



II Workshop de Técnicas de I.A. Aplicadas a Sistemas de Potência e Industriais

APLICAÇÕES DE TÉCNICAS DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL À OPERAÇÃO EM TEMPO-REAL DE SISTEMAS DE POTÊNCIA

Gilberto P. Azevedo¹ – Victor Navarro A. L. da Silva¹ – Alan Borsato¹ – Roberto Baitelli¹ – Djalma M. Falcão²
Marcelo B. da Silva³ – Mônica V. F. Figueiredo¹ – Cybele L. Reis³ – Guilherme F. Ribeiro¹ – Ricardo Linden³

¹CEPEL - ²COPPE-UFRJ - ³FPLF

RESUMO: *As técnicas de Inteligência Artificial encontram um campo fértil para utilização na supervisão e controle em tempo real de sistemas elétricos de potência. Neste trabalho é apresentada a experiência do CEPEL neste assunto, enfatizando-se as áreas de Sistemas Especialistas, Tecnologia de Agentes e Sistemas Interativos. O objetivo é apresentar os resultados do uso destas tecnologias em Centros de Controle.*

Na área de Sistemas Especialistas são mostrados os produtos do CEPEL com desenvolvimento já consolidado ou em consolidação (recomposição de sistemas elétricos após desligamentos e processamento de alarmes), e também os novos desenvolvimentos em andamento. Outro tópico abordado é a aplicação da Tecnologia de Agentes ao desenvolvimento de software, um assunto que ganha importância com as transformações estruturais no setor elétrico. Finalmente é apresentada a pesquisa exploratória, ainda na fase inicial, sobre o uso de técnicas de Sistemas Interativos como alternativa às abordagens algorítmicas tradicionais para a análise do comportamento de sistemas elétricos.

PALAVRAS-CHAVE: *Inteligência Artificial, Tecnologia de Agentes, Sistemas Especialistas, Sistemas Interativos, Centros de Controle, EMS, SCADA, SAGE, Recomposição, Processamento de Alarmes.*

1.0 INTRODUÇÃO

O CEPEL possui uma ampla experiência na supervisão e controle em tempo real de sistemas elétricos. O SAGE (Sistema Aberto de Gerenciamento de Energia) desenvolvido pelo CEPEL a partir de 1992 [1-3], é o SCADA/EMS de maior difusão no setor elétrico brasileiro. Em paralelo com o desenvolvimento do SAGE, a utilização de técnicas de Inteligência Artificial nos aplicativos desenvolvidos pelo CEPEL também se expandiu continuamente. A incorporação destas técnicas ao software integrado ao SAGE foi, portanto, uma consequência natural da co-evolução destas linhas de desenvolvimento.

Os Sistemas Especialistas foram a primeira área da Inteligência Artificial a ser utilizada em produtos para a operação em tempo real integrados ao SAGE. As primeiras aplicações concentraram-se no apoio à recomposição do sistema elétrico após desligamentos, e no processamento de alarmes para diagnóstico de faltas. Os bons resultados obtidos recomendaram a generalização do uso de Sistemas Especialistas para a automatização de uma ampla variedade de outros procedimentos da operação, dando origem ao projeto SAGE-EXPERT.

Uma outra linha de pesquisa, bastante distinta, trata do desenvolvimento de software capaz de atuar de forma eficiente na nova estrutura do setor elétrico. De fato, é previsível que as transformações drásticas em curso no setor elétrico atingirão gradualmente a própria estrutura dos centros de controle em tempo real. Os ambientes relativamente controlados e “bem comportados” dos atuais centros de controle serão substituídos aos poucos por sistemas abertos, nos quais os participantes poderão entrar, agir e sair de acordo com seus próprios interesses. Os programas computacionais dos centros de controle passarão a depender fortemente de fontes de dados sobre as quais não possuem controle direto, e precisarão estar aptos a negociar e a atuar em ambientes incertos. A Tecnologia de Agentes, como um ramo da Inteligência Artificial Distribuída, vem sendo adotada como uma das possíveis alternativas para o desenvolvimento de software capaz de atuar nesses ambientes abertos e incertos.

Uma outra aplicação de técnicas de Inteligência Artificial à operação em tempo real – que pode ser classificada como revolucionária – é o uso de Sistemas Interativos como uma alternativa aos tradicionais programas

algorítmicos. Esta linha de pesquisa ainda está na sua fase inicial, e seus resultados concretos ainda não podem ser previstos. Mas, se bem sucedida, será uma alternativa que permitirá representações mais ricas, mais flexíveis e mais realistas na análise do comportamento de sistemas elétricos de grande porte.

Na Seção 2 é apresentada a experiência do CEPEL no uso de Sistemas Especialistas em aplicações em tempo real; na Seção 3, são descritas as pesquisas relacionadas à aplicação da Tecnologia de Agentes no desenvolvimento de software. O potencial do uso dos Sistemas Interativos, assim como o estágio atual da pesquisa, são descritos na Seção 4. Finalmente, as avaliações são apresentadas na Seção 5.

2.0 SISTEMAS ESPECIALISTAS NO SAGE: CONSOLIDANDO UMA EXPERIÊNCIA POSITIVA

A aplicação das técnicas de Inteligência Artificial ao SAGE começou pelos Sistemas Especialistas, que são uma área consolidada e de valor prático comprovado. As aplicações já desenvolvidas e incorporadas ao SAGE visam o apoio à recomposição de sistemas elétricos após desligamentos imprevistos e o processamento inteligente de alarmes. Os bons resultados obtidos levaram ao projeto SAGE-EXPERT, que visa desenvolver um ambiente para uso genérico de Sistemas Especialistas em aplicações de tempo real.

2.1 Apoio à Recomposição de Sistemas Elétricos

A recomposição do sistema elétrico após desligamentos imprevistos [20] talvez seja a situação mais crítica enfrentada pelos operadores dos Centros de Controle de energia elétrica. O número de consumidores que subitamente encontram-se sem energia elétrica pode chegar a vários milhões, dependendo do porte das instalações e do alcance do problema. Os consumidores, naturalmente, aguardarão impacientemente a reenergização no menor prazo possível.

Nestas situações, onde os operadores ficam sob altíssimo grau de estresse e precisam agir com grande rapidez e precisão, a possibilidade de ocorrência de erros cresce muito. A disponibilidade de uma ferramenta computacional que auxilie os operadores nestes momentos críticos, indicando as melhores ações a serem tomadas para a recomposição rápida do sistema, pode reduzir em muito o tempo necessário para a recomposição, a possibilidade de erros e também o nível de estresse dos operadores. A reenergização rápida e segura das instalações reduz os prejuízos dos consumidores e melhora os índices de qualidade de fornecimento da empresa.

Para atingir estes objetivos é comum a realização de estudos prévios, fora do ambiente de tempo real, visando determinar os melhores procedimentos de recomposição (denominados Instruções de Operação, ou IOs). As IOs são procedimentos detalhados, normalmente descrevendo um grande número de condições que devem ser examinadas cuidadosamente pelo operador antes de ser tomada qualquer medida. A análise pelo operador de todas estas condições, durante os instantes nervosos do desligamento, é uma tarefa relativamente demorada e sujeita a erros. Portanto, a validação automática e imediata das IOs após a ocorrência do problema, com base em dados de tempo real, produz resultados mais confiáveis, reduz o risco de erros e minimiza a duração do desligamento.

Esta necessidade de validação das IOs sugere o uso de Sistemas Especialistas integrados ao ambiente de tempo real dos Centros de Controle. Esta abordagem foi adotada pelo CEPEL [13-14], integrando-se um *shell* comercial de Sistemas Especialistas (o Advisor, da Blaze Software) ao SAGE.

Foram desenvolvidos módulos de controle, na linguagem Java, para integrar o banco de dados de tempo real do SAGE ao *shell*. Estes módulos repassam dados de tempo real para a máquina de inferência do Sistema Especialista. No sentido inverso, os resultados do processamento da máquina de inferência são inseridos, também pelos módulos de controle, no banco de dados de tempo real do SAGE. Assim, os resultados ficam disponíveis para consulta através do programa Visor de Telas, que faz parte da interface gráfica do SAGE.

O produto resultante foi um ambiente integrado ao tempo real do SAGE para apoio à recomposição de sistemas elétricos, denominado RECOMP, cuja arquitetura é mostrada na Figura 1.

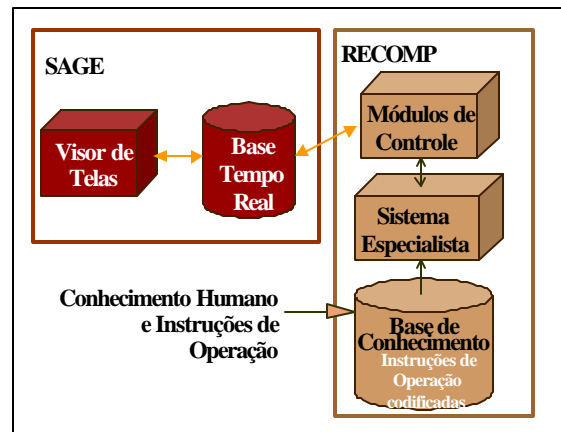
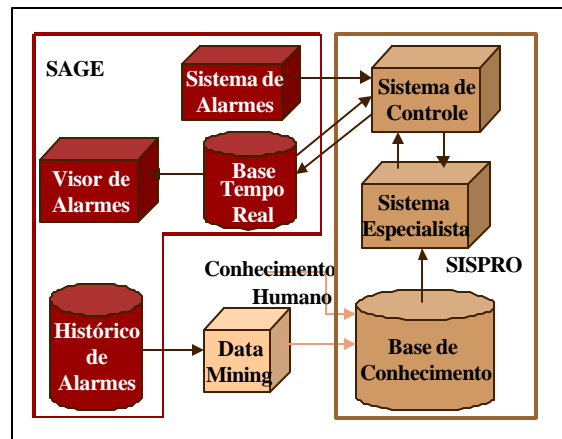


Figura 1 – Integração do RECOMP ao SAGE

2.2 Processamento Inteligente de Alarmes

Apesar da evolução dos sistemas elétricos de potência, a ocorrência de falhas ainda é um fato corriqueiro. Nestas situações a quantidade de alarmes gerados pode ser elevada, fazendo com que o operador tenha dificuldades em diagnosticar as verdadeiras causas dos distúrbios e em determinar as ações corretivas a serem executadas. Conseqüentemente, existe um interesse crescente no desenvolvimento de sistemas que possam ajudar ao operador a identificar as falhas que geraram os alarmes [15].

O SISPRO (Sistema Inteligente de Processamento de Alarmes) tem como objetivo aplicar técnicas de Sistemas Especialistas para diagnóstico de falhas em tempo real e auxiliar o operador na determinação das origens dos distúrbios. As vantagens são claras:



- *Maior segurança na seleção de medidas corretivas* – O SISPRO, além de identificar os eventos que originaram os múltiplos alarmes, pode determinar as causas de eventos. Pode também informar ao operador como chegou a estas causas e sugerir ações corretivas. Isto pode reduzir o estresse do operador durante a ocorrência de distúrbios e aumentar a confiabilidade do sistema elétrico.
- *Redução dos riscos no restabelecimento da rede* – O diagnóstico de distúrbios depende muito da experiência do operador. Um sistema de processamento de alarmes facilita a escolha de ações corretivas apropriadas e torna o sistema mais seguro.
- *Introdução de ferramental para treinamento de operadores* – O diagnóstico inteligente pode auxiliar no treinamento de novos operadores e na manutenção do conhecimento adquirido pelos operadores mais experientes, através da representação de forma sistemática do conhecimento sobre o sistema de potência (tornando-o disponível para os novos operadores), e também através de simulações onde os operadores são apresentados a diversas situações críticas.

A opção pelo uso de Sistemas Especialistas foi feita após uma análise comparativa envolvendo outras técnicas de Inteligência Artificial (Redes Neurais e Lógica Fuzzy) [15-17]. Os principais motivos foram:

- A descrição das falhas pode ser feita de forma natural e intuitiva, não exigindo do especialista um esforço muito grande para representar o seu conhecimento sobre o sistema elétrico.
- Acrescentar ou modificar informações na base de conhecimento é bastante simples. Esta característica é muito desejável, dado que os sistemas elétricos sofrem constante evolução.
- Maior facilidade para manipular a temporização dos alarmes.

A principal desvantagem dos Sistemas Especialistas é a sua incapacidade de generalização. Ou seja, estes sistemas só respondem a eventos previstos em sua base de conhecimento. Assim, se não ocorrer um alarme necessário à caracterização de uma determinada falha (por problema de comunicação, por exemplo), ou mesmo se houver o funcionamento incorreto do sistema de proteção, o sistema não seria capaz de emitir um diagnóstico. Este problema foi contornado criando-se um mecanismo de redundâncias e probabilidades que tornam o sistema robusto em relação a esta situação. No caso da falta de um ou mais alarmes, o sistema ainda é capaz de emitir um diagnóstico, embora o grau de confiança neste diagnóstico seja reduzido. Isto foi possível graças à inclusão do conhecimento sobre a relação entre os vários alarmes, levantado a partir do conhecimento técnico sobre o esquema de proteção e de um "data mining" realizado com históricos de eventos ocorridos e registrados pelo sistema de supervisão.

O SISPRO demonstrou ser estável e possuir capacidade de generalização. Ele é capaz de efetuar diagnósticos mesmo em situações onde o conjunto de alarmes é ruidoso ou inconsistente. Outra característica importante é a facilidade de expansão e manutenção, permitindo acrescentar ou modificar informações relativas a subestações ou equipamentos.

Estrutura do SISPRO

O SISPRO integra-se ao sistema de alarmes do SAGE, recebendo os eventos relativos às alterações ocorridas no sistema e processando-as através de um Sistema Especialista. Os diagnósticos são enviados de volta para o sistema de alarmes e apresentados no Visor de Alarmes do SAGE, através de um macro-alarme criado especialmente para este fim. Isto pode ser visto esquematicamente na Figura 2.

Figura 2 – Integração do SISPRO ao SAGE

2.3 SAGE-EXPERT

As possibilidades de aplicação de Sistemas Especialistas à supervisão e controle de sistemas elétricos em tempo real não se limitam à recomposição e ao processamento de alarmes. De modo geral, qualquer aplicação que vise incorporar o conhecimento humano aos procedimentos automáticos dos Centros de Controle poderá proporcionar ganhos de tempo, redução de erros, codificação do conhecimento de técnicos experientes, automatização de procedimentos executados etc.. Estas aplicações podem ser sofisticadas, como o controle automático de estudos envolvendo funções de Análise de Redes, ou extremamente simples: por exemplo, uma única regra que ative um programa em um certo horário. Ou seja, deve ser aberta a possibilidade de registrar, com simplicidade e facilidade, qualquer tipo de conhecimento dos operadores ou engenheiros que possa ser expresso em forma de regras.

O principal obstáculo para a plena utilização deste recurso na supervisão e controle é a inexistência de uma plataforma de Sistemas Especialistas versátil e de utilização muito simples integrada ao ambiente do Centro de Controle. O SAGE, como o software de supervisão e controle mais difundido no Brasil, é o ambiente mais apropriado para a integração de uma plataforma deste tipo.

O projeto SAGE-EXPERT, que está sendo iniciado no CEPEL, procurará atingir este objetivo. No novo ambiente serão integradas as funcionalidades do RECOMP, do SISPRO, e quaisquer outras que venham a ser necessárias.

3.0 A TECNOLOGIA DE AGENTES: UMA SOLUÇÃO PARA SISTEMAS ABERTOS?

É um fato bem conhecido que os sistemas de informação vêm evoluindo continuamente em direção à descentralização do processamento. As redes de computadores, que ganharam espaço a partir da década de 80, expandiram-se e libertaram-se dos limites geográficos, atingindo nível mundial com a Internet.

A expansão das redes veio acompanhada de uma crescente perda de controle sobre os participantes e suas ações. Se uma pequena rede local pode ser relativamente bem controlada e monitorada, a situação é totalmente diversa em redes como a Internet. Nessas redes de grande porte não há controle central, e os participantes em geral estão livres para agir segundo seus próprios interesses. Frequentemente os participantes podem entrar ou sair, atender ou não às solicitações recebidas, e até mesmo atuar de forma maliciosa, quase sem qualquer tipo de controle ou impedimento. A composição destas redes é incerta e dinâmica, e o ambiente não pode ser considerado totalmente seguro. Sistemas que caracterizam-se por cenários como estes são em geral denominados *Sistemas Abertos*.

Na próxima subseção será mostrado que o ambiente da operação em tempo real do sistema elétrico, e em especial o dos Centros de Controle, tenderá a se aproximar gradualmente do conceito de *Sistemas Abertos*.

3.1 As Transformações na Estrutura da Operação em Tempo Real dos Sistemas Elétricos

As primeiras gerações de Centros de Controle de Energia Elétrica diferiam muito entre si quanto à arquitetura computacional [4-6]. Mas, em relação ao ambiente operativo, apresentavam muitas características em comum:

- Operação orientada por critérios técnicos;
- Processamento computacional concentrado no interior do ambiente físico dos Centros de Controle;
- Conexão fraca com outros parceiros ou outros setores da empresa;
- Processamento rigidamente controlado e organizado.

Apesar de a expressão “sistemas abertos” ter sido usada para designar a geração mais recente de Centros de Controle, neste caso a abertura referia-se apenas à arquitetura computacional; no que diz respeito às interações com parceiros externos, os Centros de Controle ainda são sistemas bastante fechados. Esta estrutura operativa reflete a organização do próprio setor elétrico antes das recentes transformações estruturais.

O novo cenário do setor elétrico, aliado à evolução das telecomunicações e das redes de computadores, gerará mudanças na estrutura dos Centros de Controle. Novos participantes começam a desempenhar papéis importantes: produtores independentes, agências reguladoras, grandes consumidores, fornecedores de serviços diversos etc.. O desmembramento das grandes empresas concessionárias e a entrada de novas empresas no mercado contribuirão para o aumento do número de participantes. A integração do Centro de Controle com outras áreas da empresa tornar-se-á cada vez mais importante em um ambiente competitivo. O resultado final será que os Centros de Controle deixarão de ser ambientes autônomos, e precisarão interagir intensamente com parceiros situados fora de seus limites físicos. Os Centros passarão a depender cada vez mais de informações produzidas externamente. Como em geral os parceiros externos não estarão subordinados ao Centro, eles poderão atender ou não às solicitações de acordo com seus próprios interesses. A confiabilidade das informações recebidas desses parceiros (que podem ser direta ou indiretamente competidores potencialmente hostis) também passará a ser uma preocupação.

Em resumo, o ambiente organizado e relativamente seguro dos atuais Centros de Controle tenderá a ser substituído por um ambiente aberto e incerto, que se aproximará cada vez mais do conceito de *Sistemas Abertos* apresentado na subseção anterior. Estas transformações certamente terão impacto na arquitetura dos Centros de Controle.

3.2 Desenvolvimento de Software para Sistemas Abertos

O desenvolvimento de software para *Sistemas Abertos* traz novos desafios, pois as metodologias tradicionais foram concebidas para cenários melhor comportados. Por este motivo, os problemas associados aos cenários descentralizados têm sido objeto de pesquisa intensa em diferentes áreas da Informática, incluindo Orientação a Objetos e Inteligência Artificial.

A abordagem mais comum é o abandono das tentativas de modelagem completa de uma empresa, sistema ou processo em favor do desenvolvimento de componentes de software menores, flexíveis, autônomos e com grande capacidade de interagir com outros componentes dispersos geograficamente. A Tecnologia de Agentes, proposta originalmente no contexto da Inteligência Artificial Distribuída, é uma abordagem muito promissora para aplicação em sistemas distribuídos e sem controle central.

3.3 A Tecnologia de Agentes

Apesar do número crescente de pesquisadores dedicados a diferentes aspectos da Tecnologia de Agentes desde a década de 80, o conceito de agentes ainda carece de uma definição formal aceita universalmente [7,8,10]. Isto não

impediu o surgimento de uma tendência a reorganizar a área de Inteligência Artificial em torno do conceito de agentes [9].

Generalizando, agentes são entidades de software que possuem as seguintes características principais [11]:

- *Autonomia*: os agentes atuam sem necessidade de intervenção externa e têm algum tipo de controle sobre suas ações e seu estado interno.
- *Sociabilidade*: os agentes interagem com outros agentes através de uma linguagem de comunicação apropriada.
- *Reatividade*: os agentes são capazes de perceber mudanças nos ambientes em que estão inseridos e respondem a essas mudanças quando necessário.
- *Pró-Atividade*: os agentes possuem suas próprias metas; suas ações não são apenas reações a mudanças no ambiente mas visam também alcançar essas metas.

Na abordagem adotada neste trabalho, agentes são definidos como *objetos* que:

- Possuem seus próprios objetivos;
- São capazes de perceber fatos sobre o ambiente em que estão inseridos e de reagir a eles de forma adequada;
- Comunicam-se através de uma linguagem independente de contextos específicos.

Nesta abordagem os agentes são considerados uma categoria particular de objetos, com características especiais. Isto torna possível o aproveitamento da experiência disponível em desenvolvimento de software orientado a objetos.

Finalmente, é importante ressaltar que a Tecnologia de Agentes não é uma solução revolucionária para todos os problemas associados aos sistemas abertos, mas simplesmente uma abstração apropriada ao desenvolvimento de software para esta classe de sistemas.

3.4 A Construção de Sistemas Multi-Agentes

No caso dos Sistemas Abertos, as vantagens do uso de agentes decorrem principalmente da operação conjunta de diversos agentes. Há diversas abordagens diferentes para a construção desses sistemas multi-agentes. Para os objetivos deste trabalho, é útil distinguir entre duas abordagens para a arquitetura geral de sistemas multi-agentes: a *bottom-up* e a *top-down*.

Na abordagem *top-down*, o sistema de agentes possui uma organização preestabelecida e os agentes cooperam para atingir um objetivo comum também predefinido. Na abordagem *bottom-up*, por outro lado, não há nenhuma organização preestabelecida nem um objetivo global. Os agentes possuem seus objetivos individuais e procuram atendê-los [12], o que em geral requer a interação com outros agentes.

Considerando que o novo cenário do setor elétrico será caracterizado por ambientes abertos, nos quais os parceiros poderão até certo ponto entrar e sair segundo seus próprios interesses, a abordagem *bottom-up* parece ser a mais apropriada para a arquitetura da próxima geração de centros de controle.

Ao projetar sistemas de agentes, há pelo menos dois aspectos importantes que devem ser objeto de projeto cuidadoso:

- Estrutura interna dos agentes: há um grande número de diferentes propostas na literatura técnica. A linha adotada neste trabalho baseia-se em hierarquias de comportamentos codificados.
- Aspectos comunitários: definem como os agentes interagem. Em sistemas abertos, sem controle central, a existência ou disponibilidade de um agente não pode ser assumida *a priori*, pois os agentes são livres para entrar ou sair do sistema e para aceitar ou rejeitar solicitações. Uma certa solicitação de serviço pode ser respondida por de 0 a n agentes, o que decorre da incerteza e dinamismo do ambiente. Na abordagem adotada neste trabalho os agentes se comunicam e negociam utilizando a linguagem KQML.

Há outros aspectos importantes no projeto e construção de sistemas multi-agentes [12], mas esta discussão foge ao escopo deste artigo.

3.5 Desenvolvimentos

O ambiente da operação em tempo real de sistemas elétricos requer, por motivos óbvios, um grande cuidado na implantação de qualquer inovação. Adotou-se portanto uma postura cautelosa, iniciando o desenvolvimento com agentes relativamente simples para, após a implantação e teste em operação real, partir para níveis maiores de complexidade.

Foi desenvolvida uma arquitetura abrangendo os aspectos comunitários e a estrutura interna dos agentes. Esta arquitetura está sendo refinada gradualmente, e o primeiro conjunto de agentes já foi incorporado ao SAGE. Há agentes de dois tipos: um agente registrador de informações de tempo real a partir da ocorrência de certas condições especiais, e um ou mais agentes responsáveis pela interação com o usuário. Estes agentes negociam e comunicam-se através de mensagens em KQML. Os próximos desenvolvimentos previstos envolverão arquiteturas mais complexas, onde as capacidades de negociação e comunicação poderão ser exploradas mais a fundo.

3.6 As Perspectivas da Tecnologia de Agentes

A Tecnologia de Agentes vem ganhando importância com a expansão dos Sistemas Abertos. É interessante registrar a significativa mudança do perfil médio dos trabalhos publicados a partir de meados da década de 90. Enquanto os trabalhos anteriores eram geralmente de cunho teórico e acadêmico, os trabalhos mais recentes descrevem um grande número de aplicações industriais. A necessidade de adaptação aos novos ambientes abertos e incertos ajuda a explicar o interesse pelo tema.

4.0 SISTEMAS INTERATIVOS

As referências relacionadas em [19] são leituras obrigatórias para se entender a mudança do paradigma baseado em *algoritmos* para o baseado em *interação* para a solução de problemas. O seu autor, Peter Wegner, relaciona esta mudança à evolução da tecnologia computacional: dos *mainframes* isolados para as estações de trabalho em rede; da programação orientada a procedimentos para a programação orientada a objetos e distribuída.

Explorar essa mudança de paradigma de algoritmos para a interação, estudando-a como uma alternativa à forma convencional de análise de problemas associados a sistemas elétricos de potência de grande porte, é a linha de pesquisa de um projeto que está sendo iniciado no CEPTEL. A pesquisa buscará identificar idéias e conceitos necessários ao desenvolvimento de um protótipo de um software simulador interativo, distribuído, baseado em agentes, e que terá como alvo os sistemas elétricos de potência de grande porte. A estrutura do simulador será geral e poderá ser aplicada a outras classes de problemas.

4.1 Abstração Algorítmica *versus* Abstração Interativa

Por volta de 1960, havia uma disputa entre duas abordagens para a solução de problemas: a racionalista, baseada na abstração algorítmica, e a empiricista, baseada na abstração interativa. A Figura 3 sintetiza este fato.

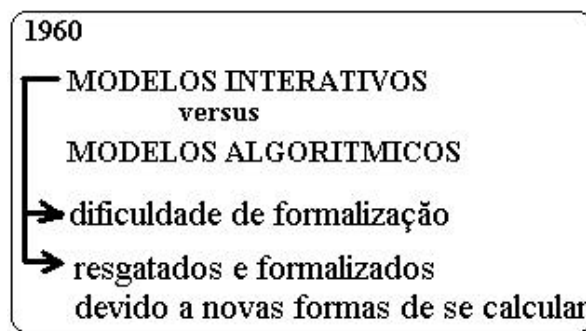


Figura 3 – Modelos Interativos *versus* Modelos Algorítmicos

Em função da dificuldade de formalização matemática da abordagem empírica baseada em interação, e da ausência, na época, de tecnologia adequada no campo da computação, esta abordagem cedeu espaço para a abordagem racionalista baseada em algoritmos. Por esta razão, atualmente a maioria dos programas são baseados em algoritmos e não em interação.

A figura 4, construída a partir de [18], sintetiza alguns aspectos da máquina de interação e mostra que estamos nos movendo da abordagem algorítmica, traduzida pelo ponto de encontro dos eixos da abordagem paralela/distribuída indicada pelos eixos horizontais, na direção do eixo vertical ao adotarmos a abordagem interativa para a solução de problemas.

4.2 O Simulador

“A noção radical de que sistemas interativos são máquinas de solução de problemas mais poderosas do que algoritmos é a base para um novo paradigma para a tecnologia da computação construído em torno do conceito unificador da interação”. Esta frase de Peter Wegner e as idéias expostas no seu artigo “The Paradigm Shift from Algorithms to Interaction” motivaram a idéia da construção de um simulador distribuído para ser utilizado no estudo do comportamento e dos problemas complexos relacionados com sistemas elétricos de potência de grande porte.

Atualmente, este tipo de estudo é desenvolvido utilizando-se ferramentas computacionais baseadas em algoritmos, as quais são específicas para cada tipo de problema. O desenvolvimento e a manutenção de tais ferramentas é difícil. Além disso, o comportamento do sistema em estudo não é expresso completamente através delas.

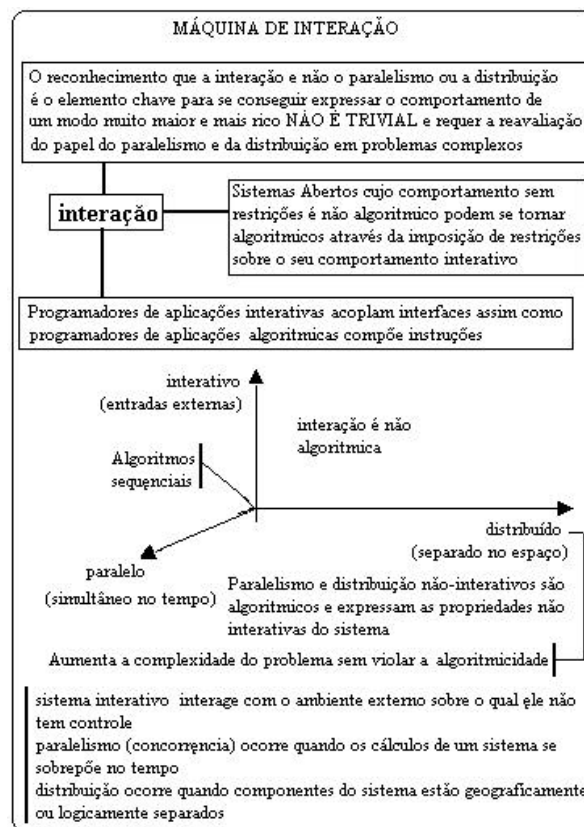


Figura 4 – Máquina de Interação

Por exemplo, seja um sistema composto por dois geradores conectados por uma linha de transmissão atendendo cargas nas barras dos geradores. Neste caso haveria um agente para cada gerador, um agente para a linha de transmissão, um agente para cada barra conectando o gerador à linha de transmissão, e um agente para cada carga conectada às barras de geração.

Uma vez que o simulador é colocado em execução, os seus agentes são ativados. Os agentes podem executar local ou remotamente e irão interagir usando Remote Method Invocation (uma tecnologia para se escrever objetos distribuídos usando o ambiente Java). Os agentes barra recebem como entrada as correntes do agente linha de

transmissão, do agente gerador, e do agente carga. O agente linha de transmissão recebe a tensão dos agentes barra. Assim, cada agente utiliza como entrada as informações de saída de outros agentes com os quais interage. Estas informações são processadas pelo agente usando seu respectivo modelo matemático, e o resultado – a sua própria saída – é enviado para os agentes com os quais interage.

Um sistema de equações algébrico-diferenciais não lineares traduz o comportamento de tal sistema. Como satisfazer este modelo matemático usando um sistema baseado em agentes como descrito acima? A resposta é utilizar um agente matemático denominado PSO (*Particle Swarm Optimization*) para interagir com os outros agentes até a convergência do processo de simulação. O modelo matemático deste agente é baseado no método de otimização descrito na referência [18]. A idéia é modificar o método e usar um fato constatado experimentalmente em testes preliminares: durante o processo de minimização, necessariamente devemos passar através da solução, se a função objetivo é formada por alguma combinação (ainda não completamente definida) das equações que descrevem o sistema. A prova matemática de que isto é verdade é um ponto que a ser investigado. Até agora, foram feitos alguns testes preliminares nos quais este fato foi verificado.

Voltando ao exemplo, o agente PSO tentará, em cada passo da simulação, produzir um novo conjunto de valores para as variáveis do problema de modo que o processo alcance a convergência. A convergência será alcançada quando, para todas as barras do sistema, a soma de todas as correntes entrando barra for igual a soma de todas as correntes saindo da barra (Kircchoff). Isto ocorre quando a função resíduo associada a cada agente barra tem seu valor perto de zero.

Em resumo, o objetivo é construir um protótipo de um simulador distribuído baseado na interação entre agentes, acoplado a um agente matemático que interage com os agentes do simulador para conduzir o processo de simulação a convergência. A idéia central de um simulador baseado em agentes é, através de coisas simples, conseguir modelar coisas complexas. O simulador faz sentido nos seguintes aspectos:

- Sob o ponto de vista intelectual, a proposta do simulador altera a maneira convencional de se resolver problemas, passando da solução via algoritmos para a solução via interação. A proposta do simulador irá explorar e investigar como subproduto a idéia de se obter a solução de um problema complexo baseado no fato de que "durante o processo de minimização deve-se passar por uma das possíveis soluções do problema".
- Sob o ponto de vista do usuário final, surge a possibilidade de possuir uma ferramenta única, simples e intuitiva para montar e simular um sistema; uma ferramenta que pela sua natureza pode ser usada como blocos de construção para simular outros tipos de problemas. Isto porque o processo de solução proposto no simulador independe do tipo de problema que está sendo analisado, assim como os blocos (programas Java) que compõe o simulador. É a mesma idéia do CDU (Controlador Definido pelo Usuário) usado com sucesso em outros programas do CEPEL, com a diferença que os blocos são agentes que interagem entre si e com o agente matemático PSO que garante a convergência do processo. No simulador cada componente do sistema em estudo é um agente Java que pode ser executado local ou remotamente em qualquer tipo de máquina e sistema operacional.

A granularidade em termos de agentes que se planeja adotar na montagem do simulador é adequada, ou seria uma abordagem melhor (mas menos flexível) utilizar blocos de construção maiores, formados pelos programas atuais - baseados em algoritmos - encapsulados por agentes? A resposta a esta questão é que os dois graus de granularidade se complementam e devem ser investigados. Na simulação de um sistema de grande porte haverá alguns milhares de agentes interagindo. Isto vai ser eficiente? Somente após a construção de protótipos vai ser possível fazer uma avaliação apropriada.

5.0 AVALIAÇÃO FINAL

Diversos campos da Inteligência Artificial estão se transferindo da pesquisa acadêmica para aplicações industriais importantes. A operação em tempo real de sistemas elétricos é uma das áreas beneficiadas pela aplicação de técnicas de IA, existindo uma significativa experiência concreta e positiva. O uso dos Sistemas Especialistas, já aprovado na operação em tempo real, tende a ser ampliado e generalizado.

O CEPEL vem investindo há cerca de uma década nas aplicações de IA em energia elétrica. Além dos Sistema Especialistas, outros campos da IA (como a Tecnologia de Agentes e os Sistemas Interativos, descritos neste trabalho) estão com o seu uso em avaliação, em diferentes estágios de desenvolvimento. Mas existem fatos incontestáveis sobre a aplicação de técnicas de Inteligência Artificial nos Centros de Controle de energia elétrica: ela já é uma realidade, e está em contínua expansão.

EQUIPES

Participam das equipes de desenvolvimento do RECOMP e do SISPRO (e também da elaboração de documentos utilizados na redação deste artigo) os engenheiros Gilberto Pires de Azevedo (gilberto@cepel.br), Victor Navarro da Silva (navarro@cepel.br), Marcelo Batalha da Silva, Cybele Luzana Reis, Mônica Valéria Ferreira de Figueiredo, Ricardo Linden e Guilherme Ferreira Ribeiro. A pesquisa em Tecnologia de Agentes é desenvolvida por Gilberto Pires de Azevedo e Alan Borsato (alan@cepel.br). Os trabalhos em Sistemas Interativos estão sendo desenvolvidos por Roberto Baitelli (baitelli@cepel.br) sob a orientação do Prof. Djalma Falcão, da COPPE-UFRJ (falcao@coep.ufrj.br).

BIBLIOGRAFIA

- (1) LIMA, L. C.; MACHADO, P. A.; OLIVEIRA FILHO, A. L.; PEREIRA, L. A. C.; AZEVEDO, G. P. – Design and Development of an Open EMS – IEEE Athens Power Tech'93 – 1993.
- (2) SILVA, A. J. S.; OLIVEIRA FILHO, A. L.; PEREIRA, L. A. C.; LIMA, L. C.; LAMBERT, N.; AMORIM, M. F. P.; AZEVEDO, G. P. – SAGE Architecture for Power System Competitive Environments – VI SEPOPE (Salvador–BA) – Maio de 1998.
- (3) MACHADO, P. A.; LIMA, L. C.; PEREIRA, L. A. C.; AZEVEDO, G. P.; AMORIM, M. F. P. - Desenvolvimento de uma Nova Geração de Centros de Controle – XII SNPTEE – 1993.
- (4) AZEVEDO, G. P. – Agentes Reativos para Centros de Controle de Energia Elétrica – Tese de Doutorado apresentada ao Departamento de Informática da PUC-Rio – Agosto de 1998.
- (5) AZEVEDO, G. P.; FEIJÓ, B.; COSTA, M. – An Agent-Based Approach to EMS in Open Environments – IEEE Budapest Power Tech'99 – Agosto de 1999.
- (6) AZEVEDO, G.P.; FEIJÓ, P.; COSTA, M. – Control Centers Evolve with Agent Technology – IEEE Computer Applications in Power – Julho de 2000.
- (7) FRANKLIN, S.; GRAESSER, A. – Is It an Agent, or Just a Program? A Taxonomy for Autonomous Agents – ECAI'96 Workshop (in Intelligent Agents III: Agent Theories, Architectures and Languages, eds. Jörg P. Müller, Michael J. Wooldridge, Nicholas Jennings) – Agosto de 1996.
- (8) PETRIE, C. – What is an Agent? – ECAI'96 Workshop (in Intelligent Agents III: Agent Theories, Architectures and Languages, eds. Jörg P. Müller, Michael J. Wooldridge, Nicholas Jennings) – Agosto de 1996.
- (9) RUSSEL, S.; NORVIG, P. – Artificial Intelligence: A Modern Approach – Prentice Hall Series in Artificial Intelligence – 1995.
- (10) TALUDKAR, S.; RAMESH, V. C.; QUADREL, R.; CHRISTIE, R. – Multiagent Organizations for Real-Time Operations – Proceedings of the IEEE vol. 80. n.5 – Maio de 1992.
- (11) WOOLDRIDGE, M. J.; JENNINGS, N. R. – Intelligent Agents: Theory and Practice – Knowledge Engineering Review – 1995: 10(2).
- (12) SICHMAN, J. S., E DEMAZEAU, Y. – Using the Active Object Model to Implement Multi-Agent Systems – Proc. of the 5th. IEEE Int. Conf. on Tools with Artificial Intelligence – Boston, EUA, 1993.
- (13) MARTINO, M. B., FIGUEIREDO, M. V. F., SILVA, M. B. LOURENÇO, C. R., MACÊDO, J. D., CHAVES, C. M. S., PITTA, R. L. A. - Uma Ferramenta para Auxílio à Recomposição de Sistemas de Potência - I Seminário Nacional de Controle e Automação Industrial, Elétrica e de Telecomunicações – Bahia – Nov/1999.
- (14) MARTINO, M. B., FIGUEIREDO, M. V. F., SILVA, M. B. LOURENÇO, C. R., MACÊDO, J. D., CHAVES, C. M. S., PITTA, R. L. A. - Sistema Especialista de Auxílio à Recomposição do Sistema de Furnas - XV SNPTEE– Foz do Iguaçu – Outubro de 1999.
- (15) DA SILVA, V. N. A. L., ZABELUM, R. S. - An Integration of Neural Networks and Fuzzy Logic for Power Systems Diagnosis - Proceedings from Intelligent Systems Applications to Power Systems - Orlando, EUA, 1996.
- (16) DA SILVA, V. N. A. L., RIBEIRO G. F., LOURENÇO C. R. S. H. - Sistema Híbrido Inteligente para Diagnose no Sistema Elétrico - Anais do VII Encontro Regional Latino-americano da CIGRÉ - Puerto Iguazú, Argentina, 1997.
- (17) DA SILVA, V. N. A. L., ZAVERUCHA G., SOUZA G. N. F. - Artificial Neural Networks for Power Systems Diagnosis - Proceedings from IEEE International Conference on Neural Networks - Orlando, Florida, USA, 1994.
- (18) KENNEDY, J., EBERHART, R. - Particle Swarm Optimization - Proc of IEEE International Conference on Neural Networks, Vol.IV,pp 1942-1948 - Perth Australia, 1995.
- (19) WEGNER, Peter - coletânea de artigos no endereço <http://www.cs.brown.edu/people/pw/> - Why Interaction Is More Powerful Than Algorithms, Communications of the ACM., May 1997 -- Interactive Software Technology, Handbook of Computer Science and Engineering, CRC Press, 1996 -- Frameworks for Compound Active Documents, Work in Progress -- Interactive Foundations of Computing, Final Draft, Theoretical Computer Science, February 1998 -- A Research Agenda for Interactive Computing, Work in Progress -- Towards Empirical Computer Science, The Monist, Spring 1999 -- Mathematical Models of Interactive Computing *, Brown Technical Report CS 99-13 -- Interaction as a Framework for Modeling *, LNCS #1565, April '99 -- Coinductive Models of Finite Computing Agents *, Electronic Notes in Theoretical Computer Science, March 1999 -- Interactive Visual Programming: Principles and

Examples, Work in Progress -- Modeling, Formalization, and Intuition, Brown Faculty Bulletin, March '99 -- Models of Interaction, ECOOP '99 Course Notes -- Interaction, Computability, and Church's Thesis *, Work in Progress -- Behavior and Expressiveness of Persistent Turing Machines *, Brown Technical Report CS 99-14 -- Draft of ECOOP'99 Banquet Speech, Lisbon, Portugal -- An Interactive Viewpoint on the Role of UML*, Book chapter, published in *Unified Modeling Language: Systems Analysis, Design, and Development Issues*, Idea Group Publishing, 2001 -- Turing Machines, Transition Systems, and Interaction *, submitted for publication

(20) ADIBI, M. M. – Power System Restoration: Methodologies & Implementation Strategies – IEEE Press - 1999