

Uma Ontologia para Poços de Petróleo Equipados com Bombeio Centrífugo Submerso

Washington S. Pereira * Sérgio Gorender **

* *Programa de Pós Graduação em Mecatrônica (PPGM)*
Universidade Federal da Bahia, BA
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia, BA
(e-mail: washington.pereira@ufba.br).

** *Programa de Pós Graduação em Mecatrônica (PPGM)*
Departamento de Computação Interdisciplinar (DCI)
Laboratório de Sistemas Distribuídos (LaSiD)
Universidade Federal da Bahia, BA (e-mail: gorender@ufba.br)

Abstract:

The increasing demand for the use of petroleum derivatives combined with high prices, has stimulated a great investment in the development of technologies for the entire production chain process of this industry, making it more efficient and reliable. Technologies based on digitalization, with massive use of ICTs, have been developed, one of which is the concept of digital twins. Digital twins are digital copies of equipments or complete industrial sites, in real time, and have been developed for the oil extraction stage. Among the component modules of a digital twin is the data acquisition module, which uses sensors to monitor the digitized equipment. The data obtained are better structured using an ontology. In this article we present an ontology for oil wells operated by electrical submersible pump system. This ontology will be used in a data acquisition module, in a project to develop a digital twin.

Resumo:

Com o aumento crescente na demanda pelo uso de derivados de petróleo juntamente com o aumento dos preços no mercado de óleo de gás, tem sido feito um grande investimento no desenvolvimento de tecnologias para todo o processo da cadeia produtiva desta indústria, tornando-a mais eficiente e confiável. Tecnologias baseadas na digitalização vêm sendo desenvolvidas, sendo uma destas o conceito de gêmeos digitais. Gêmeos digitais são cópias digitais de equipamentos ou parques industriais completos, em tempo real, e têm sido desenvolvidos para a etapa de extração de petróleo. Entre os módulos componentes de um gêmeo digital está o de aquisição de dados, que utiliza sensores para monitorar os equipamentos digitalizados. Os dados obtidos são melhor estruturados utilizando uma ontologia. Neste artigo apresentamos uma ontologia para poços de petróleo equipados com bombeio centrífugo submerso. Esta ontologia compõe um módulo de aquisição de dados, em um projeto de desenvolvimento de um gêmeo digital.

Keywords: Ontology, digital twin, oil and gas, oil wells, electric submersible pump.

Palavras-chaves: Ontologias, gêmeos digitais, petróleo e gás, poços de petróleo, bombeio centrífugo submerso.

1. INTRODUÇÃO

Um grande investimento tem sido feito no desenvolvimento de tecnologias para a indústria de óleo e gás, aplicáveis aos processos de prospecção, extração e refinamento. Este investimento tem sido justificado com o crescente aumento na demanda por derivados em geral, associado aos altos preços praticados por este mercado. Tecnologias que aumentem a probabilidade de acertos na prospecção, que tornem mais baratos e confiáveis os processos de extração, e façam a gestão mais eficiente do refinamento, estão sempre em estudo e desenvolvimento (Cameron et al., 2018).

Tem crescido o uso de sistemas computacionais como forma de propiciar uma gestão e controle mais eficientes e seguros em toda a indústria de petróleo (Singh and

Pateriya, 2019). Na extração, o uso de Tecnologias da Informação e Comunicação (TICs) é responsável por um acompanhamento e gestão do funcionamento dos poços, propiciando processos mais seguros, baratos e duradouros. Nesta área de atuação, têm sido propostos e desenvolvidos sistemas baseados no conceito de gêmeos digitais (*digital twin* - DT), sendo caracterizados com uma das tecnologias mais promissoras para a área de produção. Embora o conceito já seja conhecido por mais de vinte anos, sua utilização em empresas de petróleo e gás está em estágio inicial (Wanasinghe et al., 2020).

Um gêmeo digital é uma representação virtual, em um sistema computacional, de um artefato físico, espelhando características e comportamentos, objetivando ser um modelo virtual mais realístico possível de sua contraparte

física (Alam and El Saddik, 2017). Este artefato tanto pode ser um equipamento como um parque industrial completo. Desta forma, um gêmeo digital tanto permite a monitoração do objeto real, retratando tudo o que acontece com este objeto em tempo real, como também permite a simulação do efeito de novas configurações neste objeto. O DT permite também que o objeto real seja de fato reconfigurado a partir de alterações em seus parâmetros realizados através do sistema (Zhang et al., 2019). O uso de gêmeos digitais na área de petróleo e gás pode contribuir com a melhoria da visualização e previsibilidade das operações, representação precisa dos ambientes operacionais e auxiliar nas tomadas de decisão para que o planejamento e execução sejam bem-feitos e seguros.

Um gêmeo digital possui vários componentes, como por exemplo o armazenamento de dados e a interface. Um dos módulos fundamentais na estrutura de um gêmeo digital é o de aquisição de dados (Uhlemann et al., 2017). Neste módulo são obtidas informações diretamente do sistema de sensoriamento do equipamento real. São informações sobre o estado de cada parte do objeto monitorado, e como estão funcionando. Através da atualização periódica destas informações, é possível manter atualizada a representação provida pela cópia virtual, permitindo a emulação em tempo real de comportamentos e facilidades (Steinmetz et al., 2018).

As informações obtidas pelo módulo de aquisição de dados precisam ser armazenadas e são utilizadas para a construção da imagem do objeto no módulo de interface. Para isto, estas informações precisam ser adequadamente interpretadas e processadas. Considerando a grande quantidade de dados diferentes que podem ser coletados em um objeto ou equipamento real, é necessário que exista um modelo de dados capaz de fornecer o detalhamento, a estrutura e o significado dos dados que retratam o funcionamento dos dispositivos reais. Com este objetivo são frequentemente utilizadas ontologias (Garetti et al., 2015; David et al., 2019).

Uma ontologia é um modelo completo e semântico de um domínio do conhecimento. São representações capazes de satisfazer as características de abertura, reuso, interoperabilidade e adaptação considerando os padrões existentes. Essas representações do conhecimento possibilitam a interoperabilidade entre os dispositivos e permitem visualizar como os dados trafegados entre eles se relacionam. Ontologias são construídas utilizando linguagens específicas, que tanto permitem o entendimento dos dados por parte do desenvolvedor, como podem ser utilizadas para gerar códigos para compor sistemas computacionais (Asim et al., 2018).

O presente artigo apresenta a estrutura de uma ontologia para um sistema de elevação artificial para poços de petróleo baseado em bombeamento centrífugo submerso (BCS). A escolha do BCS se deve à expansão da sua aplicação para produção de grandes volumes (em torno de 5.000 m³ por dia) de fluidos viscosos em altas profundidades (na faixa de 5.000 metros) (Takacs, 2009), adequado a extração em ambiente marítimo. A ontologia representa todos os componentes de um poço baseado em BCS, seus comportamentos e funções na estrutura do poço, como se conectam, e como atuam de forma conjunto e cooperativa

para a extração de petróleo. Esta ontologia faz parte do módulo de aquisição de dados e supervisão de sistemas que é parte de um projeto maior, cujo objetivo é desenvolver um gêmeo digital para poços de petróleo.

Este artigo está organizado da forma descrita a seguir. A seção 2 apresenta trabalhos relacionados. A seção 3 apresenta uma descrição geral dos componentes e funcionamento de um poço baseado em BCS. A seção 4 apresenta a metodologia utilizada para desenvolvimento da ontologia. A seção 5 apresenta a ontologia proposta para poços BCS e a seção 6 apresenta uma conclusão para o trabalho.

2. TRABALHOS RELACIONADOS

Dentro da área de exploração e produção de petróleo e gás, não foram encontradas ontologias para poços equipados com BCS com o nível de detalhamento necessário e adequado para o desenvolvimento de gêmeos digitais. A publicação envolvendo ontologia pertencente a Pinkel et al. (2018) realiza uma avaliação de um conjunto de dados publicados sobre as atividades exploração e produção da empresa *Norwegian Petroleum Directorate*. A ontologia serve como uma base de dados que abrange o domínio de petróleo e gás. A abordagem utilizou o *Relational-to-Ontology Data Integration (RODI) benchmark* que possui um *framework* para testar sistemas e uma função para mensurar a utilidade dos mapas gerados pelo sistema.

Por esse motivo, as publicações utilizadas como referência destacam representações baseadas em ontologias utilizadas em aplicações que garantem a integração de serviços ciber-físicos em gêmeos digitais na indústria da manufatura. Essas aplicações são abordadas por Alam and El Saddik (2017) que apresentam uma arquitetura de sistemas ciber-físicos com representação baseada em gêmeos digitais armazenada em nuvem. Cada objeto real situado na camada física está relacionado a um *cyber* objeto da camada virtual, estabelecendo comunicações mútuas dentro de seus respectivos grupos. O modelo de referência é formado por camadas, entre elas a camada de serviços inteligentes que é representada por uma ontologia. A função dessa camada é gerenciar as políticas de privacidade de dados e agrupamento de funcionalidades. Asim et al. (2018) também destacam a construção de ontologias para um determinado domínio como uma linguagem comum para facilitar a integração dos componentes de sistemas ciber-físicos baseados em gêmeos digitais.

Seguindo essa linha, Steinmetz et al. (2018) propõem uma ontologia para representar gêmeos digitais em sistemas ciber-físicos para fábricas inteligentes. Cada entidade possui sua cópia virtual em que é possível interagir e monitorar os dispositivos físicos. A ontologia é um meio de obter a interoperabilidade entre os diferentes elementos, representando o gêmeo digital no contexto ciber-físico e internet das coisas para a solução de problemas reais através de análises e manipulações em ambiente virtual. O trabalho de Zhang et al. (2019) aborda a modelagem de gêmeos digitais reconfiguráveis (*reconfigurable digital twin* - RDT) para sistemas de manufatura. A ontologia faz parte da camada de modelagem descrevendo cada recurso da camada física e abrange três granularidades de problemas reconfiguráveis (equipamentos, unidades e sistemas). A ontologia também descreve cinco dimensões: capacidades, proprie-

dades, geometria, dependências e restrições das entidades. Os parâmetros do modelo são atualizados dinamicamente enquanto o sistema está sendo reconfigurado permitindo ao RDT ser “exatamente idêntico” a entidade natural.

O conhecimento obtido a partir da utilização de ontologias em gêmeos digitais na indústria da manufatura pôde ser trasladado para os poços produtores de petróleo. Apesar da maior quantidade de restrições, especialmente relacionadas a sua localização, geralmente em ambiente remoto e mais difícil de ser controlado.

3. POÇOS PRODUTORES DE PETRÓLEO EQUIPADOS COM BOMBEIO CENTRÍFUGO SUBMERSO

A demanda por métodos artificiais para elevação surge quando a vazão não atinge o patamar esperado ou a pressão do reservatório não é suficiente para conduzir os fluidos à superfície. A elevação artificial utiliza equipamentos que fornecem um suplemento de energia capaz de ampliar o diferencial de pressão em relação ao reservatório (Costa, 2012). A escolha do método de elevação deve considerar as restrições dos dispositivos e as condições do campo como a profundidade do poço, taxa de produção esperada e propriedades dos fluidos. Dentre os principais métodos de elevação artificial destacam-se: o *gas-lift*, o bombeio com hastes, o bombeio por cavidades progressivas (BCP) e o bombeio centrífugo submerso.

Composição do sistema BCS

De acordo com Thomas (2001), Takacs (2009), Moricca et al. (2016), Nemoto and Bittencourt (2020), Liang and El-Kadri (2018) e Chugunov et al. (2020), os equipamentos que compõem o sistema BCS são agrupados quanto a localização em equipamentos de superfície e subsuperfície. Para as funções auxiliares de fixação, sustentação e adaptação, são instalados equipamentos categorizados como acessórios, tais como: adaptadores, conectores, mandris, acoplamento, cintas, calhas, suspensores e centralizadores. Ainda, de maneira complementar, são instalados instrumentos e sensores destinados ao monitoramento dos parâmetros operacionais. Os principais componentes do BCS podem ser visualizados na 1.

(1) Equipamentos de subsuperfície

- Bomba submersa: Trata-se de uma bomba hidráulica do tipo centrífuga construída com rotor na posição vertical e múltiplos estágios montados em série. Cada estágio dispõe de um impelidor que admite o fluido pela sua parte central inferior e o impulsiona radialmente aumentando sua energia cinética. O fluido colide com um elemento estático chamado difusor, que o encaminha para o estágio seguinte e transforma a energia cinética em energia de pressão. A cada estágio imediatamente superior o fluido sofre um acréscimo de pressão. A quantidade de estágios são tantas quanto forem necessárias para atingir a capacidade de elevação desejada, conhecida como *head* (H).

- Admissão da bomba: O *intake* ou admissão da bomba está situado na parte inferior da bomba. A depender da vazão do fluido e da razão gás-líquido (RGL), pode-se optar por uma admissão do tipo

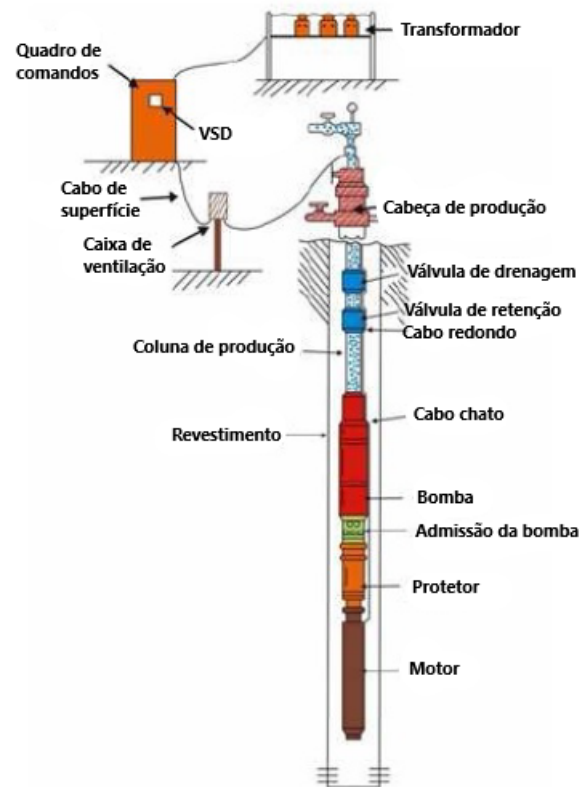


Figura 1. Instalação convencional do sistema BCS.

simples ou do tipo separador de gás. O tipo simples é utilizado quando o RGL é baixo de forma a não afetar a eficiência da elevação. Os separadores de gás podem ser do tipo estacionário (para baixa quantidade de gás) ou centrífugo (para alta quantidade de gás). São aplicados quando a existência de gás livre na sucção da bomba provoca queda de desempenho e danos ao equipamento pela erosão nas partes metálicas devido ao colapso das bolhas.

- Protetor: Também conhecido como selo, é um dispositivo que faz a conexão entre motor e admissão da bomba. Possui as funções de prevenir a entrada do fluido bombeado no motor, equilibrar as pressões do fluido, fornecer o volume suficiente para a expansão do óleo do motor por conta do aquecimento e acomodar o mancal para absorver os esforços transmitidos pelo eixo da bomba na direção radial.

- Motor elétrico: Fornece o movimento rotacional à bomba submersa recebendo energia elétrica, através de cabeamento, de um transformador localizado na superfície. Funciona predominantemente com velocidade de 3.500 rpm, frequência de 60 Hz, trifásico, dipolo e de indução. Os motores disponíveis fornecem uma potência de até 225 kW. Se a demanda superar esse limite, é possível fazer a montagem de até três motores de padrão idêntico em série. A alimentação pode ser feita por um cabo apenas, atingindo aproximadamente 750 kW, ou com um quadro exclusivo para cada motor, atingindo potência próxima a 1.500 kW.

- Cabo elétrico: A energia elétrica para alimentação do motor é transmitida através de um cabo trifásico com capacidade para resistir a regimes severos de operação. Essas condições adversas incluem exposição a altas temperaturas e contato com fluidos corrosivos. As suas dimensões e formato são ajustados ao espaço limitado no anular do poço, podendo apresentar seção redonda ou chata. Normalmente a seção chata é utilizada na subsuperfície, por conta do curto espaço, e a seção redonda é usada na superfície.

- Coluna de produção para BCS: A coluna de produção é formada basicamente por tubos especificados de acordo com o diâmetro interno do revestimento, vazão esperada, características do fluido a ser produzido e os esforços mecânicos. Além dos tubos de produção, outros componentes fazem parte da montagem tais como: *check valve*, válvula de retenção, que impede o fluxo no sentido descendente; *packer* de produção, também conhecido como obturador, que realiza a vedação do espaço anular entre a coluna de produção e o revestimento; junta telescópica (*tubing seal receptacle* - TSR), é utilizada para absorver a expansão ou contração da coluna de produção devido às variações de temperatura durante a operação; e válvula de segurança (*down hole safety valve* - DHSV), serve para fechar o poço em situações emergenciais. Se trata de um equipamento existente em qualquer tipo de sistema de elevação, quer seja por surgência ou por elevação artificial, mas conta com composições diferentes a depender das características da elevação ou do poço.

(2) Equipamentos de superfície

- Transformador: Converte a tensão da rede elétrica para a tensão nominal do motor mais as perdas no cabo elétrico. Os fatores de escolha dependem da tensão da rede, tensão do motor, perdas no cabo e potência do motor. A potência dos transformadores varia entre 100 e 750 kVA. A tensão de alimentação no primário é de 460 V e a tensão na saída varia entre 800 a 4.000 V.

- Quadro de comandos: É composto por dois compartimentos, sendo responsável pela proteção e controle do sistema elétrico. No compartimento de baixa tensão localizam-se os relés, amperímetro e temporizador alimentados com 110 V. No compartimento de média tensão são instalados os transformadores de corrente, os transformadores de controle, fusíveis de proteção, chave seccionadora e o variador de frequência (*Variable Speed Drive* - VSD). O VSD permite uma partida suave e o ajuste da velocidade rotação do motor, que é proporcional à frequência de alimentação, regulando a vazão da bomba em relação à vazão do reservatório.

- Caixa de ventilação: O equipamento também é conhecido como caixa de junção, e possui as funções de: conectar o cabo elétrico da subsuperfície com o cabo elétrico do transformador, ventilar possíveis gases provenientes do poço através do cabo elétrico e servir como ponto de inspeção elétrica.

- Cabeça de produção: É o responsável pela sustentação dos equipamentos de subsuperfície, possuindo uma passagem para coluna de produção e outra para o cabo elétrico.

(3) Sistema de monitoramento

O sistema de monitoramento conta com sensores e instrumentos instalados no fundo do poço e no nível da superfície que coletam os dados operacionais em tempo real. Essas informações são registradas e transmitidas para unidades terminais remotas (*Remote Terminal Unit* - RTU) que as encaminham a sistemas supervisórios e de aquisição de dados (*Supervisory Control and Data Acquisition* - SCADA) (Peng et al., 2020). Os sistemas SCADA efetuam os ajustes necessários a manutenção das variáveis da operação dentro dos limites adequados (Moricca et al., 2016).

Os dispositivos de medição podem ser instalados no lado interno ou externo do revestimento ou ainda alinhados com a coluna de produção. A função é o monitoramento dos parâmetros referentes às condições do poço e do fluido produzido, tais como: razão entre água e óleo, pressão e temperatura do fluido e vazão. Há instrumentos instalados no quadro de comandos, como: amperímetro, voltímetro e o VSD responsáveis por medir as variáveis de operação dos equipamentos como: corrente elétrica, tensão de alimentação e frequência de alimentação do motor elétrico. Alguns dispositivos podem ser instalados no próprio equipamento ou em suportes especiais para realizar as medições no fundo do poço relativas a pressão, vazão, temperatura e vibração. As informações dos sensores instalados no fundo do poço podem ser enviadas por uma linha de comunicação exclusiva ou pelo mesmo cabo que transmite a energia ao motor devido ao custo e limitação de espaço (Watson et al., 2016).

4. METODOLOGIA

A engenharia do conhecimento seguiu a abordagem da modelagem de representação dos conceitos em classes de objetos. Deste modo, a ontologia foi utilizada para categorizar, armazenar, recuperar e gerenciar as informações relativas ao domínio considerado. O desenvolvimento do modelo formal seguiu as orientações sugeridas em (Noy et al., 2001), resultando nas seguintes etapas:

a) Determinação do domínio e o escopo da ontologia: foi determinado que a representação estaria limitada a um poço de petróleo equipado com o bombeio centrífugo submerso como sistema de elevação artificial, com a descrição dos seus componentes e dos relacionamentos entre eles.

b) Decisão sobre a reutilização de ontologias existentes: após a verificação em bibliotecas de ontologias *online*, não foi encontrado qualquer modelo que pudesse ser reaproveitado. Dessa forma, a construção do modelo de dados partiu do estágio inicial.

c) Enumeração de termos importantes: foram listadas todas as palavras que expressavam os conceitos ligados a montagem, operação e manutenção dos poços equipados com BCS.

d) Definição das classes e suas hierarquias: foi utilizada a abordagem mista, a qual combina a estratégia *top-down* (definição dos conceitos mais gerais e posterior detalhamento desses conceitos) com a *bottom-up* (definição de classes de conceitos mais específicos, realizando o subsequente agrupamento até a obtenção dos conceitos mais

gerais). Dessa forma, a partir da listagem dos termos, foram definidos inicialmente os conceitos mais importantes, sendo organizados hierarquicamente na etapa posterior.

e) Definição das propriedades de objeto: foram descritos os relacionamentos mais relevantes entre as classes. Esses relacionamentos explicitaram os detalhes de montagem e funcionamento do sistema BCS.

O processo de desenvolvimento da ontologia foi executado de forma iterativa para que os conceitos pudessem representar os detalhes a respeito do domínio. O primeiro passo foi a definição das classes e suas hierarquias. Nessa etapa, a assertividade da hierarquia foi testada através da relação *é um (is-a)*, onde uma subclasse é um tipo de conceito de uma classe. Foi verificada a transitividade das relações hierárquicas (se B é subclasse de A e C é subclasse de B, então C é subclasse de A) e evitado o estabelecimento de ciclos (onde uma classe A é subclasse de B e ao mesmo tempo é superclasse). Logo após, as classes foram denominadas, foram usadas palavras que representassem claramente o conceito de domínio. Os sinônimos foram listados e indicados nas propriedades de anotação da respectiva classe. As subclasses foram criadas na sequência. Foi analisado se a subclasse possuía propriedades não identificadas na classe, se as restrições não estavam repetidas e se estabeleciam relacionamentos diferentes.

A decisão sobre a criação de uma classe ou instância individual estava de acordo com nível de granularidade da representação. O critério usado foi o detalhamento dos componentes do poço, somado a compreensão da sua dinâmica de funcionamento e geração dos dados de monitoramento. Com essa base, foi definido que o nível de especialização das classes atingiria os conceitos relacionados aos componentes que afetassem diretamente a operação e manutenção do poço de petróleo equipado com BCS.

Em relação à sintaxe utilizada, foi seguida a padronização recomendada pela *World Wide Web Consortium (W3C)* com o uso da linguagem *Ontology Web Language (OWL)* em sua segunda versão de estrutura conceitual desenvolvida em 2012 (OWL 2) (Consortium et al., 2012). O *framework* usado para o desenvolvimento da ontologia foi a plataforma gráfica de edição *Protégé* (Musen, 2015) que é um *software* livre e apresenta um ambiente de código aberto extensível. O *Protégé* também gera ontologias em linguagens de programação, para ser diretamente utilizados em sistemas.

A escassez de ontologias de referência para o domínio do conhecimento relativo à aquisição de dados do processo de elevação artificial de poços de petróleo, dificultam a aplicação de abordagens de avaliação voltadas a ontologia padrão ou orientada a dados para efeito de comparação. Os testes de consistência da ontologia foram realizados através do recurso *Reasoner* da plataforma *Protégé* e do comparativo das informações extraídas da literatura especializada em poços equipados com BCS.

5. ONTOLOGIA PARA POÇOS EQUIPADOS COM BCS

Nessa seção serão apresentados os detalhes referentes a estrutura da ontologia. A organização hierárquica de classes e subclasses será mostrada na primeira subseção e os

principais relacionamentos entre as classes serão abordados na segunda subseção.

5.1 Definição das classes e suas hierarquias

As primeiras classes definidas representaram os conceitos fundamentais que originaram o primeiro nível da hierarquia imediatamente abaixo da classe genérica *owl:Thing*, destacada na figura 2. Algumas dessas classes, por sua vez, foram subdivididas em subclasses através de relações *is-a*, as quais serão detalhadas na sequência:

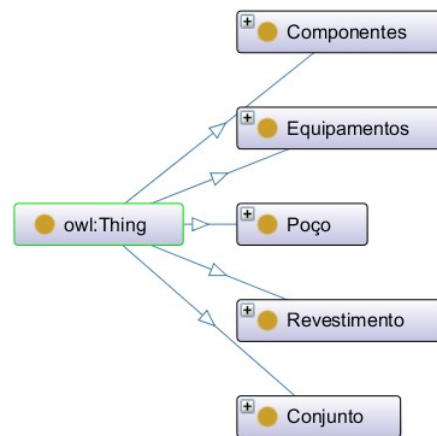


Figura 2. Classes do primeiro nível.

- Equipamentos: a criação dessa classe e seu detalhamento adotou como base a descrição dos dispositivos que compõem fisicamente um poço com BCS. Esses elementos são diretamente responsáveis pela elevação artificial do fluido de produção. O local de instalação desses equipamentos influencia diretamente na sua classificação e conseqüentemente na subdivisão em subclasses, conforme destacado na figura 3 e descrito a seguir:

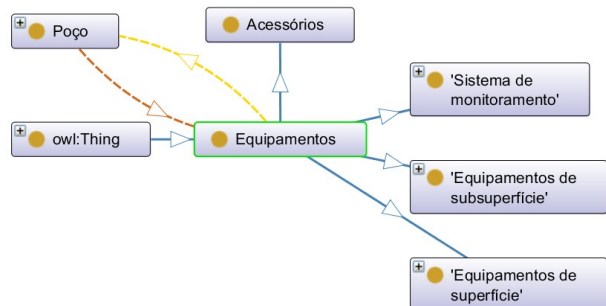


Figura 3. Subclasses de equipamentos.

- Equipamentos de superfície: referente aos equipamentos localizados no nível superficial e que possuem maior facilidade de acesso a verificações e intervenções. A classe foi organizada em subclasses que representam os conceitos dos dispositivos instalados no nível da superfície. As subclasses pertencentes a essa categoria são: *Cabeça de produção*, *Caixa de ventilação*, *Quadro de comandos* e *Transformador*, representando os conceitos dos equipamentos de superfície reais.

- Equipamentos de subsuperfície: contemplam os equipamentos instalados na perfuração do poço no nível subterrâneo e contém as subclasses: *Coluna de produção*, *Bomba submersa*, *Admissão da bomba*, *Protetor*, *Motor elétrico* e *Cabo elétrico*. O critério utilizado foi similar ao da subclasse *Equipamentos de superfície*, sendo incluídos nessa subclasse os conceitos que possuem atributos e relacionamentos diretamente ligados a elevação artificial.
- Sistema de monitoramento: é responsável pela medição e acompanhamento das grandezas variáveis da operação. Esta classe foi subdividida nas subclasses: *Sistema de monitoramento na superfície* e *sensores de fundo do poço*. A primeira, por sua vez, está subdividida em: *Amperímetro*, *Voltímetro*, *Variador de velocidade*, *Medidor de nível* e *Transdutor de pressão na cabeça do poço*, os quais representam os instrumentos e sensores instalados na superfície para a coleta de informações referentes a: corrente elétrica, tensão de alimentação e frequência do motor; nível do poço e pressão na cabeça do poço. Já a segunda representa os dispositivos instalados para o acompanhamento da pressão e temperatura no fundo do poço, vazão da bomba e vibração.
- Acessórios: classe representativa dos elementos com as funções de fixação, conexão e adaptação dos equipamentos de superfície ou subsuperfície. Nesta classe constam: adaptadores, calhas, cintas, conectores, mandris e suspensores. Como esses elementos não desempenham funções diretamente associadas ao processo de elevação, especialmente quando se trata de atributos e relacionamentos, a opção foi agrupá-los nessa classe específica.

- Componentes: representa os elementos constituintes dos equipamentos instalados no poço. A classe que representa o conceito do equipamento é relacionado através da propriedade de objeto *temParte* (*hasPart*) com as classes que representam o conceito de suas respectivas peças integrantes. Por exemplo a classe *Componentes da bomba submersa* é composta pelas classes: *Acoplamento*, *Arruela de impulso*, *Caraça*, *Difusor*, *Eixo*, *Estágio*, *Rolamento axial*, *Rolamento radial* e *Rotor*, as quais são representações dos elementos que compõem a bomba submersa física. Essa maneira de representar a composição dos equipamentos auxilia na compreensão do funcionamento individual dos equipamentos mais complexos.

- Conjunto: foi criada para representar os agrupamentos específicos dos equipamentos. Trata-se de uma estratégia que auxilia no entendimento da representação de acoplamentos especiais e variáveis entre os componentes do poço, como pode ser visto na figura 4. Uma das classes é *Coluna de produção*, cuja representação foi elaborada para detalhar o arranjo entre os equipamentos de subsuperfície. A *Coluna de produção* engloba as subclasses: *Coluna de produção convencional*, *Coluna de produção sem risco de erupção*, *Coluna em bloco Y* e *Coluna de produção encapsulada*. Ela representa quatro possibilidades de montagem do conjunto de elementos posicionados na subsuperfície do poço produtor, justamente conhecida como coluna de produção. Alguns equipamentos podem estar presentes ou não na montagem a depender do tipo de coluna. A outra classe é o *Conjunto BCS* que é formado pela agregação dos

elementos: bomba submersa, admissão da bomba, protetor e motor elétrico, esse conjunto está presente em qualquer tipo de coluna de produção. A subclasse foi criada para atender a forma como o conceito é conhecido no ambiente produtivo, além de ser um artifício para facilitar a construção do relacionamento de acoplamento, o qual será visto adiante.

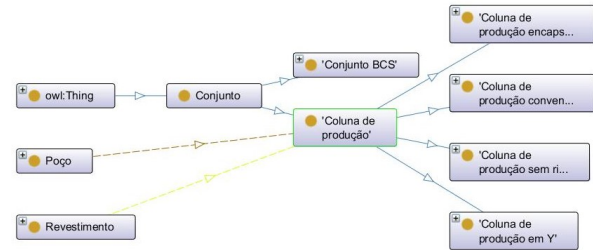


Figura 4. Classe *Conjunto*.

- Poço: essa classe foi definida de maneira a representar o sistema abordado no escopo da ontologia. Ela não possui especialização em subclasses, sendo composta pela agregação de todos os elementos da ontologia através do relacionamento *temParte* que será detalhado no próximo tópico.

Revestimento - representa a camada física que delimita o poço, responsável pela separação entre o ambiente onde estão instalados os equipamentos e a formação rochosa que contém o reservatório natural do petróleo. Como esse limite é uma construção física e contém os atributos, distância entre os canhoneados e a pressão na cabeça do revestimento, a opção foi destacá-la como uma classe *parteDe* (*partOf*) da classe poço.

5.2 Definição dos relacionamentos

As propriedades de objeto representam as formas como as classes se relacionam. Se baseiam em triplas: sujeito ou domínio, predicado (propriedade) e objeto ou *range*. Para algumas propriedades é possível estabelecer subpropriedades para tornar os relacionamentos mais expressivos. O modelo desenvolvido privilegiou as relações que transmitissem as ideias de posicionamento relativo entre os equipamentos, seus componentes, fornecimento de energia e movimento, além do monitoramento das variáveis do processo referentes a um equipamento específico. Como resultado foram definidas as seguintes propriedades de objeto:

- *acopla*: sequência de montagem dos equipamentos tanto no sentido fluxo de elevação dos fluidos bombeados (*upstream*) e contrafluxo (*downstream*). O ordenamento entre os dispositivos no sentido do contrafluxo obedece a sequência: cabeça de produção, suspensor de coluna e coluna de produção. Como a coluna de produção sofre variações em sua composição e montagem, novamente é estabelecido o sequenciamento dos seus elementos constituintes para suas composições básicas. A exemplo da coluna de produção convencional que obedece ao sequenciamento: tubos de produção, válvula de alívio, *packer* de produção, camisa deslizante, válvula de retenção e conjunto BCS. O conjunto BCS faz parte de todos os tipos de colunas de produção

contendo o sequenciamento em contrafluxo: bomba submersa, admissão da bomba, protetor e motor elétrico, como é mostrado na figura 5.

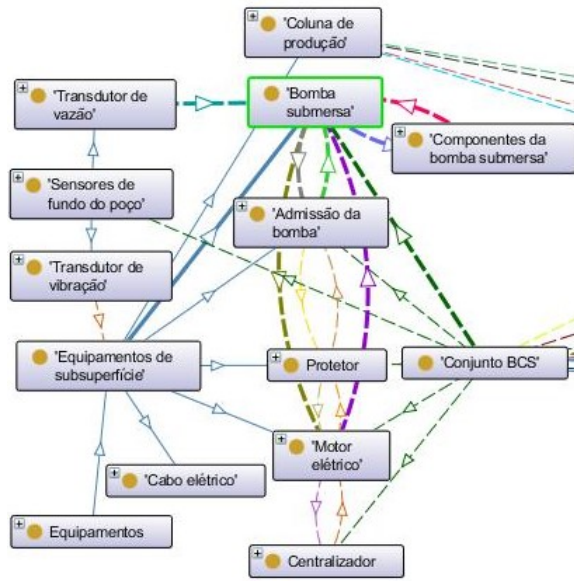


Figura 5. Relacionamento de acoplamento.

- *energiza*: relação de alimentação com energia elétrica entre os equipamentos. Estabelece o sequenciamento entre classes de maneira similar a propriedade *acopla* indicando qual dispositivo atua como fonte energética e qual está sendo energizado. O transformador energiza o quadro de comandos que, por sua vez, alimenta com média tensão o motor e com baixa tensão os sensores e instrumentos de monitoramento das variáveis do poço.

- *monitora*: estabelece a relação entre os dispositivos que estão sendo utilizados para monitorar uma variável da operação dos sistemas ou equipamentos de processo, indicado na figura 6. As suas sub-propriedades indicam quais sensores ou instrumentos estão monitorando os parâmetros relevantes a operação do poço tais como: temperatura, pressão, nível e vibração. Os instrumentos monitoram um parâmetro operacional de um equipamento específico como o amperímetro que mensura a corrente de alimentação do motor elétrico.

- *movimenta*: relação que expressa a transmissão do movimento de rotação do motor elétrico para a bomba submersa.

- *regulaRotação*: relação de controle e ajuste da velocidade de rotação do motor elétrico executado pelo VSD.

- *reveste*: relacionamento entre o conceito dos dispositivos que possuem uma camada protetora ou limitadora. Uma das situações apresentadas é a classe *Revestimento* utilizada para delimitar e separar o volume de controle operacional. Outra situação é a classe *Revestimento Butress*, cuja função é recobrir o conjunto BCS quando a coluna de produção é do tipo encapsulada.

- *temParte*: agregação das classes que representam os elementos componentes de uma máquina ou conjunto de equipamentos com uma função determinada. Essa relação é

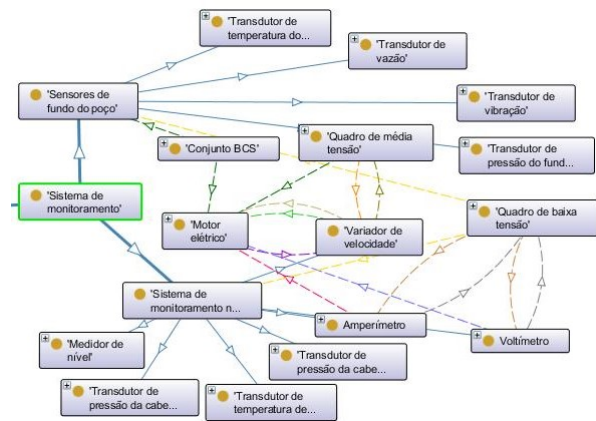


Figura 6. Relacionamento de monitoramento.

utilizada para informar tanto a composição da classe *Poço*, composta pelos equipamentos e revestimento. Também é utilizada para representar a composição dos equipamentos mais relevantes como bomba, motor, protetor, quadro de comando e transformador. Esse relacionamento também é usado para indicar a agregação das classes que compõem o conjunto BCS e os quatro tipos de coluna de produção para BCS abordados por este trabalho.

Relações inversas

É fundamental que a ontologia responda a questões geradas tanto de uma análise dos conceitos mais gerais aos detalhes quanto em sentido contrário. Dessa forma, cada propriedade de objeto possui sua relação inversa. A descrição das propriedades de objetos, juntamente com suas propriedades inversas são apresentadas na tabela 1.

Tabela 1. Relacionamentos inversos

Propriedades de objeto	Propriedades inversas
<i>acoplamentoDescendente</i>	<i>acoplamentoAscendente</i>
<i>energiza</i>	<i>éEnergizadoPor</i>
<i>monitora</i>	<i>éMonitoradoPor</i>
<i>move</i>	<i>éMovidoPor</i>
<i>regulaRotação</i>	<i>rotaçãoReguladaPor</i>
<i>cobre</i>	<i>éCobertoPor</i>
<i>temParte</i>	<i>éParteDe</i>

O relacionamento *temParte* possui como inverso *éParteDe*, assim é possível estabelecer, por exemplo, que o poço tem equipamento como sua parte ou que o equipamento é parte do poço; por exemplo o revestimento *éParteDe* poço, assim como o poço *temParte* o revestimento. Já a relação *acoplamentoDescendente* representa a sequência de montagem dos equipamentos no poço na ordem de contrafluxo e possui como inverso a relação *acoplamentoAscendente* que representa a sequência de montagem na ordem inversa, ou seja, no sentido do fluxo.

6. CONCLUSÃO

Neste artigo foi apresentada a estrutura geral de uma ontologia para poços de petróleo equipados com bombeio centrífugo submerso. A ontologia apresenta cada equipamento que compõe um poço equipado com BCS, assim como a estrutura do poço com a conexão dos equipamentos, e o funcionamento geral do poço, a partir do comportamento

e funcionamento de cada equipamento. Também apresenta sensores e dados obtidos de monitoração dos diversos equipamentos, modelando desta forma as informações obtidas por um módulo de aquisição de dados, e seu significado na interpretação do funcionamento do poço. Os atributos das classes descritas não foram apresentados, ficando este detalhamento para um trabalho futuro.

Esta ontologia é uma etapa no desenvolvimento de um gêmeo digital para poços de petróleo desenvolvida utilizando o software Protégé. Como próxima etapa deste trabalho, a ontologia será gerada em linguagem de programação, para o desenvolvimento do módulo de aquisição de dados do gêmeo digital. Além do módulo para o gêmeo digital, a ontologia pode servir como um repositório de informações a respeito do domínio de poços equipados com bombeio centrífugo submerso e, também, como fonte para a construção de sistemas baseados em conhecimento.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Laboratório de Sistemas Distribuídos (LASID) do Instituto da Computação e ao Centro de Capacitação Tecnológica em Automação Industrial (CTAI) da Escola Politécnica da UFBA, pela infraestrutura disponibilizada. A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro e a Petrobrás pelo apoio ao desenvolvimento do Laboratório de Elevação Artificial (LEA).

REFERÊNCIAS

- Alam, K.M. and El Saddik, A. (2017). C2ps: A digital twin architecture reference model for the cloud-based cyber-physical systems. *IEEE access*, 5, 2050–2062.
- Asim, M.N., Wasim, M., Khan, M.U.G., Mahmood, W., and Abbasi, H.M. (2018). A survey of ontology learning techniques and applications. *Database*, 2018.
- Cameron, D.B., Waaler, A., and Komulainen, T.M. (2018). Oil and gas digital twins after twenty years. how can they be made sustainable, maintainable and useful? In *Proceedings of The 59th Conference on Simulation and Modelling (SIMS 59), 26-28 September 2018, Oslo Metropolitan University, Norway*, 153, 9–16. Linköping University Electronic Press.
- Chugunov, N., Verma, S., and Bose, S. (2020). Fault detection in electric submersible pumps. US Patent 10,677,041.
- Consortium, W.W.W. et al. (2012). Owl 2 web ontology language document overview. *World Wide Web Consortium*.
- Costa, R. (2012). *Controle aplicado a poços com método de elevação bombeio centrífugo submerso, 2012. 128 f.* Ph.D. thesis, Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Petróleo), Programa de Pós
- David, J., Lobov, A., and Lanz, M. (2019). Attaining learning objectives by ontological reasoning using digital twins. *Procedia Manufacturing*, 31, 349–355.
- Garetti, M., Fumagalli, L., and Negri, E. (2015). Role of ontologies for cps implementation in manufacturing. *Management and Production Engineering Review*.
- Liang, X. and El-Kadri, A. (2018). Factors affecting electrical submersible pump systems operation. In *2018 IEEE Electrical Power and Energy Conference (EPEC)*, 1–6. IEEE.
- Moricca, G., Querales, M., Dhar, J., Carvajal, G., Cullick, A.S., Vellanki, R.K., Villamizar, M., and Rodriguez, J. (2016). Monitoring, diagnosing and optimizing electric submersible pump operations. US Patent 9,261,097.
- Musen, M.A. (2015). The protégé project: a look back and a look forward. *AI matters*, 1(4), 4–12.
- Nemoto, R.H. and Bittencourt, J.L. (2020). Methods of optimal selection and sizing of electric submersible pumps. US Patent 10,697,293.
- Noy, N.F., McGuinness, D.L., et al. (2001). Ontology development 101: A guide to creating your first ontology.
- Peng, L., Han, G., Pagou, A.L., and Shu, J. (2020). Electric submersible pump broken shaft fault diagnosis based on principal component analysis. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 191, 107154.
- Pinkel, C., Binnig, C., Jiménez-Ruiz, E., Kharlamov, E., May, W., Nikolov, A., Sasa Bastinos, A., Skjæveland, M.G., Solimando, A., Taheriyani, M., et al. (2018). Rodi: Benchmarking relational-to-ontology mapping generation quality. *Semantic Web*, 9(1), 25–52.
- Singh, A.K. and Pateriya, R. (2019). Analysis of crucial oil gas and liquid sensor statistics and production forecasting using iiot and autoregressive models. *IRJET - International Research Journal of Engineering and Technology*.
- Steinmetz, C., Rettberg, A., Ribeiro, F.G.C., Schroeder, G., and Pereira, C.E. (2018). Internet of things ontology for digital twin in cyber physical systems. In *2018 VIII Brazilian Symposium on Computing Systems Engineering (SBESC)*, 154–159. IEEE.
- Takacs, G. (2009). *Electrical submersible pumps manual: design, operations, and maintenance*. Gulf professional publishing.
- Thomas, J.E. (2001). *Fundamentos de engenharia de petróleo*. Interciência.
- Uhlemann, T.H.J., Schock, C., Lehmann, C., Freiberger, S., and Steinhilper, R. (2017). The digital twin: demonstrating the potential of real time data acquisition in production systems. *Procedia Manufacturing*, 9, 113–120.
- Wanasinghe, T.R., Wroblewski, L., Petersen, B.K., Gosine, R.G., James, L.A., De Silva, O., Mann, G.K., and Warran, P.J. (2020). Digital twin for the oil and gas industry: Overview, research trends, opportunities, and challenges. *IEEE Access*, 8, 104175–104197.
- Watson, A.I., Booker, J.A., Armstrong, K., and Rowatt, J.D. (2016). Electric submersible pumping sensor device and method. US Patent 9,482,233.
- Zhang, C., Xu, W., Liu, J., Liu, Z., Zhou, Z., and Pham, D.T. (2019). A reconfigurable modeling approach for digital twin-based manufacturing system. *Procedia Cirp*, 83, 118–125.