



PROPOSTA PARA UTILIZAÇÃO DA SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL EM ANÁLISE DE RISCO, AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO E SISTEMAS DE GESTÃO AMBIENTAL

RESUMO

O processo de simulação computacional consiste na utilização de um programa de CAE (*Computer Aided Engineering*) para elaboração de um modelo matemático de um produto ou processo, execução de cálculos por meio de um método numérico e verificação dos resultados que representam o comportamento do modelo, quando submetido a condições de operação e carregamentos. Este trabalho tem por objetivo propor a utilização de uma ferramenta de simulação computacional em análise de risco, avaliação de desempenho e melhoria de sistemas de gestão ambiental. Os resultados apresentados mostram que a análise de simulação pode fornecer diagnósticos e valores significativos para complementar o estudo dos processos ambientais das empresas. A ferramenta de simulação computacional pode ser um diferencial para auxiliar a organização a aperfeiçoar seu sistema de gestão ambiental, a prevenir ou mitigar riscos e impactos ambientais, a elaborar produtos e processos com melhor desempenho, maior qualidade e confiabilidade. Conseqüentemente, a empresa poderá reduzir seus custos e se tornar mais competitiva e/ou líder de mercado nos setores nos quais atua.

PALAVRAS-CHAVE: Simulação Computacional; Análise de Risco; Avaliação de Desempenho; Gestão Ambiental.

PROPOSAL FOR USE OF COMPUTER SIMULATION IN RISK ANALYSIS, PERFORMANCE ASSESSMENT AND ENVIRONMENTAL MANAGEMENT SYSTEMS

ABSTRACT

The process of computer simulation is the use of a program of CAE (Computer Aided Engineering) for developing a mathematical model of a product or process, performing calculations using a numerical method and verification of results that represent the behavior of the model, when subjected to operating conditions and loads. This paper aims to propose the use of a computer simulation tool in risk analysis, performance evaluation and improvement of environmental management systems. The results show that simulation analysis can provide significant diagnostic value and to complement the study of environmental processes of companies. The computer simulation tool can make a difference to help the organization improve its environmental management system, to prevent or mitigate environmental risks and impacts, to develop products and processes with improved performance, better quality and reliability. Consequently, the company can reduce costs and become more competitive and / or market leader in the sectors in which it operates.

KEYWORDS: Computer Simulation; Risk Analysis; Performance Evaluation; Environmental Management.

Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais, Aquidabã, v.2, n.2, novembro, 2011.

ISSN 2179-6858

SEÇÃO: Artigos

TEMA: **Gestão Ambiental**



DOI: 10.6008/ESS2179-6858.2011.002.0003

Fátima Maria Nogueira de SOUZA

<http://lattes.cnpq.br/8850304850582307>
fatima@poli.ufri.br

Carlos Eduardo SILVA

<http://lattes.cnpq.br/3700554054159220>
carlos@arvore.org.br

Lais Alencar de AGUIAR

<http://lattes.cnpq.br/5785500333245448>
laguiar@cnen.gov.br

Josimar Ribeiro de ALMEIDA

<http://lattes.cnpq.br/3215586187698472>
jralmeida@usp.br

Recebido: 15/03/2011

Aprovado: 22/10/2011

Referenciar assim:

SOUZA, F. M. N.; SILVA, C. E.; AGUIAR, L. A.; ALMEIDA, J. R.. Proposta para utilização da simulação computacional em análise de risco, avaliação de desempenho e sistemas de gestão ambiental. *Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais, Aquidabã, v.2, n.2, p.39-63, 2011.*

INTRODUÇÃO

O processo de simulação computacional baseada no método de elementos finitos consiste na utilização de um programa desenvolvido em uma linguagem tal como FORTRAN ou outra similar, capaz de elaborar um modelo matemático de um produto ou processo, efetuar cálculos por meio de um método numérico e fornecer resultados que representem o comportamento do modelo, quando submetido a condições de operação e a cargas diversas.

Os resultados obtidos com o modelo devem ser analisados por um profissional que conheça o processo de simulação computacional e que tenha por objetivo dimensionar um produto ou um processo, atestar a sua integridade e verificar os seus limites de operação ou de carregamento.

Neste trabalho é apresentada uma proposta para a aplicação desta ferramenta de simulação, como fornecedora de resultados e comportamentos de produtos e processos, os quais podem ser utilizados na análise de risco e avaliação de desempenho ambientais e podem auxiliar a empresa a aperfeiçoar seu Sistema de Gestão Ambiental, a elaborar produtos e processos com melhor desempenho, maior qualidade e confiabilidade, a prevenir ou mitigar riscos e impactos ambientais e a reduzir custos entre outros benefícios que serão descritos ao longo deste trabalho.

Segundo Corrêa (2009), com a implantação de um sistema de gestão ambiental, a empresa pode se tornar mais inovadora, competitiva, obter maior retorno financeiro em suas operações e evoluir ambientalmente além das exigências da legislação, melhorando a sua imagem perante as partes interessadas (*stakeholders*) e seus índices no mercado financeiro, caso a empresa possua ações em bolsas de valores.

Até a década de 50, embora a tecnologia de simulação já estivesse em desenvolvimento, ainda não havia programas comerciais. As indústrias eram obrigadas a utilizar altos fatores de segurança para elaborar seus projetos e dimensionar seus produtos e processos, significando isto um gasto excessivo de matéria prima. Como os projetos não eram totalmente confiáveis, havia grandes perdas e desperdícios de materiais oriundos de erros de processos durante a produção e de testes destrutivos, os quais precisavam ser realizados antes da fabricação dos produtos, para a verificação do comportamento e da resistência dos mesmos aos diversos carregamentos e às condições de operações.

Também nesta década muitas indústrias desenvolviam seus processos e produtos sem abordar aspectos ambientais, tais como, sistema de gestão, risco e avaliação de desempenho ambiental. Além disto, não analisavam as conseqüências de suas atividades sobre o meio ambiente e não providenciavam soluções para minimizar os impactos ambientais causados por suas ações.

Segundo Filho (2003), na década de 1960, iniciaram-se em várias disciplinas estudos quantitativos sobre risco, definido como “a possibilidade de que ocorram processos ou circunstâncias adversas que possam acarretar danos”.

O risco ambiental foi definido por Dagnino e Junior (2007) como a possibilidade de ocorrência de eventos danosos ao meio ambiente e a análise de risco ambiental como a avaliação dos riscos que as atividades humanas impõem ao meio ambiente.

De acordo com Filho (2003), os riscos ambientais de graves conseqüências, assim como os advindos dos avanços tecnológicos, começaram a ser considerados como chaves para a compreensão das características, das transformações e dos limites do projeto histórico da modernidade. Estes riscos teriam origem no próprio desenvolvimento científico e tecnológico, mas adicionavam aos avanços positivos, uma incerteza quanto ao aproveitamento que lhes atribuem a atividade econômica humana. Hoje se reconhece que somente por meio dessa perspectiva é possível abordar, em sua complexidade, a estimativa dos riscos.

Segundo Almeida (2008), Moreira (2001) e Moura (2004) na reunião do Clube de Roma (1968), foi divulgado o relatório ‘Os Limites para o Crescimento’ (*Limits to Grow*) e abordado o tema da poluição dos rios europeus.

Ainda nos anos 60, surgiram também os primeiros programas comerciais de simulação computacional, os quais foram desenvolvidos para modelar, para efetuar cálculos variacionais complexos, que demandavam meses de trabalho e para dimensionar com segurança, estruturas, equipamentos, componentes mecânicos e processos sujeitos a condições de operações e de carregamentos, para os quais não existiam Normas técnicas ou experimentos em laboratórios, tais como o lançamento, as sobrecargas ou a explosão de um foguete.

De acordo com Almeida (2008), Moreira (2001) e Moura (2004), na década de 70 a discussão das questões ambientais foi marcada pela Conferência Internacional sobre Meio Ambiente, que ocorreu em Estocolmo, em 1972. Neste evento foi abordada a degradação ambiental causada pelos altos níveis de desenvolvimento dos países ricos e a necessidade de se efetuarem controles ambientais internacionais para a redução de danos ao meio ambiente.

Em 1970, o então presidente americano Richard M. Nixon assinou uma ordem executiva e consolidou a criação de uma única agência ambiental americana: a *Federal Environmental Protection Agency* (EPA). Muito embora o foco primário da EPA tenha sido o de regulamentação e cumprimento de leis governamentais, e não o desenvolvimento de sistemas de gestão ambiental, suas atividades vêm contribuindo para muitas empresas americanas desenvolverem uma cultura ambiental sistêmica.

Na década de 70 houve um aumento nas atividades de regulamentação e de controle ambiental estimuladas pela EPA. Os Estudos de Impacto Ambiental (EIA) foram iniciados nos Estados Unidos, como pré-requisito para aprovação de empreendimentos potencialmente poluidores (MOURA, 2004). Surgiu também a Auditoria Ambiental como uma resposta à pressão

pelo crescente rigor da legislação ambiental e pela ocorrência de acidentes ambientais de grandes proporções (ALMEIDA, 2004).

Ainda em 1970, o engenheiro John Swanson, da *Westinghouse* (Pittsburgh, EUA) desenvolveu um programa de simulação computacional para dimensionamento de reatores nucleares e fundou a empresa *Swanson Analysis Systems* para desenvolver o programa ANSYS, com o qual foram realizadas as análises estruturais e térmicas apresentadas neste trabalho, como estudos que podem reduzir os riscos ambientais e melhorar o desempenho ambiental de produtos e processos.

Nos anos 80, os conceitos de proteção do meio ambiente começaram a se expandir. Degradações, acidentes e desastres ambientais, tais como vazamentos, contaminações com inúmeras mortes e danos à fauna e à flora, contribuíram para mudanças nas políticas oficiais de meio ambiente e nos conceitos de gerenciamento ambiental na indústria. Esta década foi marcada por ações de planejamento ambiental e muitas indústrias começaram a incorporar a variável ambiental em seus planejamentos estratégicos. A discussão sobre o meio ambiente deixou de ser um tema isolado, para se incorporar em vários setores. Ainda nesta década surgiram ONGs (Organizações Não Governamentais) de proteção ao meio ambiente, compostas por integrantes dos movimentos ambientalistas dos anos 70 (ALMEIDA, 2008).

No Brasil, com o Plano de Controle da Poluição de Cubatão em 1983, desencadeou-se uma série de exigências para garantir a boa operação e manutenção de processos, tubulações e terminais de petróleo e de produtos químicos das unidades industriais locais, dando-se início ao uso institucional do estudo de risco ambiental.

Ainda na década de 80, os programas de simulação computacional começaram a ser ampliados para executarem análises estruturais e térmicas não lineares tais como impactos, choques, vibrações, ruídos, fadiga, mecânica da fratura e superaquecimentos entre outros. Também foram desenvolvidos módulos para análise de dinâmica de fluidos, com aplicações em escoamento e misturas de líquidos e gases, combustão e explosões.

Nos anos 90 houve um grande impulso com relação à consciência ambiental. Muitas empresas passaram a se preocupar com a racionalização do uso de energia e de matérias-primas, além de terem um maior empenho na promoção da reciclagem e reutilização de materiais, para evitarem ou reduzirem os desperdícios.

A Conferência Mundial de Meio Ambiente, sediada no Rio de Janeiro, em 1992, onde foram assinados os tratados globais da biodiversidade e do clima, entre outros, traduz a universalização da discussão ambiental. As indústrias passaram a ser responsabilizadas pelos efeitos ambientais de seus produtos e sub-produtos, desde a obtenção da matéria prima até a disposição final dos mesmos como resíduos, além de começarem a ter responsabilidades tributárias pela geração de poluição (poluidor-pagador), visando a proteção ambiental (ALMEIDA, 2008).

Ainda nos anos 90, os programas de simulação computacional foram utilizados em análises térmicas e estruturais para simular incêndios em plataformas *offshore*, visando identificar as regiões críticas da plataforma, que deveriam receber a proteção passiva, uma manta de material isolante para revestir a estrutura metálica, capaz de resistir ao fogo e manter a integridade estrutural e a segurança, durante um determinado tempo, necessário para a evacuação do pessoal. Nesta época, estas análises eram solicitadas pelos engenheiros de segurança, mas ainda não se falava em análise de risco e avaliação de desempenho ambientais e sistema de gestão ambiental.

Ainda na década de 90, a Câmara Internacional de Comércio (*ICC - International Chamber of Commerce*), propôs estruturas lógicas que sistematizassem a gestão ambiental na indústria, compatibilizando-as com o interesse de qualidade e produtividade, surgindo assim o Sistema de Gestão Ambiental, formalizado pela *British Standard Institution* na Norma BS-7750 - *Specification for Environmental Management Systems* (ALMEIDA, 2008).

Em 1996 foi editada a Norma ABNT NBR ISO 14001 – Requisitos do Sistema de Gestão Ambiental, que atualmente, na versão de 2004, é utilizada na implantação do Sistema de Gestão Ambiental (SGA) nas empresas e para efetuar a certificação do SGA, de serviços, produtos e processos da empresa, mediante auditorias ambientais.

Em 1999 foram criadas as Normas ABNT NBR ISO 14031 – Diretrizes para a Avaliação do Desempenho (*Performance*) Ambiental, que inclui exemplos de indicadores ambientais e a ABNT NBR ISO 14032 - Exemplos de Avaliação do Desempenho Ambiental. Estas Normas podem ser utilizadas por empresas que possuem ou não o SGA, para medir o desempenho ambiental da empresa por meio de indicadores de desempenho gerencial e operacional e de condição ambiental.

Neste contexto, o objetivo geral deste estudo foi de propor a utilização da análise de simulação computacional por meio do método de elementos finitos como uma ferramenta complementar para a previsão, análise, avaliação, controle, gerenciamento e mitigação de riscos e impactos ambientais, avaliação de desempenho ambiental e aperfeiçoamento do Sistema de Gestão Ambiental da organização.

REVISÃO DE LITERATURA

Simulação Computacional

A simulação computacional é uma ferramenta que pode ser utilizada para análises de engenharia. O programa é utilizado para a modelagem de um produto (modelo) ou processo, incluindo suas condições de contorno ou de fixação e seus carregamentos de operação, tais como, cargas estruturais, fluxos de calor, temperaturas, velocidades, acelerações, correntes

elétricas e campos eletromagnéticos. Por meio de um método numérico o software executa os cálculos, simula o comportamento do modelo e gera os resultados que podem ser visualizados por meio de figuras, gráficos e listagens (BATHE, 2007).

Entre os principais resultados fornecidos pelo programa, ao longo do modelo, têm-se os deslocamentos, tensões, pressões de contato, deformações, fatores de fadiga e de mecânica da fratura, temperaturas, fluxos de calor, coeficientes de filme, velocidades de escoamento de fluidos (líquidos e gases), concentrações de misturas, campos magnéticos e correntes elétricas entre outros (ANSYS, 2009).

Para a elaboração do modelo matemático sólido ou protótipo virtual pode-se utilizar um programa de desenho do tipo CAD (*Computer Aided Design*) ou o programa de simulação computacional CAE (*Computer Aided Engineering*), no qual o profissional também elabora o modelo de elementos finitos, como apresentado na Figura 01, define o tipo de análise a ser realizada, solicita a execução dos cálculos e verifica os resultados, referente à metodologia da análise de simulação computacional (MOAVENI, 2008).

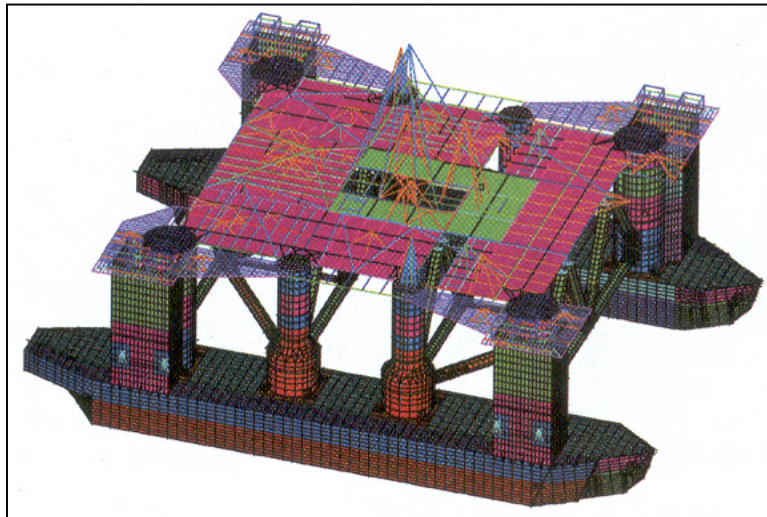


Figura 01: Modelo de Elementos Finitos de uma Plataforma *Offshore*. **Fonte:** Programa ANSYS versão 2003.

Os programas de CAE são utilizados para desenvolver projetos de produtos e processos, incluindo o dimensionamento, as modificações e as otimizações. Alguns programas, tais como o ANSYS, possuem métodos para a execução de análises probabilísticas de tensões (ANSYS, 2009).

Os principais benefícios das análises de simulação para as análises ambientais são:

- Verificação da integridade estrutural de um produto ou o desempenho de um processo nas condições de projeto, de operação e de sobrecarga visando mitigar riscos e/ou efeitos de aspectos ambientais e colaborar na melhoria de um Sistema de Gestão Ambiental (SGA);
- Simulação de condições de carregamento para atendimento a requisitos de Normas técnicas;

- Melhoria de desempenho de produtos e processos por meio de análises comparativas, alterações e possíveis otimizações das variáveis de projeto visando colaborar na avaliação de desempenho ambiental;
- Identificação de situações de riscos e simulação de aspectos ambientais que podem causar danos ambientais, nas diversas etapas de operação ou de utilização de produtos e processos;
- Fornecimento de diagnósticos e dados numéricos sobre o comportamento de produtos e processos, submetidos a condições de operação ou de acidente, a serem utilizados nas análises de confiabilidade, vulnerabilidade, causas e conseqüências, avaliação e gerenciamento de risco por meio da análise de riscos ambientais.

Na análise dos resultados, o profissional pode verificar se os valores encontrados atendem aos fatores de segurança exigidos pelas normas técnicas ou pode identificar os pontos de falha que levam a danos parciais, colapso do produto ou à perda de controle de um processo, por não atenderem os requisitos das normas ou por estarem submetidos a condições de acidentes.

Executando a análise em etapas é possível reproduzir as situações de riscos ou de acidentes diversos em seqüência e analisar as causas, efeitos e conseqüências de uma ação sobre a seguinte.

Nas análises de simulação pode-se efetuar modificações ou combinações de diversas variáveis de projeto de um produto ou processo. Os resultados obtidos podem ser utilizados para avaliar o desempenho do objeto em estudo, por meio da comparação dos valores calculados nas diversas condições de projeto.

Aplicações em Estudos Ambientais

Entre as principais aplicações da simulação computacional, para modelagem de situações complexas e fenômenos diversos, os quais são complexos ou muito difíceis de serem reproduzidos e testados em laboratórios ou bancadas, com o uso de protótipos físicos, e que podem causar danos, acidentes ou desastres ambientais, destacam-se:

- Impacto ou choque de embarcações transportadoras de óleo ou produtos tóxicos contra obstáculos diversos, que podem causar fraturas nas mesmas, levando ao derramamento destas substâncias e causando a poluição nos corpos d'água com destruição da fauna e flora;
- Elevações de pressão ou de temperatura (sobrecargas), de equipamentos ou dutos com gases ou substâncias tóxicas e/ou inflamáveis, as quais podem causar trincas e/ou rupturas nos mesmos, gerando vazamentos e explosões, com incêndios e contaminações ambientais diversas;
- Aquecimentos e resfriamentos ou cargas e descargas repetitivas de equipamentos, que contenham substâncias tóxicas ou perigosas, cujos ciclos de trabalho podem levar à fadiga do material e causar trincas que podem se propagar causando o rompimento do material e gerando vazamentos que podem contaminar o ar, o solo e a água;

- Queda de aeronaves ou explosão sobre ou próximo ao edifício do reator de usinas nucleares, as quais podem danificar ou romper o reator, devido às ondas de choque e vibrações, causando emissões radioativas com contaminações de pessoas, da fauna e da flora;
- Incêndios em instalações diversas, tais como plataformas *offshore*, petroquímicas, indústrias químicas e siderúrgicas, os quais podem causar explosões e danificar ou superaquecer estruturas e equipamentos com produtos inflamáveis e/ou tóxicos, levando à perda de integridade estrutural e colapso dos mesmos, trazendo como conseqüências mortes de pessoas, vazamentos e derramamentos de substâncias perigosas no ar, solo, e água;
- Deformações permanentes (mossas) causadas por sobrecargas diversas em equipamento que armazena substância perigosa ou tóxica. Estes danos podem comprometer a integridade estrutural do equipamento e/ou de seus componentes mecânicos, gerando trincas (fissuras) que podem se romper a qualquer momento, durante o seu ciclo de trabalho, causando vazamentos que levam a contaminações do ar, água e solo;
- Quedas de barragens, estradas e encostas com geração de áreas degradadas, poluição dos corpos d'água e mortes de pessoas, da fauna e da flora;
- Incêndio em equipamento situado em plataforma, navio, refinaria, indústria química e siderúrgica entre outras, com emissões de radiação e aquecimento de equipamentos, estruturas e instalações próximas, que pode causar mortes de pessoas, além da perda da integridade e colapso das estruturas, com danos e acidentes ambientais diversos;
- Superaquecimento de fornos e reatores, em siderúrgicas e usinas nucleares, que podem causar danos ou destruição de materiais e/ou equipamentos, incêndios, explosões e emissões de radiações, com mortes de pessoas e contaminações ambientais diversas;
- Vibrações e ruídos em instalações diversas e equipamentos, que podem causar desconforto ambiental para pessoas e gerar trincas e/ou danificar componentes mecânicos, gerando prejuízos para as pessoas e a empresa.

Normativas de Gestão Ambiental

A Norma ABNT NBR ISO 14001:2004 que define os requisitos para a implantação do SGA e a certificação ambiental e a Norma ABNT NBR ISO 14031:2004, que fornece as diretrizes para a avaliação de desempenho ambiental não mencionam o uso da ferramenta de simulação computacional. No entanto, a mesma pode ser utilizada para atender alguns dos requisitos destas Normas, relativos a prevenção de riscos ambientais, melhoria do Sistema de Gestão Ambiental e avaliação de desempenho ambiental.

No item 4.4.7, a Norma ABNT NBR ISO 14001:2004 define que a “organização deve estabelecer, implementar e manter procedimento(s) para identificar situações potenciais de emergência e acidentes que possam ter impacto(s) sobre o meio ambiente e sobre como a organização responderá a estes”.

Uma das principais capacidades do programa de simulação é o fornecimento de diagnósticos, isto é, comportamentos e resultados numéricos, que podem ser utilizados na análise de riscos para minimizar riscos ambientais, os quais podem levar a acidentes ambientais.

Segundo Moreira (2001), quanto aos requisitos da Norma ABNT NBR ISO 14001:2004, a organização deve identificar as possíveis situações emergenciais e definir formas de mitigar os impactos ambientais associados, para atender às situações de emergência. O Coordenador do Plano de Emergência deve efetuar a análise dos riscos identificados no levantamento dos aspectos ambientais e selecionar as situações emergenciais de maior abrangência.

De acordo com Serpa (1992, citado por ALMEIDA, 2007), a análise de risco ambiental consiste na identificação sistemática de elementos e de situações de uma instalação que possam gerar riscos e o gerenciamento de risco é a implantação de medidas e procedimentos técnicos e administrativos que têm como objetivos controlar e reduzir os riscos constatados na fase da análise. Estes procedimentos visam capacitar a empresa para que ela possa reduzir a probabilidade de ocorrência de acidentes e tomar medidas adequadas, quando da ocorrência dos mesmos.

Segundo Almeida (2007), dependendo do potencial de risco do empreendimento e das características do meio onde ele se localiza, a análise de riscos pode ser qualitativa, quando preliminar e/ou quantitativa, quando são calculados os riscos e as vulnerabilidades, dependendo da fase do projeto. Os objetivos das análises são: Identificar e classificar os eventos perigosos por meio de inspeções, investigações e questionários entre outras ações; Determinar, por meio de cálculos de probabilidade, a frequência com que estes eventos ocorrem, no caso de análise de risco quantitativa; Analisar, por meio de modelos matemáticos, os efeitos e danos associados; Determinar as técnicas de controle e mitigação.

A elaboração de estudos quantitativos de análise de riscos requer a estimativa das frequências de ocorrência de falhas de equipamentos relacionados com as instalações ou atividades em análise. Estes dados podem ser difíceis de serem estimados, em função da indisponibilidade de estudos de histórias de acidentes ou de falhas, em bancos de dados de acidentes, os quais não foram registrados ou os quais ainda não aconteceram, como é o caso dos riscos, falhas, acidentes e impactos ambientais que a exploração do pré-sal pode causar no meio ambiente.

Os programas que utilizam a simulação computacional com protótipos virtuais podem modelar condições de operações e de acidentes, que na maioria dos casos não são possíveis de serem reproduzidas em laboratório. O programa de simulação pode efetuar cálculos e analisar situações complexas de eminência ou ocorrência de acidentes e fornecer informações sobre a integridade de estruturas, equipamentos e processos diversos durante suas operações e após a ocorrência de explosões, incêndios, vazamentos, quedas, impactos, falhas diversas e rupturas entre outras situações.

Os diagnósticos fornecidos na simulação computacional são aplicáveis à análise e gerenciamento de riscos e nas previsões de falhas de produtos e processos. Os resultados podem fornecer contribuições significativas para a minimização das situações de riscos e impactos ambientais, redução da ocorrência de acidentes e aumento da confiabilidade do objeto em estudo, como mostrado nos estudos de casos.

Com relação às situações de risco, Cremonesi (2000, citado por MOREIRA, 2001) afirma que é por meio da certificação ambiental que a organização atesta que possui um gerenciamento preventivo das situações de risco potencial e que atende a todos os requisitos de uma Norma Internacional, tal como a Norma ABNT NBR ISO 14001, para suas atividades, produtos, processos e serviços. Para a obtenção desta certificação é necessário implantar inicialmente na organização um Sistema de Gestão Ambiental, no qual se analisam as situações de risco potencial, através da análise de risco.

Por meio da simulação computacional é possível modelar, testar e analisar o comportamento e/ou o desempenho de produtos e processos, em suas condições de operação, sobrecarga e acidentes. Os resultados fornecidos podem ser utilizados na análise e prevenção de situações de risco ambiental potencial e na avaliação de desempenho ambiental.

O Item 3.1.1 da Norma ABNT NBR ISO 14031:2004, define que a “Avaliação de Desempenho Ambiental (ADA) é um processo de gestão interna que utiliza indicadores para fornecer informações, comparando o desempenho ambiental, passado e presente, de uma organização com seus critérios de desempenho ambiental”.

Como definido no Item 3.2.2 desta Norma, os indicadores de desempenho podem ser: Gerenciais: que fornecem informações sobre esforços gerenciais para influenciar o desempenho ambiental das operações da organização; Operacionais: que fornecem informações sobre o desempenho ambiental das operações da organização; De Condições Ambientais: que fornecem informações sobre a condição do ambiental local, regional, nacional ou global.

Por meio da simulação computacional é possível combinar, estudar e otimizar as variáveis de projeto, as quais serão escolhidas com base nos aspectos ambientais significativos da empresa, os quais são definidos pela Norma ABNT NBR ISO 14031:2004 no Item 2.2. como “elementos das atividades, produtos ou serviços de uma organização que podem interagir com o meio ambiente”. Desta forma é possível dimensionar os produtos e processos para se obter a melhoria do desempenho ambiental dos mesmos e conseqüentemente da empresa, tais como, reduções de poluição, do consumo de energia, de materiais, de temperaturas, de níveis de ruído e de vibrações dentre outros. As variações de desempenho podem ser avaliadas e medidas por meio de indicadores de desempenho ambiental operacionais.

A simulação computacional é adequada para a análise de questões ambientais, pois é uma ferramenta de tecnologia limpa que contribui para a prevenção de danos ambientais. Por meio da análise numérica é possível efetuar diversos testes com o uso do protótipo virtual, com os seguintes benefícios, reduzindo-se: O desperdício de material, os quais podem ocorrer quanto é

necessário destruir o protótipo físico em testes de bancada; Os acidentes, os quais podem acontecer durante testes em laboratório; Os custos de materiais e de energia, os quais são consumidos durante os testes de bancada; O tempo do ciclo do projeto e do produto, uma vez que os testes virtuais são muito mais rápidos do que aqueles realizados em bancadas e laboratórios.

Os testes com os protótipos virtuais também podem validar um teste de bancada, que seja requerido por uma certificadora, ou complementar um ensaio não destrutivo.

Os fatos apresentados acima indicam que a ferramenta de simulação computacional possui muitas vantagens, benefícios e aplicações que podem auxiliar a comunidade científica em projetos multidisciplinares envolvendo estudos ambientais. As análises podem também complementar a análise de risco e a avaliação de desempenho ambientais, relacionadas às Normas ABNT NBR ISO 14001:2004 e 14031:2004, e contribuir para o aperfeiçoamento do Sistema de Gestão Ambiental da organização.

Análise de Simulação Computacional

Segundo Assan (2003), há mais de dois mil anos, filósofos gregos já haviam elaborado teorias nas quais supunham que todas as coisas eram formadas por inúmeras partículas, tais como: Leucipo e Demócrito estabeleceram que tudo era constituído por um número infinitamente grande de partículas denominadas, pelo último, de átomos; Eudócio criou o método da exaustão, que consiste em inscrever e circunscrever figuras retilíneas em figuras curvilíneas, para calcular áreas de figuras curvas e volumes de sólidos como esferas e cones. Ele pensava em discretizar, isto é, dividir a figura contínua em partes para facilitar certos cálculos. Este raciocínio serviu de base para a elaboração dos métodos numéricos utilizados atualmente nos programas que executam análises de simulação computacional.

Na década de 40, McHenry e Hrennikoff (1941, citados por ASSAN, 2003) substituíram um elemento estrutural contínuo, tal como uma placa, por uma estrutura formada por barras, seguindo a geometria original e mantendo as mesmas condições de vinculação e cargas.

De acordo com Assan (2003) e Moaveni (2008), a primeira pessoa a desenvolver o Método dos Elementos Finitos foi Courant, um matemático de renome, que utilizou interpolação polinomial em sub-regiões triangulares para investigar a torção de Saint-Venant, em seções transversais de vigas vazadas em 1943. Moaveni (2008) relata que nos anos 50, a empresa Boeing, seguida por outras, utilizou elementos de tensão triangular para modelar asas de aviões.

Com a publicação do trabalho de Turner, Clough, Martin e Topp (1956, citados por ASSAN, 2003), o Método dos Elementos Finitos teve sua formulação estabelecida como é conhecida hoje.

Nos anos 60, pesquisadores começaram a aplicar o Método dos Elementos Finitos em análises de transferência de calor e escoamento de fluidos. Zienkiewicz e Cheung (1967) escreveram o primeiro livro sobre Método dos Elementos Finitos.

Embora a formulação de Clough (1980) fosse conhecida desde o início dos anos 50, o método dos elementos finitos somente passou a ser mais difundido e aplicado em diversas áreas, além da engenharia estrutural, com a evolução e expansão dos computadores de grande porte e posteriormente com os microcomputadores PCs (*Personal Computers*). O autor do nome deste método, em contraposição aos elementos infinitesimais do cálculo diferencial, descreve em seu artigo, o desenvolvimento do método dos elementos finitos.

Segundo Moaveni (2008), há muitas questões na engenharia, para as quais não é possível obter soluções analíticas ou exatas, devido a situações, tais como: A natureza complexa das equações diferenciais que governam o comportamento da estrutura, equipamento, peça, processo ou outro objeto a ser analisado; Dificuldades em se definir as condições iniciais e de contorno ou de fixação do objeto a ser analisado.

Para resolver as questões citadas acima, foram desenvolvidos os métodos numéricos que fornecem soluções aproximadas em pontos discretos (nós) do objeto, o qual é discretizado, isto é, dividido em pequenas sub-regiões denominadas de elementos, que são definidos por pontos nodais.

Os métodos que originaram a análise matricial, embora considerem o meio contínuo discretizado por elementos com propriedades de rigidez e elasticidade conhecidas, não apresentam o aspecto conceitual implícito no Método dos Elementos Finitos.

Segundo Zienkiewicz e Cheung (1967), há duas classes de métodos numéricos a serem utilizados nos programas de simulação computacional para análises estruturais e térmicas: **Diferenças Finitas**: a equação diferencial é escrita para cada nó e as derivadas são substituídas pelas equações de diferenças. Esta aproximação resulta em uma série de equações lineares. Embora de fácil entendimento, este método é difícil de ser aplicado em problemas com geometrias ou condições de contorno complexas e materiais não isotrópicos (com propriedades diferentes nas direções x , y e z); **Elementos Finitos**: usa formulações integrais para criar um sistema de equações algébricas. Uma função contínua é assumida para representar a solução aproximada para cada elemento. A solução completa é gerada conectando ou agrupando as soluções individuais, permitindo a continuidade nas fronteiras dos elementos.

Segundo Assan (2003), o Método dos Elementos Finitos consiste não apenas em transformar o sólido contínuo em um conjunto de elementos discretos e escrever equações de compatibilidade e equilíbrio entre eles. Deve-se também definir funções contínuas que representem, por exemplo, o campo de deslocamentos no domínio de um elemento. A partir daí, obtém-se o estado de deformações correspondente que, associado às relações constitutivas do material, permitem o cálculo do estado de tensões em todo o elemento, o qual é transformado em esforços internos que devem estar em equilíbrio com as ações externas.

Ainda de acordo com o autor, esta formulação é derivada do Método de Rayleigh-Ritz que se baseia na minimização da energia potencial total do sistema, que leva à equação de equilíbrio do mesmo. Esta equação é escrita em função de um campo predefinido de deslocamentos, denominado método dos deslocamentos.

Argyris e Kelsey (1960, citados por ASSAN, 2003) publicaram uma série de trabalhos, nos quais a formulação matricial do Método de Rayleigh-Ritz ficou definitivamente determinada e foi aplicada para analisar principalmente fuselagens e asas de aviões, simulando-as como constituídas por barras e painéis.

Segundo Assan (2003), deve-se atentar para o fato de que os fundamentos nos quais o Método dos Elementos Finitos se sustenta, vêm das teorias e/ou teoremas desenvolvidas por pesquisadores, tais como, Bernoulli, Navier, Lagrange, Cauchy, Mohr, Maxwell, Clapeyron, Castigliano, entre outros.

Nos anos 60 começaram a ser desenvolvidos vários programas de simulação computacional baseados no Método dos Elementos Finitos. Entre estes programas, destacou-se o NASTRAN, utilizado nos projetos aeroespaciais da NASA, para dimensionar as naves e seus componentes mecânicos, com fatores de segurança adequados, visando evitar ou minimizar riscos de falhas devido a fadiga, altas temperaturas e sobrecargas a que as aeronaves estariam sujeitas, especialmente durante as operações de lançamento e retorno à Terra. No entanto, nesta época não se abordavam temas como danos e desempenho ambientais.

Em 1971, foi lançada a primeira versão do programa ANSYS, desenvolvido por John Swanson, que criou a empresa Swanson Analysis Systems. Inicialmente o programa era composto de rotinas escritas na linguagem FORTRAN, para executar análises estáticas lineares estruturais e térmicas, em computadores de grande porte.

Nos anos 80, o programa ANSYS, utilizado nas análises apresentadas neste trabalho, se expandiu com o desenvolvimento de novas rotinas de elementos para a execução de análises dinâmicas, transientes, não lineares, de mecânica da fratura e fadiga.

No início dos anos 90, foi lançada a versão 4.0 para microcomputadores PC 386, que era executada em sistema DOS. Novos elementos foram desenvolvidos, tais como elementos para materiais compósitos, de contato, de radiação, vigas com perfis variados e cascas para análises não lineares. Também foi incluída a análise de escoamento de fluidos, por meio do programa FLOTRAN, que pertencia à empresa COMPUFLO, a qual foi adquirida pela Swanson Analysis Systems. Novos desenvolvimentos foram realizados e o FLOTRAN passou a executar análises de interação fluido-estrutura, muito importantes para se avaliar o efeito do vento em estruturas e da velocidade de fluidos no interior de dutos e equipamentos.

No final da década de 90, a empresa *Swanson Analysis Systems* se tornou uma Sociedade Anônima com ações na Bolsa NASDAQ e passou a se chamar ANSYS, Inc. Novas versões do programa foram lançadas para sistemas WINDOWS, LINUX e HP entre outros, com interface

amigável desenvolvida na linguagem BASIC. Foram desenvolvidos os módulos de otimização de projetos, novos contatos estruturais e térmicos, elementos acústicos e elementos de casca multicamadas entre outras capacidades, para competir com programas tal como o ABAQUS.

A partir de 2000 foi desenvolvida uma nova interface gráfica, mais parecida com o ambiente dos programas de CAD, com módulos de modelagem sólida, geração de malha, cálculo de fadiga e de mecanismos para concorrer com o programa NASTRAN.

Mais recentemente, a empresa ANSYS, Inc. adquiriu as empresas CFX e FLUENT, especialistas em programas de dinâmica de fluidos e a CADOE, especialista em programas de otimização de projetos e análises probabilísticas por meio do Método Variacional.

O programa ANSYS utiliza somente o Método de Elementos Finitos, que efetua e analisa modelos virtuais nos quais o volume permanece constante. Já o CFX e FLUENT pertencem a uma geração mais avançada de programas de simulação computacional, que utilizam o Método de Volume de Controle, o qual permite que o volume do modelo virtual varie.

Os programas CFX e FLUENT são apropriados para modelar escoamentos especiais e efetuar algumas análises, tais como: Escoamentos multifásicos: mistura de sólidos, areia ou lama com líquido e gás, muito comuns nas perfurações de poços da indústria de petróleo e gás; Combustão e reações químicas: mistura e escoamento de gases inflamáveis que variam de volume durante os processos de queima e reações de gases, muito comuns nos incêndios de equipamentos em indústrias químicas, petroquímicas e plataformas de petróleo.

Atualmente o programa ANSYS, com seus novos Módulos de análise dinâmica de fluidos e otimização é líder em seu segmento e realiza inúmeros tipos de análises multifísicas de engenharia, sendo capaz de importa arquivos com modelos sólidos de diversos programas de CAD (*Computer Aided Design*).

METODOLOGIA

Em relação à sua natureza, a pesquisa realizada neste trabalho se classifica como aplicada. Neste estudo são apresentados os benefícios, as vantagens e as aplicações das análises de simulação computacional para a evolução dos Sistemas de Gestão Ambiental, como complemento e refinamento para se efetuar:

- A análise de risco ambiental: quando não é possível modelar o fenômeno físico por meio de experimentos, quando não há dados sobre frequências e probabilidades de ocorrências de acidentes, para verificar causas e conseqüências de acidentes e simular seqüências de acidentes (efeito dominó) por meio de análises em etapas;
- A avaliação de desempenho ambiental: quando se objetiva melhorar o desempenho de produtos e processos para melhorar os indicadores operacionais de desempenho ambiental;

- A implantação e melhoria do Sistema de Gestão Ambiental: quando se pretende adequar processos e produtos para atender os requisitos ambientais, tais como redução dos níveis de poluição, ruídos, vibrações e calor entre outras exigências.

Quanto à forma de abordagem, a pesquisa efetuada é qualitativa. Neste estudo são pesquisados os procedimentos, as ferramentas e as normas utilizadas atualmente para se efetuar a análise de risco, a avaliação de desempenho e a implantação e melhoria do Sistema de Gestão Ambientais, com os objetivos de conhecer e entender melhor, além de verificar o contexto e as etapas das análises, os dados necessários para a utilização das ferramentas disponíveis e os requisitos das normas ambientais, buscando identificar situações em que é possível aplicar a análise de simulação computacional como uma ferramenta que possa complementar e agregar valor aos recursos já utilizados.

Quanto aos objetivos, a pesquisa foi do tipo exploratória. Neste estudo efetua-se um levantamento bibliográfico, definem-se hipóteses e apresentam-se estudos de caso, com análises das aplicações da simulação computacional, as quais podem ser aplicadas em análise de risco, na avaliação de desempenho e na melhoria do Sistema de Gestão Ambientais. As coletas foram efetuadas em livros, normas técnicas e manuais de instituições técnicas citados nas referências bibliográficas, artigos científicos indexados de revistas e jornais (*journals*) científicos encontrados em bases de dados do Portal CAPES tais como Scopus, Compendex on Engineering Village, SciFinder Scholar, ISI Web of Knowledge, periódicos acesso livre, bancos de dissertações e teses de bibliotecas disponíveis na internet, manuais e relatórios de consultorias realizadas com o programa ANSYS.

Método e Técnica da Pesquisa

Neste estudo, são apresentados os fundamentos, benefícios, vantagens e aplicações da simulação numérica a qual se propõe utilizar em análise de risco, na avaliação de desempenho e na melhoria do Sistema de Gestão Ambientais.

Neste caso, utiliza-se o raciocínio indutivo para se propor que a ferramenta de simulação seja utilizada nas análises e certificações ambientais, pela indução de que os inúmeros benefícios, aplicações e resultados obtidos nas análises de simulação, apresentadas nos estudos de casos, se aplicam às análises de risco, avaliação de desempenho e certificação ambientais.

Neste estudo se utilizou a técnica de Observação não Estruturada ou Assistemática, que consiste em recolher e registrar fatos da realidade, não sendo necessário que o pesquisador utilize meios técnicos especiais ou precise fazer perguntas diretas. Neste trabalho a observação é do tipo individual.

Definição do Programa ANSYS de Simulação Computacional

Os programas que executam uma análise de engenharia por meio de simulação computacional, tal como o ANSYS, são compostos de rotinas matemáticas, em geral, desenvolvidas na linguagem de programação FORTRAN, com interfaces gráficas elaboradas em BASIC, JAVA ou outra ferramenta de programa, tendo como exemplo o Programa ANSYS, o qual é utilizado como referência neste trabalho.

Há diversos tipos de rotinas que compõem o Programa ANSYS:

- a) Rotinas comuns aos programas existentes no mercado tais como: de elaboração de malha de elementos finitos, de aplicação de cargas e condições de contorno ou de fixação, de montagem e inversão de matrizes definidas com parâmetros geométricos e dos materiais do objeto, propriedades mecânicas e físicas dos materiais, de algoritmos de solução dos sistemas de equações denominados *Solvers*, de figuras, listagem de resultados e elaboração de relatórios entre outras.
- b) Rotinas específicas com as equações que representam o comportamento dos diversos tipos de elementos, os quais fazem parte da biblioteca de elementos do programa, as quais criam diferenciais e valor científico para os programas, quanto às suas capacidade de: Modelar diferentes tipos de objetos tais como treliças, vigas cascas, sólidos, contatos pontuais e de superfície, sistemas massa/mola/amortecedor, campos magnéticos e escoamentos de fluidos; Representar comportamentos simples (lineares) ou mais complexas (não lineares) tais como: plasticidade, fluência (*creep*), processos térmicos tais como condução, convecção e radiação, escoamento de fluido, geração de um campo magnético, combustão e reações químicas entre outros fenômenos físicos e químicos;
- c) Rotinas específicas para representar fenômenos tais como: trincas, fadiga, terremotos, escavações, rupturas/fraturas de materiais, delaminação (descolamento das camadas de um material compósito), vazamentos e explosões entre outros.

Em geral os programas de simulação são divididos em 03 módulos. No Programa ANSYS tem-se:

- a) Pré-processador: módulo com funções para modelagem do objeto, definição dos atributos do modelo (tipo de elemento, material e propriedades geométricas, físicas e mecânicas), elaboração da malha de elementos finitos, definição e aplicação dos carregamentos e das condições de contorno ou de fixação;
- b) Módulo de Solução: módulo onde são definidos os parâmetros de convergência da análise, o tipo de algoritmo de solução e os diversos tipos de carregamento, quando são aplicados em passos de carga (*load steps*);
- c) Pós-processador: módulo de apresentação dos resultados obtidos, com funções de plotagem e listagem dos valores calculados pelo programa. Inclui um sub-módulo utilizado para gerar curvas dos resultados obtidos nas análises não lineares, em que se trabalha com iterações e incrementos de carga e nas análises transientes, onde os resultados variam ao longo do tempo.

Tipos e Características das Análises e dos Elementos Finitos

As principais análises de simulação realizadas com o programa ANSYS são:

- **Estrutural:** estática, dinâmica (modal/freqüências, superposição modal, transiente, sísmica), flambagem (análise de instabilidade de estrutura ou equipamentos), fadiga, mecânica da fratura. As análises podem utilizar elementos com formulação linear ou com equações que representem as não linearidades geométricas (grandes deslocamentos), de material (plasticidade) e de contatos;
- **Térmica:** regime permanente ou transiente com condução, convecção e radiação;
- **Dinâmica de fluidos:** regime permanente ou transiente, escoamento laminar ou turbulento, com misturas ou escoamentos multifásicos (líquido, sólido e gás), combustão e reações químicas;
- **Eletromagnética:** regime permanente ou transiente, com interação das forças ou de temperaturas oriundas de campos eletromagnéticos, as quais são transferidas a uma estrutura ou fluido.

Há diversos tipos de elementos finitos para modelos sólidos e elementos de volumes finitos para fluidos, os quais são utilizados na modelagem do problema. Estes elementos são definidos por pontos nodais os quais possuem graus-de-liberdade, isto é, variáveis primárias, que são as incógnitas do problema, as quais definem os movimentos do objeto em estudo tais como deslocamentos, rotações e velocidades nas direções X, Y e Z (variáveis vetoriais: com valores diferentes em cada direção) e temperatura (variável escalar).

O programa calcula também as variáveis secundárias, tais como tensões, deformações, fluxos de calor, coeficientes de filme e pressões de contato que dependem dos valores das variáveis primárias e são utilizadas para diversas verificações e avaliações do comportamento do objeto, tais como deformações permanentes, colapso, ruptura e superaquecimento entre outras.

O número de nós de um elemento corresponde ao tipo do polinômio de interpolação utilizado para representar o comportamento das variáveis primárias e secundárias. Elementos com pontos nodais somente nos vértices utilizam polinômio linear e elementos com nós intermediários, no meio das arestas dos elementos utilizam polinômio quadrático.

Para cada tipo de análise deve-se utilizar o elemento com a formulação que atenda ao tipo de comportamento do objeto em estudo. Isto é importante, pois caso a reação do objeto durante o seu movimento seja não linear, os cálculos somente serão corretos se as equações incluírem os termos que modelam e calculam as não linearidades.

Em geral, os elementos possuem as mesmas geometrias, diferindo nos graus-de-liberdade e nas equações, as quais são específicas para o cálculo das variáveis da análise. Os principais tipos de elementos com os correspondentes números de nós são: Pontual: mola, massa e amortecedor com 1 ou 2 nós e contato ponto-a-ponto com 2 nós; Linha (unidimensional): treliça ou cabo (link), viga (beam), duto (pipe) com 2 ou 3 nós; Plano (bidimensionais: quadrado ou triângulo): sólido 2D (plane), casca (shell) e contato superfície-superfície com 4 e 8 nós; Sólido (tridimensionais: hexaedro ou tetraedro): sólido 3D com 8 a 20 nós e contato superfície-superfície com 8 nós.

As variáveis primárias (graus-de-liberdade ou DOFs - *degree of freedom*) e as variáveis secundárias calculadas pelo programa, de acordo com o tipo de análise realizada são as seguintes:

- a) **Estruturais:** Variáveis primárias: deslocamentos nodais; Variáveis secundárias: tensões, deformações, pressões de contato, forças nodais, reações nos pontos de fixação entre outras;
- b) **Térmicas:** Variáveis primárias: temperaturas; Variáveis secundárias: fluxos de calor, coeficientes de filme e gradiente de temperatura;
- c) **Dinâmica de Fluidos:** Variáveis primárias: velocidades do escoamento nas direções X, Y e Z, pressões, energia cinética, dissipação de energia, temperatura; Variáveis secundárias: coeficientes de filme, linhas de corrente, tensões superficiais, percentual de uma substância em uma mistura ou de novas substâncias em reações químicas e taxa de combustão entre outras.
- d) **Eletromagnética:** variáveis primárias: intensidade de corrente, voltagem, força de campo, temperatura; variáveis secundárias: forças do campo magnético, voltagens, linhas de fluxo entre outras.

Para diferentes tipos de análises, há diversos tipos de elementos, os quais são compostos por pontos nodais, com graus-de-liberdade, isto é, variáveis primárias que representam o comportamento da estrutura, processo, escoamento ou campo magnético em diferentes direções.

Os principais carregamentos impostos ao objeto, processo ou escoamento são os seguintes: Estruturais: forças nodais, pressão na linha ou na área, deslocamentos prescritos (impostos), pré-tensão, temperaturas prescritas, velocidade ou aceleração inicial; Térmicos: temperaturas iniciais, fluxo de calor; Escoamentos: temperaturas, velocidades, pressão, energia cinética e dissipação de energia.

As principais condições de fixação ou de contorno aplicadas ao objeto, processo ou escoamento são as seguintes: Estruturais: deslocamentos e rotações nulas, status de um contato (fechado ou aberto); Térmicos: coeficiente de filme, temperaturas inicial, externa e interna em torno do objeto; Escoamentos: temperaturas, velocidades, pressão, energia cinética e dissipação de energia.

As principais propriedades físicas e mecânicas dos materiais utilizadas nas análises são: Estruturais: Módulo de Elasticidade, Coeficiente de Poisson, densidade, curvas de tensão x deformação, no caso de análise com deformação permanente, coeficiente de dilatação térmica; Térmicas: condutividade térmica, calor específico, coeficiente de filme ou de convecção; Dinâmica de Fluidos: viscosidade, densidade.

As propriedades geométricas são as informações sobre a geometria do objeto, as quais devem ser definidas, quando o elemento utilizado não é um sólido (volume). As principais propriedades geométricas dos elementos, chamadas de *Real Constants* no programa ANSYS, são as seguintes: Treliça: área da seção transversal; Viga: área da seção transversal ou espessuras e dimensões da mesa e da alma do perfil; Mola: rigidez, comprimento; Massa: valor da massa; Contato: atrito entre as partes, rigidez; Casca: espessura total, número e espessuras das camadas dos materiais (para compósitos).

Procedimento da Análise de Simulação Computacional

Os principais passos para a execução de uma análise de simulação computacional são:

- 1) Definição do objetivo da análise e dos resultados esperados;
- 2) Definição do tipo de análise a ser realizado;
- 3) Análise dos dados do objeto de estudo: desenhos com dimensões, fotos, arquivos do modelo sólido elaborado em um programa de CAD;
- 4) Obtenção e definição das propriedades físicas e mecânicas dos materiais;
- 5) Obtenção e definição das propriedades geométricas dos elementos que serão utilizados para representar o objeto, tais como treliça, viga, casca, mola e contato entre outros;
- 6) Definição dos carregamentos e local de aplicação dos mesmos;
- 7) Elaboração do modelo sólido bidimensional (plano) ou tridimensional (volume), utilizando as estratégias de modelagem para gerar planos ou volumes distintos de acordo com os tipos de materiais que compõem a peças, com as posições dos carregamentos e dos pontos de fixação;
- 8) Escolha dos tipos de elementos a serem utilizado na discretização (nós e elementos) do modelo;
- 9) Definição dos atributos do modelo para planos e/ou volumes tais como tipo de elemento, propriedades dos materiais e propriedades geométricas;
- 10) Elaboração da malha de elementos finitos. Nas regiões onde há mudanças bruscas de geometria, regiões de furos e quinas, podem ocorrer concentrações de tensões (estrutura), os altos gradientes de temperatura (processo) ou as turbulências (fluido). Nestes locais deve-se preparar uma malha mais refinada, para que os resultados sejam calculados com maior precisão;
- 11) Definição dos parâmetros de convergência da análise e do algoritmo de solução;
- 12) Escolha dos métodos que aceleram a convergência das análises não lineares;
- 13) Armazenamento do modelo e de todos os dados definidos;
- 14) Execução da análise;
- 15) Verificação da convergência da análise e dos resultados obtidos;
- 16) Plotagem e listagem dos resultados;
- 17) Elaboração de curvas com os resultados das análises não lineares (que variam com as iterações de convergência) e/ou transientes (que variam ao longo do tempo);
- 18) Avaliação dos resultados: localização de regiões com altos gradientes de tensões, as quais podem necessitar de refinamento, verificação de valores admissíveis de acordo com as Normas técnicas, identificação de regiões críticas, com concentrações de tensões e deformações permanentes, que apresentam resultados acima dos valores admissíveis pelas Normas técnicas de projeto e operação e análise do comportamento global do objeto entre outros;
- 19) Verificação dos erros do desvio padrão e de energia;
- 20) Refinamento das regiões críticas do modelo onde aparecem os maiores erros;
- 21) Modificação na geometria do objeto nos locais onde ocorrem altas concentrações de tensões;
- 22) Nova execução da análise e verificação dos resultados e erros, para comprovação da eficiência ou não das alterações efetuadas.

RESULTADOS

Os resultados que podem ser obtidos na análise de simulação computacional dependem dos objetivos do estudo. Para que os mesmos sejam calculados é necessário escolher o tipo de análise, o tipo de modelo (uni, bi ou tridimensional), os tipos de elementos com os graus-de- liberdade que representam os movimentos do objeto e os carregamentos adequados, para que se possa obter a representação dos fenômenos que se pretende reproduzir por meio da simulação e dos seus efeitos no objeto de estudo.

Os resultados são calculados nos pontos nodais e nos elementos e plotados ao longo do objeto em diferentes cores que correspondem aos valores obtidos. As cores são identificadas em uma legenda, junto do objeto com faixas de valores da variável para cada cor. Pode-se também plotar curvas que representam o comportamento de uma variável ao longo do tempo ou das iterações de convergência, em um ponto nodal ou elemento específico.

O movimento do objeto durante a análise pode ser reproduzido em uma animação. Este recurso do programa permite a verificação do comportamento do objeto durante a aplicação das etapas (incrementos) de carregamento, do processo de aquecimento ou resfriamento e do escoamento onde pode ocorrer a formação de áreas de turbulência ou a mistura de fluidos.

Tipos de Resultados Obtidos nas Análises com o programa ANSYS

Os principais resultados que podem ser calculados, plotados e listados nos diversos tipos de análise de simulação computacional com o Programa ANSYS são os seguintes:

- a) **Estrutural: Estática:** deformação global, deslocamentos, tensões, deformações e pressões de contato; **Dinâmica:** deformação global do objeto, deslocamentos, tensões e deformações ao longo do tempo e da frequência, modos e frequências de vibração; **Fadiga:** vida útil, tensão máxima e número de ciclos, fatores de segurança; **Mecânica da Fratura:** energia de deformação da trinca; **Flambagem:** modos de flambagem e cargas críticas.
- b) **Térmica:** temperaturas, fluxos de calor, gradientes de temperatura e coeficientes de filme entre outras variáveis;
- c) **Dinâmica de Fluidos:** velocidades, temperaturas, pressões, energia cinética e dissipação de energia, percentual de cada fluido na mistura.

Nestas análises pode-se simular situações de sobrecarga do objeto, por meio da aplicação de carregamentos e visualização dos resultados em etapas (*load steps*), o que permite efetuar a previsão de riscos e acidentes ambientais, com a identificação da carga limite ou da temperatura máxima de operação e com a verificação da alteração de um processo e da variação de um escoamento, tais como:

- Impactos entre plataformas, plataforma e navio ou outros obstáculos que possam ser modelados. Estes impactos ou choques podem afetar a integridade estrutural da plataforma e do navio, levando a rupturas e/ou colapsos, quedas de estruturas e equipamentos e/ou

afundamento dos mesmos com, explosões, derramamentos de substâncias tóxicas na plataforma, navio e mar, incêndios e ferimentos ou mortes de pessoas;

- Explosões e efeitos de ondas de choque tais como deformações permanentes, rupturas, colapsos e incêndios que podem causar vazamentos em submarinos nucleares, equipamentos, dutos e navios que transportam óleo e substâncias tóxicas, poluindo o solo, água e ar, causando mortes de indivíduos que operam estes equipamentos, além de destruição da vida marinha;
- Rupturas de estruturas, componentes mecânicos ou equipamentos, com gases ou líquidos tóxicos, submetidos a cargas cíclicas, tais como, altas variações de pressões ou de temperatura, causando poluições ambientais diversas e mortes de indivíduos;
- Incêndio em equipamentos causados por vazamentos de gases inflamáveis, os quais se concentram na atmosfera e podem causar ignições e explosões. O aquecimento devido ao incêndio causa a perda de resistência do material dos equipamentos e das estruturas onde estão apoiados, levando a deformações permanentes, rupturas ou colapso dos mesmos, com danos irreversíveis, mortes de indivíduos e poluições diversas;
- Explosão ou queda de uma aeronave sobre um reator nuclear, causando rupturas e vazamentos de substâncias radioativas, ferimentos ou mortes de pessoas e desastres ambientais no ar, água e solo, muitas vezes irreversíveis; Quedas de barragem, encostas e estradas próximas a corpos d'água, com poluição dos mesmos, mortes de pessoas e da vida aquática.

Verificação e Validação dos Resultados Obtidos

Como a simulação computacional é uma ferramenta de análise que utiliza um método numérico para o cálculo das variáveis do problema, os resultados são aproximados. O profissional responsável pela execução da análise deve efetuar algumas verificações e validações para se certificar da convergência e da precisão dos resultados calculados pelo programa.

Inicialmente, devem ser verificados os dados de entrada do modelo: dimensões do objeto, valores ou curvas das propriedades físicas e mecânicas dos materiais, carregamentos, condições de contorno e de fixação do objeto, tipos de elementos escolhidos com os graus-de-liberdade adequados e o tipo de análise. Caso um ou mais dados de entrada da análise estejam errados, ou seja, especificados inadequadamente, os resultados obtidos estarão errados, pois o programa apenas executa os cálculos com os valores e as formulações especificadas pelo usuário.

Caso apareçam regiões com altos gradientes de tensões, temperaturas ou velocidades, deve-se executar todas as verificações indicadas a seguir ou algumas delas, dependendo do grau de erro encontrado nos resultados ou da precisão obtida após os primeiros refinamentos da malha:

- a) Estudo de sensibilidade de malha: consiste no refinamento da malha, isto é, redução do tamanho dos elementos do modelo nas regiões com valores elevados e execução de uma nova análise.

Havendo alteração dos valores, deve-se efetuar novo refinamento até que se obtenha uma curva assintótica, isto é, uma curva na qual os resultados convergem para um determinado valor;

- b) Verificação das tensões nos pontos nodais das regiões críticas, que sejam comuns a vários elementos. Esta avaliação é muito importante porque a formulação de elementos finitos não garante a continuidade das variáveis secundárias, tensões ou fluxos de calor nos pontos nodais dos elementos. Isto significa que estes valores, em um nó comum a dois elementos não são iguais. Para que o cálculo das variáveis secundárias seja viabilizado, os matemáticos definiram posições dentro do elemento, onde estes valores podem ser calculados com precisão de engenharia. Estas posições são denominadas de Pontos de Gauss. Os valores obtidos podem ser extrapolados para os pontos nodais. Embora a princípio, esta situação possa parecer uma limitação do método, na verdade tornou-se uma medida da precisão dos resultados. Caso os valores encontrados para estas variáveis sejam muito diferentes (mais do que 5%) para um mesmo ponto nodal pertencente a vários elementos, a convergência e a precisão dos resultados devem ser reavaliadas. Neste caso, deve-se efetuar o refinamento da malha e realizar uma nova avaliação das diferenças dos valores das variáveis em um ponto nodal pertencente a vários elementos;
- c) Caso um modelo seja elaborado com um elemento de casca de 4 nós, com polinômio linear e aproximação da equação da elástica, desconsiderando as tensões na espessura do objeto em análise, pode-se trocá-lo por um elemento de 8 nós, com polinômio quadrático, ou se elaborar outro modelo com elemento sólido, que utiliza a equação da elástica completa. Os resultados devem ser semelhantes, caso contrário, o elemento de casca não é correto para representar o comportamento do objeto em análise;
- d) Caso uma análise seja linear e haja dúvida sobre a existência de alguma não linearidade, pode-se trocar o elemento com a formulação linear por outro com a não linear;
- e) Em casos mais complexos, após o estudo de sensibilidade de malha, pode-se executar as análises com diferentes programas de simulação computacional, utilizando-se elementos com formulações simplificadas e completas. Os resultados devem ser similares. Este procedimento já é adotado para a certificação de produtos pela ISO 9001;
- f) Em alguns casos, as certificadoras exigem testes de carga em laboratório para validação dos modelos computacionais. Neste caso, deve-se verificar se o objeto original ou o protótipo físico utilizado no teste possui o mesmo material, dimensões iguais ou proporcionais às do modelo virtual e se é submetido às mesmas condições de fixação ou contorno e localização dos carregamentos, utilizadas na simulação computacional. Caso contrário, os resultados serão diferentes.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nas últimas décadas houve um aumento significativo do número de acidentes ambientais, com mortes de seres humanos e enormes danos à fauna e flora do planeta Terra. Como consequência do crescimento de desastres ambientais e devido a uma maior conscientização das autoridades e da população com relação às questões ambientais, as legislações ambientais estão se tornando mais rigorosas e a sociedade está exigindo das empresas o desenvolvimento de uma política ambiental e de sustentabilidade, visando a preservação do meio ambiente, por meio da

redução do consumo de recursos não renováveis, da aplicação de medidas para eliminar e/ou mitigar as diversas formas de poluição e do projeto e operação de processos limpos e de produtos recicláveis que não causem danos ambientais e que possam ser re-manufaturados.

Diante das atuais exigências, muitas empresas estão incluindo em suas estratégias a Política Ambiental, a implantação de um Sistema de Gestão Ambiental além da Análise de Risco, Avaliação de Desempenho e Certificação Ambientais, para a melhoria de seus processos, produtos e serviços, visando se tornarem mais competitivas e/ou líderes de mercados nos setores nos quais atuam.

No entanto, para atrair mais consumidores, permanecer no mercado e se expandir, as empresas estão percebendo que necessitam gerar diferenciais, os quais são designados por Kim e Mauborgne (2005), professores do INSEAD (*Institut Européen d'Administration des Affaires*- Instituto Europeu de Administração de Negócios), como 'Estratégia do Oceano Azul'. Este diferencial pode ser alcançado por meio do uso de ferramentas de análise numérica, tal como um programa de simulação computacional, o qual pode trazer inúmeros benefícios para a empresa.

A proposta apresentada neste estudo para utilização da simulação computacional na análise de risco e avaliação de desempenho ambiental e na melhoria do Sistema de Gestão Ambiental visa apresentar as aplicações e benefícios que a análise de simulação pode trazer para a gestão ambiental das empresas. Os resultados obtidos podem auxiliar na solução das questões ambientais dessas empresas e colaborar para que elas alcancem um diferencial competitivo, o qual poderá se tornar o seu oceano azul.

As análises de simulação computacional podem ser úteis na prevenção e/ou mitigação dos riscos e impactos ambientais, na avaliação do desempenho ambiental dos produtos, processos e serviços e na melhoria do Sistema de Gestão Ambiental.

Para a análise de risco ambiental, verificou-se que os resultados da análise de simulação são importantes, pois, para o uso das ferramentas e métodos de análise de risco, em muitos casos são necessários dados de riscos e/ou acidentes anteriores, os quais não são encontrados em bancos de dados, uma vez que os riscos a serem analisados e os acidentes mais recentes decorrem do uso de novas tecnologias e, portanto, são riscos e acidentes sem histórico e sem dados precisos, especialmente quando é necessário realizar uma análise quantitativa de riscos.

Muitos destes acidentes ambientais são causados por falhas em equipamentos ou estruturas que utilizam novas tecnologias complexas e são submetidos a altos carregamentos, como a boca de sino, ou sofrem danos por reações químicas, como a barragem, ambos apresentados nos estudos de casos. Como não há normas técnicas para o dimensionamento ou análise de tensões de alguns equipamentos e estruturas, a ferramenta mais adequada no momento para a verificação da integridade e confiabilidade estrutural de objetos e do comportamento de processos é o programa de simulação computacional, que utiliza métodos

numéricos para calcular as variáveis de projeto e fornece resultados com precisão requerida na engenharia.

Pode-se também analisar comportamentos de equipamentos, estruturas e processos que em muitos casos não podem ser observados em laboratório, devido ao tamanho do objeto, à destruição do mesmo ou às próprias condições de riscos geradas durante os testes, não sendo possível acompanhar a seqüência dos eventos, fornecida na análise de simulação em etapas.

Na avaliação de desempenho ambiental a análise de simulação pode trazer inúmeros benefícios para a empresa, tais como os testes com protótipos virtuais, sem gastos de materiais e redução do consumo de energia, para se obter a melhoria e a otimização de produtos e processos, com reduções dos custos de construção dos protótipos físicos e do tempo de análise.

Na análise de simulação, aplicável à avaliação de desempenho ambiental, pode-se estudar índices de desempenho ambiental operacionais relacionados a consumos de material e energia, tempo da peça em operação e emissões devido às operações, como o calor. Na melhoria do Sistema de Gestão Ambiental (SGA), a análise de simulação pode trazer contribuições significativas para a empresa, auxiliando no controle dos aspectos e impactos ambientais e na prevenção e/ou mitigação de riscos ambientais, como mostrado nos estudos de casos. No mercado nacional e internacional, a valorização das ações das empresas que possuem SGA e especialmente a certificação ambiental tem sido significativa, enquanto as ações das empresas que têm sido responsáveis por desastres ambientais estão desvalorizando, como aconteceu recentemente com a empresa *British Petroleum*.

Por meio das aplicações citadas, verifica-se que a análise de simulação possui inúmeras aplicações e soluções para as questões ou desafios ambientais que ocorrem nas indústrias *offshore*, mecânica, siderúrgica, nuclear, química, de energia e da construção civil entre outras

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT NBR NBR ISO 14001:2004. **Sistemas de gestão ambiental**: requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

ABNT NBR NBR ISO 14031:2004. **Gestão ambiental**: avaliação de desempenho ambiental: diretrizes. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

ALMEIDA, J. R.. **Normalização, certificação e auditoria ambiental**. Rio de Janeiro: THEX, Almeida Cabral, 2008.

ALMEIDA, J. R.. **Gestão ambiental para o desenvolvimento sustentável**. Rio de Janeiro: THEX, 2008.

ALMEIDA, J. R.. **Gerenciamento ambiental**. Rio de Janeiro: THEX, 2007.

ALMEIDA, J. R., LINS, G. A., QUEIROZ, C.; PINNA, F.. Análise de nove auditorias ambientais. **Mundo & Vida**, v.5, n.1, p.29-36, 2004.

ANSYS. **ANSYS manuals**: analysis procedures, theory, elements, verification manual. 12 ed. Pittsburgh, 2009.

ASSAN, A. E.. **Método dos elementos finitos**. 2 ed. Campinas: UNICAMP, 2003.

BATHE, K. J.. **FEA: finite element procedures**. New Jersey: Prentice Hall, 2007.

CLOUGH, R. W.. The finite element method after twenty-five years: a personal view. **Computers & Structures**, v.12, p.361-370, 1980.

CORRÊA, M. D.. **Relação entre o nível de divulgação ambiental e o desempenho ambiental das empresas componentes do Índice BOVESPA**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2009.

DAGNINO, R. S.; JUNIOR, S. C.. Risco ambiental: conceitos e aplicações. **Climatologia e Estudos da Paisagem**, v.2, n.2, 2007.

FILHO, J. S.. **Instrumentos políticos e riscos ambientais urbanos**. **Revista Eco 21**, v.8, n.81, 2003.

KIM, W. C.; MAUBORGNE, R.. **A estratégia do oceano azul**. 13 ed. Rio de Janeiro: Campus, 2005.

MOAVENI, S.. **Finite element analysis: theory and application with ANSYS**. 3 ed. New Jersey: Person Prentice Hall, 2008.

MOREIRA, M. S.. **Estratégias e implantação do sistema de gestão ambiental: modelo ISO 14000**. Belo Horizonte: Desenvolvimento Gerencial, 2001.

MOURA, L. A. A.. **Qualidade e gestão ambiental**. 4 ed. São Paulo: Juarez de Oliveira, 2004.

ZIENKIEWICZ, O. C.; CHEUNG, Y. K.. **The finite element method in structural and continuum mechanics**. London: McGraw-Hill Companies, 1967.