

Web semântica na automação da manufatura

Vinicius Takeo Friedrich Kuwaki, Computer Science Student at UDESC.

Resumo—A manufatura tem sido de suma importância na economia mundial. Todo produto saído de uma fábrica pode ser dito um produto manufaturado. Nesse trabalho serão abordados alguns conceitos e técnicas referentes ao uso da web semântica, apresentando sistemas que consideram seu uso na manufatura. Serão apresentados alguns conceitos presentes na literatura, além de quatro abordagens distintas que propõem integrações da web semântica no processo de manufatura. Ao final, um estudo de caso utilizando uma das técnicas abordadas nesse trabalho é apresentado.

Index Terms—Manufatura, Web semântica, OWL, Ontologia.

I. INTRODUÇÃO

Desde os primórdios da humanidade, o humanidade tem produzido objetos que a auxiliem na sua sobrevivência. Com a chega da revolução industrial, a humanidade saltou do artesanato para a manufatura. A manufatura pode ser definida como a transformação de materiais em itens de maior valor através de processamento e/ou montagem [1], sendo essa produção manual ou com a utilização de máquinas.

A utilização de máquinas na manufatura torna o processo mais rápido e eficiente, visto que as máquinas em sua grande maioria são desenhadas para serem utilizadas em determinada função. Em contra ponto com a produção manual, que necessita de um profissional humano, que necessita de alimento, descanso, pausas etc. Logo, muitas vezes é mais rentável para uma empresa investir no uso de máquinas do que no emprego de mão de obra humana.

Para que as empresas se tornem competitivas entre si, é necessário que elas melhorem sua produtividade, responsabilidade e flexibilidade, ao reutilizar componentes de sistemas e reduzir custos de implementação [2]. Com esses aspectos em mente, as empresas vêm adotando o uso de técnicas que utilizam da web semântica para melhorar seus processos de fabricação. Esse trabalho busca apresentar algumas abordagens ligados a web semântica, bem como discutir propostas encontradas na literatura que fazem uso dela na melhoria de sistemas manufaturados.

O trabalho está organizado da seguinte forma: primeiro alguns conceitos e definições utilizadas nas técnicas propostas pelos autores serão apresentados bem como exemplos de aplicações desses conceito. Na seção seguinte serão discutidas quatro abordagens propostas por diferentes autores, finalizando com a apresentação de um caso piloto de uma das abordagens e considerações finais sobre as técnicas apresentadas.

II. CONCEITOS E DEFINIÇÕES

Nessa seção serão expostos os principais conceitos e definições, bem como exemplos de seus usos, que foram utilizados nas abordagens apresentadas pelos autores que compõe esse trabalho.

A. Web semântica

A web pode ser definida como um conjunto de documentos e informações abertas a diversos usuários em qualquer lugar do planeta. De fato, ela tem sido utilizada cada vez mais e mais no cotidiano das vidas humanas, nela é possível realizar operações bancárias, conversar com pessoas, conduzir estudos etc. A grande maioria desses materiais se encontra disponível no formato apto para interpretação humana apenas.

A web semântica propõe uma estrutura para conteúdos de páginas web que não possuem conteúdo significativo, criar um ambiente onde agentes de *software* possam realizar tarefas sofisticadas para seus usuários [3]. A web semântica propõe modelos que busquem estruturar documentos para serem interpretados por máquinas. Vários modelos de representação existem na literatura, um dos mais conhecidos é o XML, uma linguagem de marcação baseada em *tags* que permitem a organização de suas informações de forma hierárquica.

B. Ontologias

Outro conceito que aparece frequentemente ligado a web semântica quando se trata de automação da manufatura é o uso de ontologias. Ontologias são artefatos computacionais que descrevem um domínio do conhecimento de forma estruturada, através de classes, propriedades, relações, restrições, axiomas e instâncias [4]. Ontologias podem ser ditas grafos orientados em que cada vértice representa um conceito e cada aresta representa um relacionamento entre dois conceitos. Na Figura 1 é possível ver um exemplo de uma ontologia desenhada de forma a representar um pedaço da vida selvagem africana.

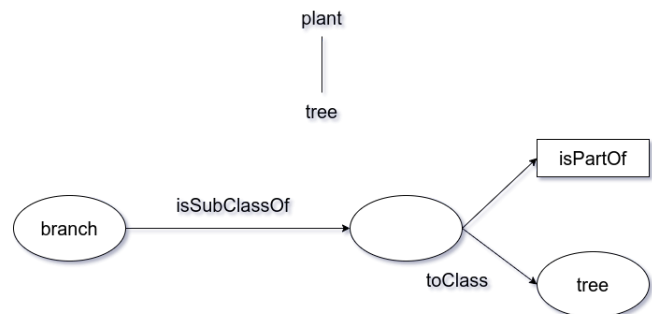


Figura 1. Exemplo de uma ontologia [5] em um domínio da vida selvagem africana.

Ontologias são compostas por dois componentes: T-Boxes e A-Boxes. Sua principal diferença é que as T-Boxes apresentam conceitos em contraste com as A-Boxes que descrevem instâncias desses conceitos.

C. The Web Ontology Language (OWL)

Criada para ser utilizada quando a informação dentro de documentos precisa ser processada diretamente por

aplicações sem auxílio humano, a OWL é uma linguagem de marcação para publicar e compartilhar ontologias na *World Wide Web* (WWW) [6]. A ideia da OWL é representar explicitamente o significado de termos em vocabulários e as relações entre esses termos [7]. Na Figura 2 é possível ver a ontologia da Figura 1 parcialmente representada usando a OWL. Na Figura também é possível notar que a OWL se apoia na linguagem XML para representar ontologias.

```
<owl:Class rdf:ID="tree">
  <rdfs:comment>Trees are a type of plant.
</rdfs:comment>
  <rdfs:subClassOf rdf:resource="#plant"/>
</owl:Class>

<owl:Class rdf:ID="branch">
  <rdfs:comment>Branches are parts of trees.
</rdfs:comment>
  <rdfs:subClassOf>
    <owl:Restriction>
      <owl:onProperty rdf:resource="#is-part-of"/>
      <owl:allValuesFrom rdf:resource="#tree"/>
    </owl:Restriction>
  </rdfs:subClassOf>
</owl:Class>
```

Figura 2. Ontologia da Figura 1 parcialmente representada utilizando a OWL [5].

D. Arquitetura orientada a serviços

Para que agentes dentro de um processo manufaturado, possam interagir entre si, é necessário a especificação de uma arquitetura que permita tal comunicação. Nesse sentido, surge a arquitetura orientada a serviços. *Web services* são aplicações modulares autocontidas e auto-descritas que podem ser publicadas, localizadas e invocadas através da web [8]. A ideia geral de um *web services* é prover uma interface para que um processo execute um procedimento remoto contido dentro de outro processo. Uma das arquiteturas mais utilizadas atualmente é a REST [9] na qual é possível invocar via HTTP uma consulta remota e obter-se informações desejadas.

E. Web service ontology (OWL-S)

Uma abordagem que visa unificar *web services* com a web semântica é necessária para que diversos agentes se comuniquem entre si em um ambiente manufaturado de forma a inferir conhecimento através de ontologias. A OWL-S surge de forma a permitir que agentes raciocinem usando a semântica explícita para automaticamente descobrir, invocar, compor e monitorar processos associados ao agente [2].

III. ABORDAGENS

Nessa seção, quatro abordagens apresentadas na literatura serão discutidas. A primeira delas é a abordagem *Intelligent Factory Environment* (IFE) que propõe uma divisão em camadas para o ambiente de fábrica [2]. A segunda abordagem apresenta uma forma de implementação para agentes se reconfigurarem de acordo com condições do ambiente [10]. Na abordagem seguinte, propõe-se o uso de um *Semantic*

Interoperable Smart Manufacturing System [11], um sistema interoperável multidomínio capaz de compartilhar conhecimento entre diversas fases do processo de manufatura. Ao final, é apresentada uma abordagem que utiliza um *web service* baseado em ontologia e apoiado na indústria 4.0 para uma manufatura flexível [12], sendo essa abordagem melhor discutida na seção seguinte quando um caso de estudo é discutido.

A. Intelligent Factory Environment (IFE)

Utilizando uma arquitetura de camadas, o IFE faz uso da web semântica de forma a gerar uma capacidade de raciocínio distribuída. Como os serviços de raciocínio podem ser terceirizados por agentes leves, uma inteligência a nível de ambiente é formada [2].

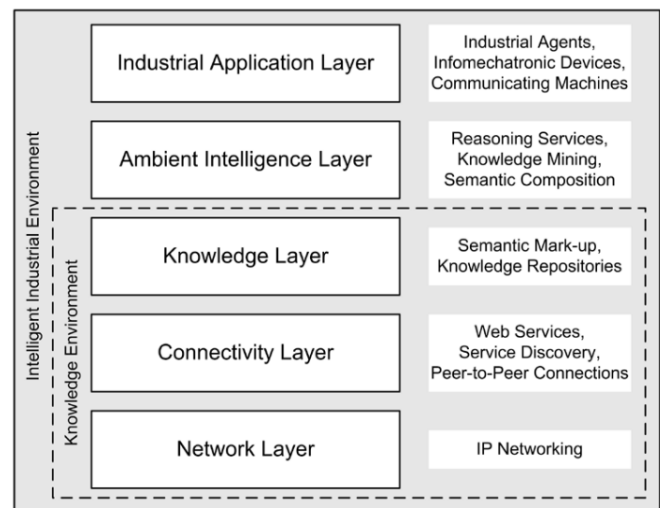


Figura 3. Arquitetura em camadas para um ambiente inteligente de fábrica [2].

Na Figura 3 é possível ver a composição de um ambiente inteligente de fábrica. Nela são apresentadas cinco camadas, estas agrupadas em dois grandes ambientes: o ambiente industrial inteligente e o ambiente de conhecimento.

O ambiente de conhecimento é composto de três camadas (i) a camada de rede, (ii) a camada de conectividade e (iii) a camada de conhecimento. A primeira delas é responsável pela troca de mensagem entre os agentes no mais baixo nível. A segunda se torna responsável pelas conexões par a par e pelos serviços web. Por fim, a camada de conhecimento é responsável por realizar as marcações semânticas e por administrar os repositórios de conhecimento.

Já o ambiente industrial inteligente possui duas camadas, (i) a camada de inteligência de ambiente e (ii) a camada de aplicação industrial. Na primeira estão localizados os serviços de raciocínio, responsáveis por inferir a partir das ontologias, mineradores de conhecimento, responsáveis por buscar o conceito necessário e composição semântica, responsável por agrupar conceitos. Na camada seguinte, a camada de aplicação industrial, localizam-se os agentes industriais, dispositivos infomecatrônicos e máquinas de comunicação.

B. Reconfigurable Manufacturing System (RMS)

Os RMS são projetados desde a sua etapa de planejamento com recursos ajustáveis para fornecer exatamente a capacidade e funcionalidade necessárias, exatamente quando necessário [13]. Tal sistema foi concebido para que se tenha uma alta taxa de transferência entre linhas de manufatura dedicadas e para que uma maior flexibilidade nos sistemas de manufatura seja atingida.

Usando o conceito de agente de reconfiguração: um software inteligente que permite a sua adaptação a mudanças de requisitos e/ou no ambiente, propôs-se um modelo usando três camadas, em contraste com o EFI que possuía cinco, nesse modelo cada camada comunica com a camada anterior, tal como no modelo anterior. A arquitetura proposta contém as camadas: (i) a camada de especificação, (ii) a camada de análise e modelagem e (iii) a camada de decisão inteligente [10]. A Figura 4 apresenta um esquema das camadas a serem descritas a seguir.

Na camada de especificação, a primeira delas, todo o conhecimento necessário para a tomada de decisão do agente é especificado. Os requisitos referentes ao *layout* de fábrica são colocados em arquivos XML, enquanto que o conhecimento referente ao ambiente é colocado em arquivos na forma de ontologia.

A camada seguinte, a de análise e modelagem, é responsável por extrair as informações explicitadas na camada anterior a ela, transformando essas informações em um formato explícito, capaz de ser interpretado pela camada seguinte. São extraídos e criados: (i) uma lista de operações requisitadas pelas especificações do requisitos, (ii) uma lista de máquinas disponíveis no chão de manufatura das especificações desse chão e (iii) um modelo ontológico de conhecimento de acordo com o conhecimento a respeito das especificações do ambiente.

Por fim, a camada de decisão inteligente raciocina sobre as informações que foram geradas pelas camadas anteriores e gera as configurações finais, divididas de acordo com cada um dos controladores.

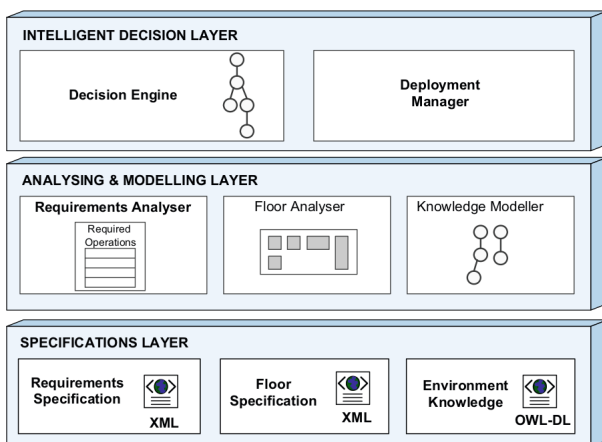


Figura 4. Arquitetura em camadas do agente reconfigurável baseado em ontologia [10].

C. Semantic Interoperable Smart Manufacturing System

Interoperabilidade é definida como a habilidade de sistemas de prover e aceitar serviços de outros sistemas, unidades ou forças também como trocar serviços que permitam que eles operem de forma efetiva juntos [14]. Diferente das duas abordagens apresentadas anteriormente, [11] propõe um sistema com ênfase na interoperabilidade de seus componentes. Sua abordagem é dividida em etapas, construídas iterativamente, em contraste com as abordagens discutida anteriormente, onde construíam-se uma arquitetura em camadas.

O sistema é construído em sete etapas: (1) dados do projeto, (2) visualização de ontologias de referência, (3) ontologia de aplicação, (4) reconciliação semântica, (5) adição dos requisitos, (6) correção de problemas e (7) domínio baseado em ontologia interoperável semântica (SIOBD). Cada uma dessas etapas serão descritas em seguida.

1) *Dados do projeto*: Nessa etapa são selecionados as definições que atuarão como um norte para o projeto. Nela serão selecionadas documentos e planilhas contendo dados pertinentes a produção. Serão definidos nessa etapa, importantes definições que serão construídas na ontologia de referência para diferentes domínios intermediários.

2) *Visualização de Ontologias de Referência*: Para que haja um entendimento mútuo entre os agentes pertencentes do sistema, as ontologias de referência serão utilizadas durante todo o desenvolvimento do sistema. Nelas, estarão contidos os principais conceitos e relacionamentos de diferentes campos, estes rigorosamente definidos. É proposto pelo autor o uso de dois procedimentos diferentes para formalizar os conceitos: (1) o uso da linguagem UML [15] e o uso de bibliotecas de ontologia, como por exemplo a OWL.

3) *Ontologia de Aplicação*: Nesse etapa, as ontologias de referência são especializadas para o desenvolvimento da ontologia de aplicação. Ao final da etapa, tem-se formalmente uma ontologia produto, que consiste na adição de informações específicas de produto na ontologia de aplicação. Uma ontologia especializada deve ser desenvolvida para cada fase do sistema manufaturado. As relações entre as ontologias de aplicação e as ontologias de referência também devem ser definidas. Na Figura 5 é possível ver um esquema do processo.

4) *Reconciliação Semântica*: Na etapa de reconciliação semântica, os conceitos identificados em cada ontologia são mapeados utilizando três regras: (i) reconciliação por união, (ii) reconciliação por alinhamento e (iii) reconciliação por integração.

Na reconciliação por união, ontologias novas são criadas a partir da completa união de ontologias anteriores, o objetivo é criar uma única e coesa ontologia que represente os mesmos conceitos das ontologias individuais, mantendo os mesmos significados.

Já a reconciliação por alinhamento, novos relacionamentos são formados e relacionamentos antigos podem ser desfeitos, de forma com que haja um acordo. Tal procedimento é necessário para que haja consistência e coerência em ontologias que precisam ser mantidas em separado.

Por fim, a reconciliação por integração, alcança a reconciliação unindo apenas partes de interesse de uma ontologia. Essa abordagem difere da reconciliação por união no

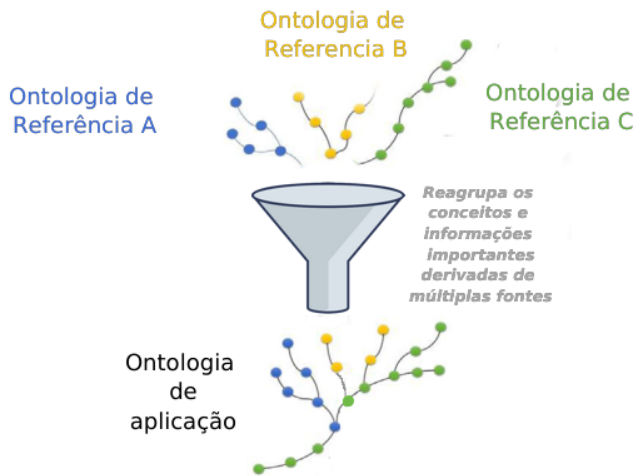


Figura 5. Construção da ontologia de aplicação. Adaptado de [11].

questo de que une apenas pontos de interesse, ao invés da ontologia inteira como na técnica de união.

5) *Adição dos Requisitos*: Na adição de requisitos, os requisitos são incorporados ao SISMS. Estes requisitos podem ser divididos em dois tipos: funcionais e não-funcionais.

Os requisitos funcionais definem o que se espera atingir com a etapa de calibração das máquinas, dada a calibração como uma visão do produto. Nela, considera-se pequenas mudanças de marcha, economia de combustível, responsividade de torque etc.

Os não-funcionais por outro lado estabelecem os níveis técnicos que devem ser respeitados levando em consideração leis regionais, requisitos OBD (*on board diagnostics*), padrões de evaporação, níveis de emissão de exaustores, regras internas, limites de aceleração etc.

6) *Correção de Problemas*: A reconciliação semântica e a integração de requisitos pode acabar gerando problemas no sistema. Nesse caso, há a necessidade de se passar por um processo de “*debugging*” de ontologias com o propósito de identificar informações que podem ter sido inferidas de forma incorreta ou terem seu significado alterado. Dois tipos de conflitos podem acabar existindo: os de lógica ou os de modelagem. Os conflitos de lógica ocorrem quando a ontologia em questão está incoerente ou inconsistente. Já os conflitos de modelagem, ocorrem quando a partir da ontologia em questão, é possível inferir fatos que não condizem com o real.

7) *SIOBD*: A última etapa por fim, pode ser dita como a coleta dos resultados. É nela que são recuperados os conhecimentos e/ou acontece a busca de informações sobre o processo de manufatura como um todo. Novas informações são extraídas ou o conhecimento a respeito de um processo é melhorado.

D. Web service baseado em ontologia e indústria 4.0 para manufatura flexível

Utilizando uma arquitetura de quatro níveis, indo do chão de fábrica até o cliente final. A abordagem utilizada *web services* em conjunto com ontologias e conceitos da indústria 4.0 de

forma a tornar mais eficiente o processo de manufatura. Na Figura 6 é possível ver uma representação gráfica dos níveis propostos [12].

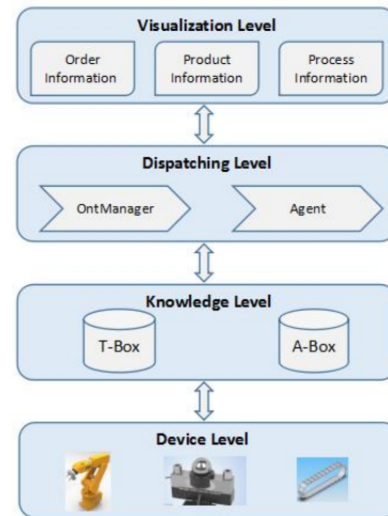


Figura 6. Arquitetura em níveis [12].

1) *Nível de visualização*: No nível de visualização ocorre a comunicação direta com o usuário. Nele é possível que os clientes realizem suas escolhas com relação ao produto a ser fabricado. É possível escolher a marca, cor, quantidade, configurações, etc. O nível de visualização é composto por uma interface de usuário que se comunica com o mecanismo de despacho, no nível seguinte.

2) *Nível de despacho*: Nível composto por duas entidades e responsável por gerar um esquema completo da implementação para os produtos especificados pelo usuário. Esses dois agentes são *web services* usados para o planejamento e tomada de decisão. O primeiro deles, o *OntManager* é o gerenciador da ontologia, usado para manter o estado atual do modelo OWL, i.e. manipula o estado do *web service* e se prepara para a próxima operação a ser executada. Já o agente, um componente de *software*, é responsável por tomar decisões baseadas na informação refletida pela ontologia e por despachar requisições. Ele é o responsável por selecionar a próxima tarefa a ser invocada por um dos *web services* também escolhido por ele.

3) *Nível de conhecimento*: Já o nível de conhecimento é onde os modelos OWL, responsáveis por descrever e modelar as informações dos componentes do sistema manufaturado ficam localizados. As informações podem ser: informações conceituais a respeito da estrutura física, informações do processo e seus relacionamentos ou informações dos serviços, eventos ou produtos. Dois modelos compõem esse nível: o T-BOX (estático) é responsável por manter o conhecimento de domínios específicos e o A-BOX (dinâmico) armazena os indivíduos gerados com seus respectivos conceitos na T-BOX.

4) *Nível de dispositivo*: Ao nível mais baixo dessa arquitetura, encontra-se uma série de máquinas industriais, e.g. estações de trabalho, sensores, atuadores, etc. que oferecem as funcionalidades necessárias para a fabricação de itens manufaturados. Todas as operações são encapsuladas em operações

de *web services* e podem ser invocadas pelo nível de despacho. Seus estados também são mapeados constantemente no modelo OWL.

IV. CASO DE ESTUDO

Utilizando da última arquitetura proposta, um modelo genérico combinando conceitos, funcionalidades e tecnologia de manufatura para uma linha de produção de automóveis orientado a eventos foi utilizado [12] para verificar o uso da arquitetura. O sistema foi dividido em oito subsistemas com seus conceitos sendo representados por ontologias. Todo o processo é descrito no diagrama de sequência ao final.

A. Subsistemas

Na Figura 7 é possível ver a linha de produção representada de forma 3D bem como sua estrutura física. Ela é composta por um *pipeline* contendo os sub-sistemas: (1) inicialização, (2) montagem do chassi, (3) montagem do corpo, (4) escaneamento do veículo, (5) polimento da janela, (6) verificador de qualidade, (7) finalização do veículo e (8) reparos artificiais. O primeiro subsistema é responsável por iniciar o processo de manufatura. É responsável por carregar um palete contendo as informações geradas pelo cliente e pelo processo de produção, bem como um RFID¹. Em seguida o palete é enviado ao próximo sub-sistema responsável por selecionar um chassi do armazém por um robô e enviado a próxima etapa, onde um robô KUKA² configura o corpo do carro a partir das especificações dadas no plano de produção, encaixando o chassi no corpo recém-configurado. Em seguida, o corpo é escaneado de forma a garantir que esteja com as configurações corretas, retornando suas dimensões (largura e comprimento). No sub-sistema de polimento da janela, como o próprio nome já diz, a etapa é responsável por tal ação. Ela é composta de dois modelos de processo: o primeiro é uma estação de trabalho de fresagem fixa e o segundo é uma estação de trabalho de polimento removível que é transportada por um veículo guiado automaticamente. Em seguida, o sub-sistema de qualidade recebe o veículo e o inspeciona visualmente, se algum defeito é encontrado ele é enviado a etapa de reparos artificiais, caso contrário o veículo é finalizado e colocado por um robô UR em um armazém. Se for enviado a etapa de reparos artificiais, um operador é responsável por executar reparos de acordo com um livro de instruções e outras informações.

B. Ontologias

A Figura 8 descreve as principais classes na ontologia de manufatura do caso de estudo. Nela são descritas as ontologias utilizadas pelas sub-sistemas descritos anteriormente. Foram representadas seis ontologias: de equipamento, de pedido, de produto, de processo, de serviço e de evento bem como seus relacionamentos e conceitos.

¹RFID: etiquetador baseado em rádio-frequência

²KUKA: É uma das empresas líderes no ramo de fabricação de robôs industriais e sistemas de automação

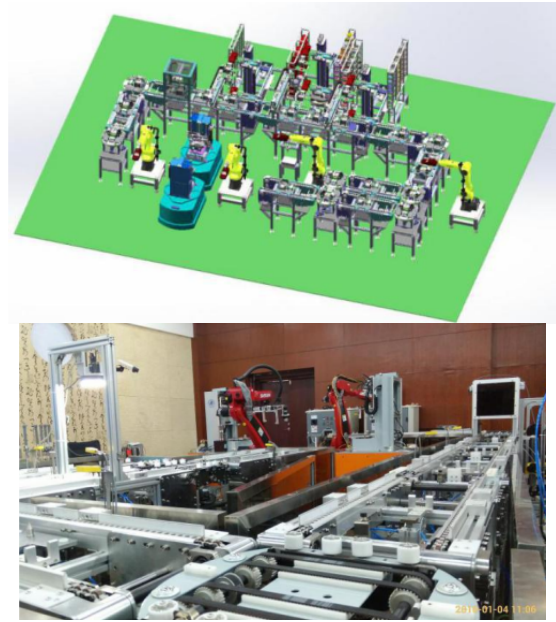


Figura 7. Ilustração 3D e representação física da linha de produção [12].

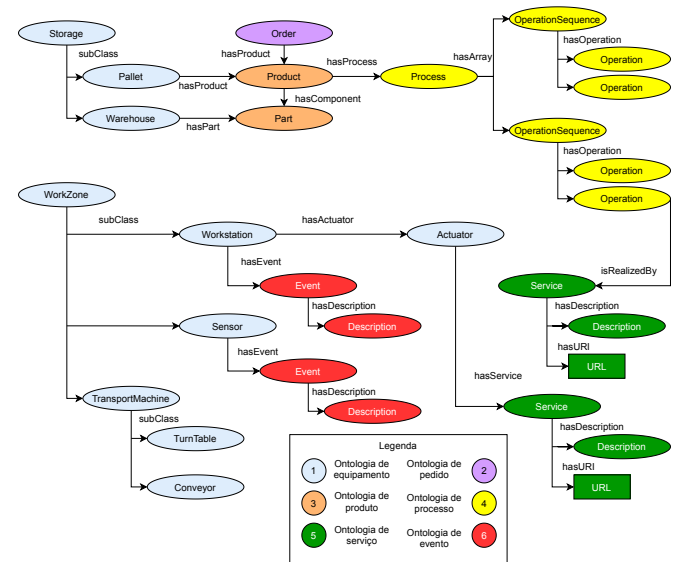


Figura 8. Ontologia que descreve o modelo de conhecimento do sistema manufaturado. Adaptado de [12].

C. Diagrama de sequência

O sistema implementado pelo autor utiliza um mecanismo orientado a eventos. Na Figura 9 é possível ver o diagrama de sequência do sistema, desde a etapa de seleção das características do produto, até a finalização do mesmo, apresentando a interação do sistema no seu interior.

O sistema inicia quando o cliente, usando a interface de usuário coloca uma nova ordem contendo seus requisitos. Em seguida a informação é instanciada na ontologia de pedido. A informação do produto então é requisitada pelo agente e enviada a ele que em seguida se inscreve nos *web services* a serem usados. Requisições ao OntManager são então enviadas pelo agente, entrando em um processo repetitivo até que todo

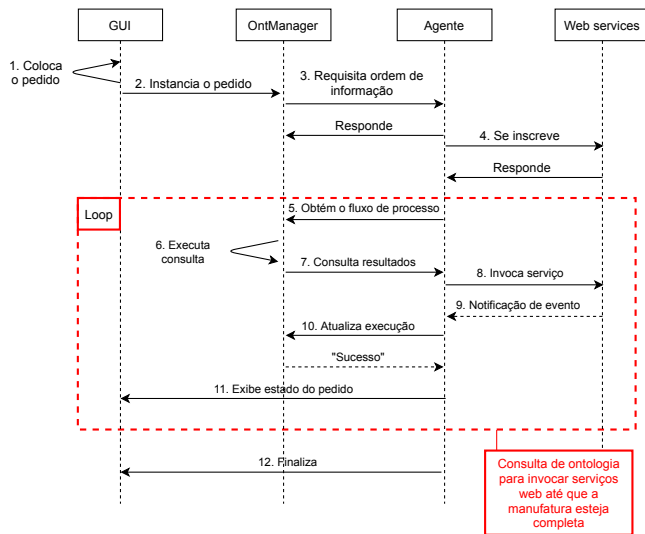


Figura 9. Diagrama de sequência do sistema. Adaptado de [12].

o item manufaturado seja finalizado. O OntManager, em cada uma dessas repetições executa uma consulta na ontologia necessária, enviando seus resultados de volta ao agente que utilizará da URL e alguns parâmetros para invocar os *web services*. Após, o agente recebe uma notificação do evento, fazendo com que o OntManager altere seu estado exibindo o pedido na interface de usuário, confirmando a a execução do processo. Ao final de todo o processo manufaturado, um sinal de “completo” é enviado, notificando o usuário que o processo como um todo foi finalizado.

V. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ao examinar cada uma das abordagens discutidas nesse trabalho, nota-se que o uso da web semântica na manufatura trás benefícios para as companhias. O principal deles é a interoperabilidade das máquinas, que ao fazerem uso da web semântica e ferramentas associadas (ontologias, *web services*) conseguem se comunicar de forma eficiente e agilizar suas tarefas de forma automatizada.

A web semântica não só trás o benefício da interoperabilidade, como faz e sempre buscou, promover uma padronização no seu uso. [2] discutiu em seu trabalho, os benefícios do uso da web semântica, apresentando o Intelligent Factory Environment, mostrando que ao utilizar uma forma de padronização (a OWL, por exemplo) é possível que os mais diversos sistemas se integrem através de uma forma de comunicação única.

Não só a padronização trás benefícios para interoperabilidade, como também trás facilidades na hora da construção de novos sistemas manufaturados automatizados. [12], [11] mostraram como é possível adaptar e até mesmo reutilizar ontologias na hora de implementar um novo sistema.

Ao analisar com cuidado cada um dos trabalhos base deste, é possível também notar que todos propuseram uma arquitetura em camada e/ou níveis. De fato, muitos sistemas computacionais seguem esse aspecto, tornando aplicações coesas e modularizadas, facilitando assim a construção de novas ou até mesmo a manutenção de antigas aplicações.

REFERÊNCIAS

- [1] M. P. Groover, *Fundamentals of modern manufacturing: materials, processes, and systems*. John Wiley & Sons, 2020.
- [2] J. L. M. Lastra and M. Delamer, “Semantic web services in factory automation: fundamental insights and research roadmap,” *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 2, no. 1, pp. 1–11, 2006.
- [3] T. Berners-Lee, J. Hendler, and O. Lassila, “The semantic web,” *Scientific american*, vol. 284, no. 5, pp. 34–43, 2001.
- [4] J. E. S. Segundo and C. S. Coneglian, “Tecnologias da web semântica aplicadas a organização do conhecimento: padrão skos para construção e uso de vocabulários controlados descentralizados,” *Organização do Conhecimento e Diversidade Cultural*, vol. 3, pp. 224–233, 2015.
- [5] G. Antoniou and F. Van Harmelen, “Web ontology language: Owl,” in *Handbook on ontologies*. Springer, 2004, pp. 67–92.
- [6] S. Bechhofer, F. Van Harmelen, J. Hendler, I. Horrocks, D. L. McGuinness, P. F. Patel-Schneider, L. A. Stein *et al.*, “Owl web ontology language reference,” *W3C recommendation*, vol. 10, no. 2, pp. 1–53, 2004.
- [7] D. L. McGuinness, F. Van Harmelen *et al.*, “Owl web ontology language overview,” *W3C recommendation*, vol. 10, no. 10, p. 2004, 2004.
- [8] D. Tidwell, “Web services-the web’s next revolution,” *IBM developerWorks*, 2000.
- [9] R. Battle and E. Benson, “Bridging the semantic web and web 2.0 with representational state transfer (rest),” *Journal of Web Semantics*, vol. 6, no. 1, pp. 61–69, 2008, semantic Web and Web 2.0. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1570826807000510>
- [10] Y. Alsafi and V. Vyatkin, “Ontology-based reconfiguration agent for intelligent mechatronic systems in flexible manufacturing,” *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 26, no. 4, pp. 381–391, 2010.
- [11] B. S. Adamczyk, A. L. Szejka, and O. C. Júnior, “Knowledge-based expert system to support the semantic interoperability in smart manufacturing,” *Computers in Industry*, vol. 115, p. 103161, 2020.
- [12] H. Cheng, L. Xue, P. Wang, P. Zeng, and H. Yu, “Ontology-based web service integration for flexible manufacturing systems,” in *2017 IEEE 15th International Conference on Industrial Informatics (INDIN)*, 2017, pp. 351–356.
- [13] Y. Koren, U. Heisel, F. Jovane, T. Moriawaki, G. Pritschow, G. Ulsoy, and H. Van Brussel, “Reconfigurable manufacturing systems,” *CIRP annals*, vol. 48, no. 2, pp. 527–540, 1999.
- [14] D. Directive, “Standardization and interoperability of weapons systems and equipment within the north atlantic treaty organization,” *DoD, Washington DC, USA*, 1980.
- [15] J. Rumbaugh, I. Jacobson, and G. Booch, “The unified modeling language,” *Reference manual*, 1999.