang, 2004);</li> <li>• Fuzzy (Naresh et al., 2008);</li> <li>• SVM (Ganyun et al., 2005).</li> </ul>
Indústrias de processo	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Redes neuronais (Behbahani et al., 2009);</li> <li>• Fuzzy (Rajakarunakaran, 2006);</li> <li>• Kalman (Chetouani, 2008);</li> <li>• PCA (Sharmin et al., 2008).</li> </ul>
Equipamentos rotativos e rolamentos	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Redes neuronais (Taplak et al., 2006);</li> <li>• SVM (Sugumaran et al., 2008).</li> </ul>

## 7 – CONCLUSÃO

Após o confronto e a análise crítica das diversas

terminologias utilizadas em trabalhos de detecção, diagnóstico e correção de falhas, o presente trabalho chegou a um conjunto consistente de termos e definições que parecem ser os mais apropriados para serem utilizados, inclusive em língua portuguesa. O sistema, e sua respectiva área de pesquisa, foi denominado de FDDC, sigla que representa o conjunto mais amplo das tarefas desta área, que é composto por detecção (D), diagnóstico (D) e correção (C) de falhas (F).

Foi mostrada de forma clara a correlação existente entre os principais objetos de estudo da área de FDDC (figura 1), que são: *fault* (condição de falha), *defect* (defeito), *failure* (evento de falha) e *malfunction event* (evento de mau funcionamento). Estes elementos são anteriores ao estado de falha ("*F*" state), que é classificado como *breakdown* (pane), no caso da perda total da capacidade funcional, ou *malfunction state* (estado de mau funcionamento), no caso de perda parcial. Foi mostrada ainda a correlação destas fases da falha com as suas causas-raízes e com os sintomas, que são utilizados para detectá-las e diagnosticá-las.

Nos sistemas de FDDC, de forma geral, primeiramente a falha é detectada para depois serem realizadas as tarefas de diagnóstico (isolamento e análise) e correção da falha. O diagnóstico de falhas fornece então assistência para a tomada de ações de correção. A correlação entre estas atividades e suas variáveis de entrada e de saída também foram estabelecidas de forma clara (figura 2). Além disso, os diversos tipos de falhas foram definidos, tendo sido mostrados os diferentes critérios sob os quais eles são classificados.

A análise da literatura recente mostra ainda que os sistemas que têm tido mais aplicação de sistemas de FDDC na literatura são aqueles ligados à geração e distribuição de energia, a equipamentos da indústria de processos (reatores, colunas, sensores e atuadores) e a motores e rolamentos, utilizando principalmente técnicas de redes neuronais, análise de componentes principais (PCA), lógica *fuzzy*, filtro de Kalman, SVM, algoritmo genético e sistemas especialistas.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado da Bahia (FAPESB), à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e à Companhia de Gás da Bahia - BAHIAGÁS pelo apoio financeiro na realização deste estudo.

## REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5462**: confiabilidade e manutenibilidade, Rio de Janeiro, 1994.  
AWADALLAH, M.; MORCOS, A. M. M.; GOPALAKRISHNAN, S.; NEHL T. W. A neuro-fuzzy approach to automatic diagnosis and location of stator inter-turn faults in CSI-fed PM brushless DC motors.

**IEEE Transactions On Energy Conversion**, v. 20, p. 253-259, 2005.

AYOUBI, M.; ISERMANN, R. Neuro-fuzzy systems for diagnosis. **Fuzzy Sets and Systems**, v. 89, n. 3, p. 289-307, 1997.

BEHBAHANI, R. M.; JAZAYERI-RAD, H.; HAJMIRZAEI, S. Fault detection and diagnosis in a sour gas absorption column using neural networks. **Chemical Engineering & Technology**, v. 32, p. 840-845, 2009.

BLÁZQUEZ, L. F.; MIGUEL, L. J. Additive fault detection in nonlinear dynamic systems with saturation. **ISA Transactions**, v. 44, p. 515-538, 2005.

CHETOUANI, Y. Design of a multi-model observer-based estimator for fault detection and isolation (FDI) strategy: application to a chemical reactor. **Brazilian Journal of Chemical Engineering**, v. 25, p. 777-788, 2008.

CHIANG, L. H.; RUSSEL, E. L.; BRAATZ, R. D. Fault detection and diagnosis in industrial systems. 1. ed., **Springer**, London, UK, 2001.

CHIANG, L. H.; KOTANCHEK, M. E.; KORDON, A. K. Fault diagnosis based on Fisher discriminant analysis and support vector machines. **Computers & Chemical Engineering**, v. 28, p. 1389-1401, 2004.

CHO, J. H.; LEE, J. M.; CHOI, S. W.; LEE, D.; LEE, I. B. Fault identification for process monitoring using kernel principal component analysis. **Chemical Engineering Science**, v. 60, p. 279-288, 2005.

CHOI, S. W.; LEE, C.; LEE, J. M.; PARK, J. H.; LEE, I. B. Fault detection and identification of nonlinear processes based on kernel PCA. **Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems**, v. 75, p. 55-67, 2005.

FEI, S. W.; ZHANG, X. B. Fault diagnosis of power transformer based on support vector machine with genetic algorithm. **Expert Systems with Applications**, v. 36, p. 11352-11357, 2009.

FERNANDES, R. G. **Detecção e isolamento de falhas em sistemas dinâmicos baseados em redes neurais**. Dissertação (Mestrado), UFRN, Natal, RN, Brasil, 2007.

FRANK, P. M. Fault diagnosis in dynamic-systems using analytical and knowledge-based redundancy. **Automatica**, v. 26, p. 459-474, 1990.

FRANK, P. M.; KOPPEN-SELIGER, B. Fuzzy logic and neural network applications to fault diagnosis. **International Journal of Approximate Reasoning**, v. 16, p. 67-88, 1997a.

FRANK, P. M.; KOPPEN-SELIGER, B. New developments using AI in fault diagnosis. **Engineering Applications of Artificial Intelligence**, v. 10, p. 3-14, 1997b.

FRANK, P. M.; GARCIA, E. A.; KOPPEN-SELIGER, B. Modelling for fault detection and isolation versus modelling for control. **Mathematics and Computers in Simulation**, v. 53, p. 259-271, 2000.

GANYUN, L. V.; CHENG, H. Z.; ZHAI, H. B.; DONG, L. X. Fault diagnosis of power transformer based on multi-layer SVM classifier. **Electric Power Systems Research**, v. 74, p. 1-7, 2005.

GERTLER, J. J. Survey of model-based failure detection and isolation in complex plants. **IEEE Control Systems Magazine**, v. 8, p. 3-11, 1988.

- HIMMELBLAU, D. M. **Fault detection and diagnosis in chemical and petrochemical processes**. Elsevier, Amsterdam, Netherlands, 1978.
- HUNG, C. P.; WANG, M. H. Diagnosis of incipient faults in power transformers using CMAC neural network approach. **Electric Power Systems Research**, v. 71, p. 235-244, 2004.
- IEC. International electrotechnical vocabulary – Chapter 191: Dependability and quality of service. IEC 50 (191), **International Electrotechnical Commission (IEC)**, Geneva, Switzerland, 1990.
- ISERMANN, R. Process fault detection based on modeling and estimation methods. **Automatica**, v. 20, p. 387-404, 1984.
- ISERMANN, R. Supervision, fault-detection and fault-diagnosis methods. **Control Engineering Practice**, v. 5, p. 639-652, 1997.
- ISERMANN, R.; BALLÉ, P. Trends in the application of model-based fault detection and diagnosis of technical processes. **Control Engineering Practice**, v. 5, p. 709-719, 1997.
- ISERMANN, R. **Fault-diagnosis systems, an introduction from fault detection to fault tolerance**. Springer, Berlin, Germany, 2006.
- ISO e IEC. Information technology – Vocabulary – Part 1: Fundamental terms. ISO/IEC 2382-1, **International Organization for Standardization (ISO)**, Standard, Genève, Switzerland, 1993.
- LEE, J. M.; YOO, C.; LEE, I. B. Fault detection of batch processes using multiway kernel principal component analysis. **Computers & Chemical Engineering**, v. 28, p. 1837-1847, 2004.
- LEE, C.; CHOI, S. W.; LEE, I. B. Variable reconstruction and sensor fault identification using canonical variate analysis. **Journal of Process Control**, v. 16, p. 747-761, 2006.
- LEONHARDT, S. AND AYOUBI, M. Methods of fault diagnosis. **Control Eng. Practice**, v. 5, p. 683-692, 2005.
- LIAO, S. Expert system methodologies and applications. **Expert Systems with Applications**, v. 28, p. 93-103, 1997.
- LIAO, S. Expert system methodologies and applications. **Expert Systems with Applications**, v. 28, n. 1, p. 93-103, 2005.
- LOU, X. S.; LOPARO, K. A. Bearing fault diagnosis based on wavelet transform and fuzzy inference. **Mechanical Systems and Signal Processing**, v. 18, p. 1077-1095, 2004.
- MEZA, E. B. M.; STACCHINI DE SOUZA, J. C.; SCHILLING, M. TH.; COUTTO FILHO, M. B. Utilização de um modelo neuro-fuzzy para a localização de defeitos em sistemas de potência. **Controle & Automação**, v. 17, n. 1, p. 103-114, 2006.
- NANDI, S., TOLIYAT, H. A. AND LI, X. D. Condition monitoring and fault diagnosis of electrical motors. **IEEE Transactions on Energy Conversion**, v. 20, p. 719-729, 2005.
- NARESH, R.; SHARMA, V.; VASHISTH, M. An integrated neural fuzzy approach for fault diagnosis of transformers. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 23, p. 2017-2024, 2008.
- NIAKI, S. T.; ABBASI, B. Fault diagnosis in multivariate control charts using artificial neural networks. **Quality and Reliability Engineering International**, v. 21, p. 825-840, 2005.
- OZYURT, B.; KANDEL, A. A hybrid hierarchical neural network-fuzzy expert system approach to chemical process fault diagnosis. **Fuzzy sets and systems**, v. 83, n. 1, p. 11-25, 1996.
- PALMA, L. B.; SILVA, R. N.; COITO, F. V. Metodologia híbrida de detecção e diagnóstico de falhas em tempo-real. **Conferência Científica e Tecnológica em Engenharia**, Lisboa, p. 1-7, 2002.
- PATTON, R. J. Robustness issues in fault-tolerant control. **Proceedings of IEE Colloquium on Fault Diagnosis and Control System Reconfiguration**, London, England, p. 1-125, 1993.
- PATWARDHAN, S. C. AND SHAH, S. L. From data to diagnosis and control using generalized orthonormal basis filters. **Journal of Process Control**, v. 16, p. 157-175, 2006.
- RAICH, A.; ÇINAR, A. Statistical process monitoring and disturbance diagnosis in multivariable continuous processes. **Aiche Journal**, v. 42, p. 995-1009, 1996.
- RAJAKARUNAKARAN, S.; DEVARAJ, D.; VENKAT, R. G. S.; SURYA, P. R. K. Fuzzy system approach for fault diagnosis in LPG bottling plant: A case study. **International Journal of Industrial Engineering-Theory Applications and Practice**, v. 13, p. 292-298, 2006.
- RIVERA, M. H. M. Diagnóstico de Falhas em Sistemas a Eventos Discretos: Uma Proposta de Aplicação em Processos de Separação Óleo-Gás. Dissertação (Mestrado), UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2007.
- RUEDA, E.; TASSOU, S. A.; GRACE, I. N. Fault detection and diagnosis in liquid chillers. **Proceedings of The Institution of Mechanical Engineers Part E-Journal of Process Mechanical Engineering**, v. 219, p. 117-125, 2005.
- SAMANTA, B. Gear fault detection using artificial neural networks and support vector machines with genetic algorithms. **Mechanical Systems and Signal Processing**, v. 18, p. 625-644, 2004.
- SHARMIN, R.; SHAH, S. L.; SUNDARARAJ, U. A PCA based fault detection scheme for an industrial high pressure polyethylene reactor. **Macromolecular Reaction Engineering**, v. 2, p. 12-30, 2008.
- SUGUMARAN, V.; SABAREESH, G. R.; RAMACHANDRAN, K. I. Fault diagnostics of roller bearing using kernel based neighborhood score multi-class support vector machine. **Expert Systems with Applications**, v. 34, p. 3090-3098, 2008.
- TAPLAK, H.; UZMAY, I.; YILDIRIM, S. An artificial neural network application to fault detection of a rotor bearing system. **Industrial Lubrication and Tribology**, v. 58, p. 32-44, 2006.
- TEIXEIRA, A. C. **Detecção e diagnóstico de falhas em sistemas de processos químicos. Importância do conhecimento de estados intermediários de processos dinâmicos. Desenvolvimento de uma metodologia baseada em redes neurais**. Tese (Doutorado),

UNICAMP, Campinas, SP, Brasil, 2000.

TINÓS, R. **Detecção e diagnóstico de falhas em robôs manipuladores via redes neurais artificiais**. Dissertação (Mestrado), USP, São Carlos, SP, Brasil, 1999.

URAIKUL, V.; RAIKUL, V.; CHAN, C. W.; TONTIWACHWUTHIKUL, P. Artificial intelligence for monitoring and supervisory control of process systems. **Engineering Applications of Artificial Intelligence**, v. 20, p. 115-131, 2007.

VAPNIK, V. **The nature of statistical learning theory**. Springer-Verlag, New York, USA, 1995.

VENKATASUBRAMANIAN, V.; RENGASWAMY, R.; YINC, K.; KAVURI, S. N. A review of process fault detection and diagnosis Part I: Quantitative model-based methods. **Computers and Chemical Engineering**, v. 27, p. 293-311, 2003a.

VENKATASUBRAMANIAN, V.; RENGASWAMY, R.; KAVURI, S. N. A review of process fault detection and diagnosis Part II: Qualitative models and search strategies. **Computers and Chemical Engineering**, v. 27, p. 313-326, 2003b.

VENKATASUBRAMANIAN, V.; RENGASWAMY, R.; KAVURI, S. N.; YIN, K. W. A review of process fault detection and diagnosis Part III: Process history based methods. **Computers and Chemical Engineering**, v. 27, p. 327-326, 2003c.

WIDODO, A.; YANG, B. S.; HAN, T. Combination of independent component analysis and support vector machines for intelligent faults diagnosis of induction motors. **Expert Systems with Applications**, v. 32, p. 299-312, 2007.

WILLSKY, A. S. Survey of design methods for failure detection in dynamic systems. **Automatica**, v. 12, p. 601-611, 1976.

YOON, S.; MACGREGOR, J. F. Principal-component analysis of multiscale data for process monitoring and fault diagnosis. **Aiche Journal**, v. 50, p. 2891-2903, 2004.

ZHANG, L.; JACK, L. B.; NANDI, A. K. Fault detection using genetic programming. **Mechanical Systems and Signal Processing**, v. 19, p. 271-289, 2005.

ZOGG, D.; SHAFI, E.; GEERING, H. P. Fault diagnosis for heat pumps with parameter identification and clustering. **Control Engineering Practice**, v. 14, p. 1435-1444, 2006.