

# Uma Arquitetura de Software para o Processamento das Informações de Contexto na Computação Pervasiva

João Lopes<sup>1</sup>, Luiz Palazzo<sup>1</sup>, Iara Augustin<sup>2</sup>, Claudio Geyer<sup>3</sup>, Adenauer Yamin<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidade Católica de Pelotas  
Programa de Pós-Graduação em Informática  
Pelotas, Brasil

{joaolopes, lpalazzo, adenauer}@ucpel.tche.br

<sup>2</sup>Universidade Federal de Santa Maria  
Programa de Pós-Graduação em Informática  
Santa Maria, Brasil

august@inf.ufsm.br

<sup>3</sup>Universidade Federal do Rio Grande do Sul  
Programa de Pós-Graduação em Computação  
Porto Alegre, Brasil

geyer@inf.ufrgs.br

**Resumo.** *O objetivo central deste trabalho é a qualificação dos mecanismos para expressar e processar informações de contexto propondo, para isso, o uso de ontologias. O EXEHDA-ON tem como premissa de pesquisa que a possibilidade de empregar uma semântica de maior expressividade que a usualmente praticada na coleta e no processamento dos dados sensorados permite atingir melhores níveis de descrição nas informações que caracterizam o contexto do ambiente computacional. Entende-se como principais contribuições deste trabalho a definição de um modelo ontológico que caracteriza um ambiente pervasivo de computação e a integração deste modelo, através de um mecanismo de sensibilidade ao contexto, à arquitetura de software do middleware EXEHDA.*

## 1. Introdução

Mark Weiser idealizou ambientes físicos com dispositivos computacionais integrados que auxiliariam indivíduos na realização de suas tarefas cotidianas ao fornecer-lhes informações e serviços de forma contínua e transparente [Weiser 1991]. Essa visão resume o que se espera da Computação Pervasiva: acesso do usuário ao seu ambiente computacional independente de localização, tempo e equipamento [da Costa et al. 2008].

Em um ambiente de Computação Pervasiva, os dispositivos, serviços e componentes de software devem ser conscientes de seus contextos e automaticamente adaptar-se às suas mudanças, caracterizando assim sensibilidade ao contexto [Yamin et al. 2005] [Augustin et al. 2006]. Uma questão relevante na sensibilidade ao contexto é o grau de expressividade que se pode obter na descrição dos possíveis estados do mesmo. Neste sentido, considera-se que o uso de ontologias contribui para qualificar os mecanismos de sensibilidade ao contexto, em função da elevada expressividade

que o uso destas pode propiciar. Uma ontologia corresponde a uma especificação formal e explícita de uma conceituação compartilhada. [Fensel et al. 2005].

Desta forma, este trabalho apresenta um mecanismo de sensibilidade ao contexto para coletar, processar e disseminar informações de contexto na perspectiva da Computação Pervasiva, considerando o ambiente pervasivo definido no projeto ISAM (Infra-estrutura de Suporte às Aplicações Móveis Distribuídas) e provido pelo *middleware* EXEHDA (*Execution Environment for Highly Distributed Applications*) [Yamin 2004].

O EXEHDA é um *middleware* adaptativo ao contexto e baseado em serviços que visa criar e gerenciar um ambiente pervasivo, bem como promover a execução das aplicações direcionadas à Computação Pervasiva. Estas aplicações são distribuídas, móveis e adaptativas ao contexto em que seu processamento ocorre. O suporte à adaptação no EXEHDA está associado à operação do subsistema de reconhecimento de contexto e adaptação. Este subsistema inclui serviços que tratam desde a extração das “informações brutas” sobre as características dinâmicas e estáticas dos recursos que compõem o ambiente pervasivo, passando pela identificação em alto nível dos elementos de contexto, até o disparo das ações de adaptação em reação a modificações no estado de tais elementos de contexto.

O EXEHDA-ON utiliza uma abordagem baseada em ontologias para a modelagem do contexto do ambiente pervasivo, bem como para realizar pesquisa e inferência no correspondente modelo ontológico. Este modelo ontológico tem abrangência celular, sendo alimentado por um serviço de monitoramento. Deste modo, o modelo descreve semanticamente o estado atual do ambiente, utilizando um vocabulário comum e interpretável pelos servidores de contexto existentes nas células de execução do EXEHDA.

O artigo está organizado nas seguintes seções: a seção 2 descreve a concepção da modelagem do EXEHDA-ON; a seção 3 descreve a implementação do servidor de contexto do EXEHDA-ON; a seção 4 apresenta os trabalhos relacionados; e a seção 5 apresenta as considerações finais.

## **2. Aspectos de Modelagem do EXEHDA-ON**

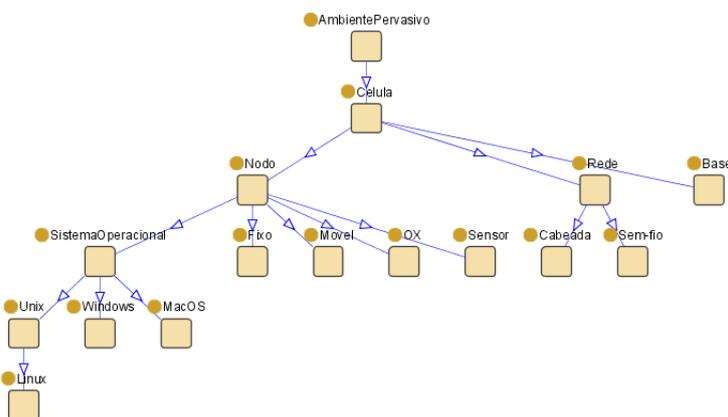
A modelagem do EXEHDA-ON contemplou dois principais esforços de concepção: (i) modelagem ontológica do ambiente pervasivo e do contexto de interesse das aplicações. Fundamentalmente, esta modelagem prevê o uso de ontologias implementadas em OWL, sobre as quais o EXEHDA-ON realiza a representação e o processamento das informações de contexto; (ii) modelagem da arquitetura de software com a especificação dos diferentes serviços que a integram.

### **2.1. Modelagem Ontológica**

A construção e o processamento do modelo ontológico do EXEHDA-ON são baseados em tecnologias da Web Semântica. A linguagem escolhida para construção do modelo ontológico do EXEHDA-ON foi a OWL (*Web Ontology Language*) [Bechhofer et al. 2004], padrão para a Web Semântica. Como sub-linguagem foi adotada a OWL-DL, esta sub-linguagem corresponde à lógica de descrição e provê um maior grau de expressividade onde todas as conclusões são computáveis e todas as computações terminam em tempo finito.

A linguagem SPARQL (*SPARQL Protocol And RDF Query Language*) [Seaborne 2007], recomendada pelo W3C (*World Wide Web Consortium*), foi escolhida para realização de consultas nas ontologias. Também, foi adotada a API Java do *toolkit* Jena [McBride 2007], por oferecer: (i) mecanismos para manipulação de modelos RDF em memória, bases de dados relacionais e arquivos; (ii) suporte à linguagem de consulta de dados RDF SPARQL; (iii) um conjunto de APIs para manipulação de ontologias codificadas em OWL; (iv) máquinas de inferência baseadas em ontologias e regras.

O modelo ontológico para uso no EXEHDA-ON foi definido considerando aspectos que modelassem o domínio do ambiente pervasivo provido pelo EXEHDA (vide Figura 1). A perspectiva é que este modelo represente o estado atual do ambiente de execução pervasivo provido pelo EXEHDA, gerando deste modo um conhecimento sobre o mesmo, possibilitando assim sua manipulação pelo servidor de contexto, o qual responde às demandas introduzidas pelas aplicações dos usuários.



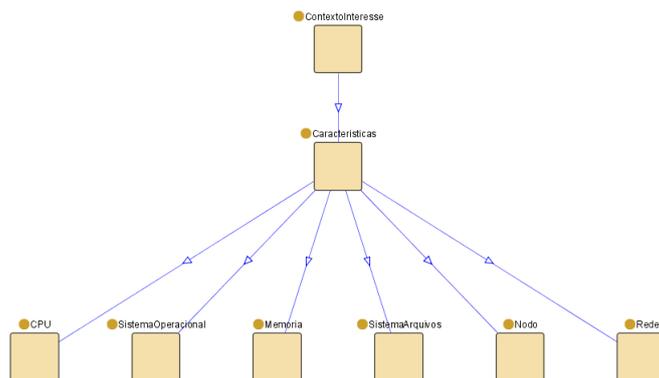
**Figure 1. Árvore de conceitos da ontologia do ambiente pervasivo**

O modelo ontológico para uso no EXEHDA-ON também prevê a representação do contexto de interesse das aplicações através de uma ontologia. O contexto de interesse da aplicação é um subconjunto do contexto geral do ambiente pervasivo, quando o contexto de interesse ocorre a aplicação é notificada. Na Figura 2 é possível visualizar as classes definidas para a ontologia do contexto de interesse das aplicações, mostrando sua hierarquia.

## 2.2. Modelagem da Arquitetura de Software

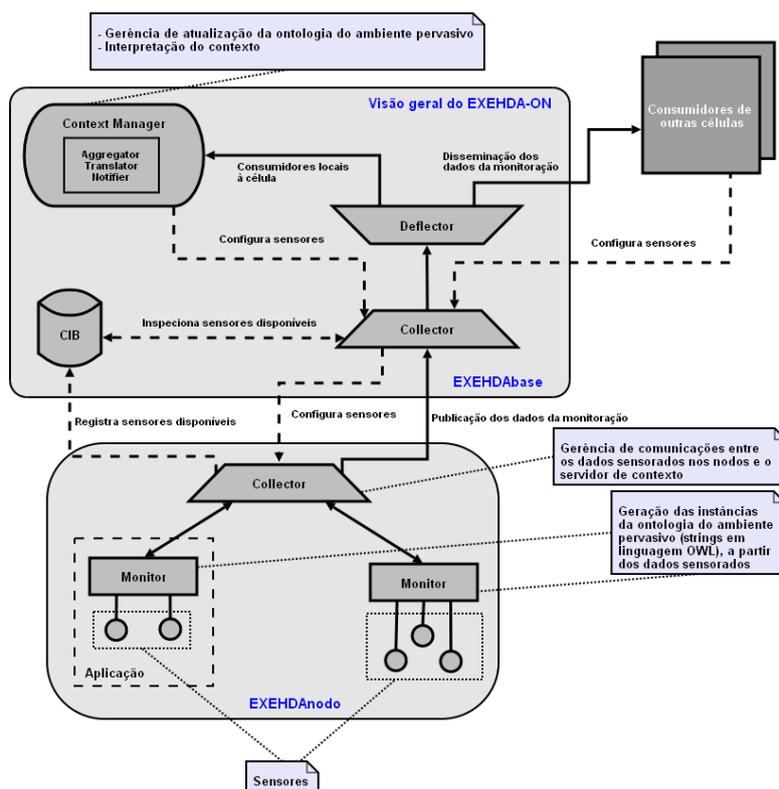
Nesta seção é descrita a arquitetura de software do EXEHDA-ON e a forma de adequação da mesma ao Subsistema de Reconhecimento de Contexto e Adaptação do EXEHDA, identificando seus pontos de integração e seus serviços.

De modo geral, uma arquitetura para sistemas sensíveis ao contexto envolve uma série de sensores, de software e/ou de hardware, que monitoram os aspectos de interesse do ambiente computacional (*middleware* e aplicações). As informações colhidas por esses sensores são passadas a um conjunto de serviços de contexto, onde são processadas e/ou modificadas para que possam ser entregues aos consumidores das informações contextualizadas [Henricksen and Indulska 2006].



**Figure 2. Árvore de conceitos da ontologia do contexto de interesse das aplicações**

A arquitetura do EXEHDA-ON prevê a inclusão de serviços e componentes nos “EXEHDANodos” e no “EXEHDABase”, os quais são abstrações do ambiente pervasivo provido pelo EXEHDA. A Figura 3 mostra as funcionalidades do EXEHDA-ON integradas ao Subsistema de Reconhecimento de Contexto e Adaptação do EXEHDA.



**Figure 3. Integração das funcionalidades do EXEHDA-ON**

Em cada EXEHDANodo, junto ao componente “Monitor”, o serviço do EXEHDA-ON “Gerenciador de monitoramento do contexto” fica com a responsabilidade de receber os dados sensorados e gerar as instâncias da ontologia do ambiente pervasivo, representadas por *strings* em linguagem OWL. Por sua vez, o serviço “Collector” do EXEHDA é responsável pela gerência das comunicações entre os dados sensorados nos

nodos e o servidor de contexto que aglutina os dados da célula como um todo.

A localização dos serviços do EXEHDA-ON dentro do EXEHDAbase é junto ao “ContextManager”, que é serviço chave na construção de informações globais de contexto, mais especificamente dentro das estruturas de cadeias de detecção de contexto do “ContextManager” (*aggregator e translator*), que são empregadas, respectivamente, para composição dos dados de um ou mais sensores e para abstração da informação de contexto.

Assim, no EXEHDAbase atua o serviço responsável pela aglutinação das instâncias na ontologia do ambiente pervasivo, denominado “Gerenciador de atualização da base ontológica”, e o serviço responsável pelas consultas e inferências sobre a base ontológica do EXEHDA-ON, denominado “Interpretador de contexto”.

O serviço “Interpretador de contexto”(vide Figura 4) é central para consecução dos objetivos propostos para o EXEHDA-ON, realizando o processamento das informações de contexto com o intuito de identificar na base ontológica a existência das condições de contexto de interesse dos consumidores registrados. Este serviço recebe as solicitações dos consumidores a partir do “Gerenciador de subscrições” e realiza consultas e inferências sobre a base ontológica, utilizando o componente “Gerenciador de consultas e inferências”.

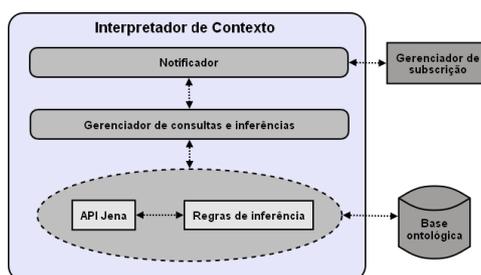


Figure 4. Interpretador de contexto do EXEHDA-ON

O “Gerenciador de consultas e inferências” constrói consultas com a linguagem SPARQL, as quais são submetidas à base ontológica. Também, realiza serviços de inferências sobre a ontologia, identificando, por exemplo, eventuais inconsistências que possam existir nas consultas, bem como extraindo informações que não estejam explicitamente escritas na estrutura do modelo ontológico.

Quando um consumidor registra-se no *middleware* EXEHDA, este deve informar seu contexto de interesse. As informações registradas são processadas pelo componente “Gerenciador de consultas e inferências” com base na ontologia de contexto de interesse da aplicação. Este componente, então, (i) analisa os requisitos especificados pelo consumidor, aplicando regras de inferência que permitem verificar a consistência das consultas e estendê-las semanticamente; (ii) gerencia a construção das consultas; (iii) executa as consultas sobre a ontologia; e (iv) notifica as condições de contexto existentes, em função do interesse dos consumidores registrados.

### 3. Implementação do Servidor de Contexto

O servidor de contexto para o ambiente pervasivo foi modelado e desenvolvido com o uso da API Jena e a linguagem de programação Java. Para testar o servidor de con-

texto foram criados sensores para dados estáticos (arquitetura, número de núcleos, tipo de processador, número de interfaces de rede, memória física, disco instalado) e dinâmicos (processador disponível, memória disponível, disco disponível, tráfego de entrada na rede, tráfego de saída da rede).

Os dados sensorados são compostos em instâncias da ontologia do ambiente pervasivo no nodo (processamento de *strings*), as quais são enviadas ao servidor de contexto, localizado no EXEHDABase. Estas instâncias contêm as informações de identificação do nodo e os dados sensorados. No servidor de contexto é feita a aglutinação destas instâncias na ontologia do ambiente pervasivo na célula com a utilização da API Jena.

Com o intuito de abstrair aspectos de baixo nível relativos ao tratamento das comunicações em rede, na implementação do servidor de contexto foram utilizados os serviços de comunicação do EXEHDA. A classe principal do servidor de contexto executa uma *thread* responsável por utilizar esses serviços para aguardar as atualizações de contexto dos nodos.

O servidor de contexto mantém uma base de dados ontológica com informações sobre o estado do ambiente pervasivo. Todos os procedimentos relativos à manipulação da ontologia são realizados com o uso da API Jena. Quando a *thread* responsável pela comunicação recebe a ontologia do ambiente pervasivo atualizada de algum nodo ela a repassa para a classe principal “*ContextServer*”, a qual possui o método “*mergeOntologies*” responsável por verificar a ontologia recebida e realizar as atualizações necessárias na base de dados ontológica. O servidor é executado na base da célula, gravando as alterações ocorridas na ontologia dentro do arquivo *log* do EXEHDA.

Também, um serviço de consultas foi desenvolvido junto ao servidor de contexto. Este serviço possibilita a realização de pesquisas na ontologia do ambiente pervasivo utilizando a linguagem SPARQL. A linguagem de consulta SPARQL é utilizada através da biblioteca ARQ da API Jena. Os métodos da classe *QueryConnection* implementam as consultas em SPARQL que pesquisam propriedades dos nodos, tais como: temperatura do processador, memória total, tamanho do disco e número de processadores.

#### 4. Trabalhos Relacionados

Nesta seção é feita uma comparação entre os principais projetos em Computação Sensível ao Contexto utilizados como referência para a definição deste trabalho, e a solução adotada no EXEHDA-ON. Esta comparação está organizada em três grandes categorias: arquitetura, modelagem de contexto e processamento de contexto.

**Arquitetura:** CASS [Fahy and Clarke 2004] tem uma arquitetura baseada em *middleware* centralizado. CoBra [Chen 2004] possui arquitetura baseada em agentes. Considerando que o EXEHDA-ON foi concebido como extensão do *middleware* EXEHDA, ele mantém os aspectos arquiteturais do mesmo. Assim, sua arquitetura é baseada em serviços, cuja integração visa fornecer a infra-estrutura necessária para suporte à sensibilidade ao contexto em um ambiente pervasivo.

**Modelagem de contexto:** *Context Toolkit* [Dey et al. 2001] manipula o contexto através de tuplas com atributos e valores que são codificados usando XML. *Hydrogen* [Hofer et al. 2002] usa uma abordagem orientada a objetos para modelagem do contexto. A estrutura e o vocabulário da ontologia aplicada no *Context Managing Toolkit*

são descritos em RDF. No Gaia [Roman et al. 2002] o contexto é representado através de predicados escritos em DAML+OIL. Abordagens baseadas em ontologias escritas em OWL para modelagem de contexto são encontradas nos projetos *SOCAM* [Gu et al. 2004] e *CoBrA*. A solução adotada no EXEHDA-ON para modelagem do contexto consiste no uso de ontologias próprias desenvolvidas em OWL, linguagem recomendada pelo W3C, visto que, revisa e incorpora melhoramentos às demais linguagens, tais como: RDF e *RDF Schema* e DAML-OIL. O modelo baseado em ontologias é o mais promissor para a modelagem de contexto em ambientes pervasivos [Strang and Linnhoff-Popien 2004].

**Processamento de contexto:** o processamento do contexto nos projetos *CASS*, *CoBrA*, *Context Toolkit* e *SOCAM* é baseado em motores de inferência que realizam a interpretação do contexto. Modelos de contexto não baseados em ontologias apresentam menor expressividade o que reduz a possibilidade de realização de inferências, sendo esta uma das limitações dos projetos *CASS* e *Context Toolkit*. No EXEHDA-ON o processamento do contexto é realizado através de serviços e componentes de software que manipulam a base ontológica, utilizando a linguagem de consulta SPARQL e a API Jena.

## 5. Considerações Finais

Uma questão relevante na sensibilidade ao contexto é o grau de expressividade que se pode obter na descrição dos possíveis estados do mesmo. Quanto maior a expressividade do modelo de informação do contexto, maior é a capacidade de representar a estrutura e a semântica dos conceitos. Neste sentido, o uso de ontologias contribui para qualificar os mecanismos de sensibilidade ao contexto, em função da elevada expressividade que o uso destas pode propiciar.

O processo de tradução dos dados sensorados para contextualizados no EXEHDA vinha sendo feito por algoritmos e estruturas de dados particulares para cada tipo de aplicação. Assim, a contribuição central da pesquisa EXEHDA-ON é minimizar a gerência desta personalização por parte do programador, tendo proposto a construção de um modelo ontológico que descreva semanticamente o estado atual do ambiente, utilizando um vocabulário comum e interpretável pelo servidor de contexto. Além disso, o fato de ser utilizado um modelo ontológico também torna possível a realização de pesquisas e inferências sobre o estado do ambiente pervasivo, com a utilização de uma linguagem de alto nível.

Na perspectiva de continuidade da pesquisa desenvolvida durante a concepção do EXEHDA-ON os seguintes aspectos poderão ser explorados em trabalhos futuros: (i) analisar o desempenho do EXEHDA-ON considerando as diferentes possibilidades de modelagem ontológica do contexto; (ii) construir diferentes modelos ontológicos em função do domínio a ser tratado; (iii) expandir o mecanismo para construção de contextos que englobem várias células.

## References

- Augustin, I., Yamin, A. C., da Silva, L. C., Real, R. A., Frainer, G., and Geyer, C. F. R. (2006). Isamadapt: abstractions and tools for designing general-purpose pervasive applications: Experiences with auto-adaptive and reconfigurable systems. *Softw. Pract. Exper.*, 36(11-12):1231–1256.

- Bechhofer, S., van Harmelen, F., Hendler, J., Horrocks, I., McGuinness, D. L., Patel-Schneider, P. F., and Stein, L. A. (2004). Owl web ontology language reference. Disponível em: <<http://www.w3.org/TR/owl-ref/>>. Acesso em maio de 2008.
- Chen, H. (2004). *An Intelligent Broker Architecture for Pervasive Context-Aware Systems*. Dissertation (doctor of philosophy), University of Maryland, Baltimore.
- da Costa, C. A., Yamin, A. C., and Geyer, C. F. R. (2008). Toward a general software infrastructure for ubiquitous computing. *IEEE Pervasive Computing*, 7(1):64–73.
- Dey, A., Salber, D., and Abowd, G. (2001). A conceptual framework and a toolkit for supporting the rapid prototyping of context-aware applications. *Human-Computer Interaction*, 16.
- Fahy, P. and Clarke, S. (2004). Cass - middleware for mobile context-aware applications. *MobiSys - International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services*.
- Fensel, D., Wahlster, W., Lieberman, H., and Hendler, J. (2005). Spinning the semantic web: Bringing the world wide web to its full potential. *The MIT Press*.
- Gu, T., Pung, H., and Zhang, D. (2004). A middleware for building context-aware mobile services. In *Proceedings of IEEE Vehicular Technology Conference*, Milão, Itália. IEEE Press.
- Henricksen, K. and Indulska, J. (2006). Developing context-aware pervasive computing applications: Models and approach. *Pervasive and Mobile Computing*, 2(2):37–64.
- Hofer, T., Schwinger, W., Pichler, M., Leonhartsberger, G., and Altmann, J. (2002). Context-awareness on mobile devices - the hydrogen approach.
- McBride, B. (2007). Jena api - a semantic web framework for java. Disponível em: <<http://jena.sourceforge.net/ontology/>>. Acesso em julho de 2008.
- Roman, M., Hess, C., Cerqueira, R., Ranganat, A., Campbell, R., and Nahrstedt, K. (2002). Gaia: A middleware infrastructure to enable active spaces. *IEEE Pervasive Computing*.
- Seaborne, A. (2007). Sparql - a query language for rdf. Disponível em: <<http://www.w3.org/TR/rdf-sparql-query/>>. Acesso em julho de 2008.
- Strang, T. and Linnhoff-Popien, C. (2004). A context modeling survey. In *Workshop on Advanced Context Modelling, Reasoning and Management, UbiComp 2004 - The Sixth International Conference on Ubiquitous Computing*, Nottingham, England. UbiComp.
- Weiser, M. (1991). The computer for the 21st century. *Scientific American*, 3(265):94–104.
- Yamin, A. (2004). *Arquitetura para um Ambiente de Grade Computacional Direcionado às Aplicações Distribuídas, Móveis e Conscientes do Contexto da Computação Pervasiva*. Tese (doutorado em ciência da computação), Instituto de Informática, UFRGS, Porto Alegre, RS.
- Yamin, A. C., Augustin, I., Barbosa, J., da Silva, L. C., Real, R. A., Filho, A. S., and Geyer, C. F. R. (2005). Exehda: Adaptive middleware for building a pervasive grid environment. *Frontiers in Artificial Intelligence and Applications - Self-Organization and Autonomic Informatics*, 135:203–219.