

Modelagem Ontológica para Gestão de Soluções Nutritivas em Cultivos Hidropônicos

José B. S. Santos¹, Livia C. S. Nascimento²,
Jean S. Souza², Renata I. S. Pereira³

¹Instituto de Informática – Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS)
Caixa Postal 15.064 – 91.501-970 – Porto Alegre – RS – Brazil

²Campus Arapiraca – Universidade Federal de Alagoas (UFAL)
Avenida Manoel Severino Barbosa – Bom Sucesso – Arapiraca – AL – Brazil

³Campus Arapiraca – Instituto Federal de Alagoas (IFAL)
Rodovia AL 110 – Deputado Nezinho – Arapiraca – AL – Brazil

josebruno.santos@inf.ufrgs.br, livia.nascimento@arapiraca.ufal.br,
jean.souza@arapiraca.ufal.br, renata.pereira@ifal.edu.br

Resumo. O cultivo hidropônico envolve o cultivo de plantas sem o uso de solo, mantendo suas raízes imersas em soluções nutritivas com água e fertilizantes. O monitoramento do pH e da Condutividade Elétrica (EC) é essencial em cada ciclo de produção de solução para garantir a disponibilidade adequada de nutrientes. Este trabalho propõe o desenvolvimento de uma ontologia para gerenciar a produção da solução nutritiva para cultivos hidropônicos. O sistema que gerencia a produção é composto por sensores e atuadores, denominados Industrial Assets, que são controlados por dispositivos IoT. A ontologia busca assegurar a interoperabilidade e uma representação clara da estrutura física do sistema, facilitando replicações.

Abstract. Hydroponic cultivation involves growing plants without soil, keeping their roots immersed in nutrient solutions made with water and fertilizers. Monitoring pH and Electrical Conductivity (EC) is essential in each solution production cycle to ensure adequate nutrient availability. This work proposes the development of an ontology to manage the production of nutrient solutions for hydroponic cultivation. The system managing the production consists of sensors and actuators, referred to as Industrial Assets, which are controlled by IoT devices. The ontology seeks to ensure system interoperability and provide a clear representation of the system's physical structure, facilitating replications.

1. Introdução

A hidroponia, um método de cultivo sem solo, utiliza soluções nutritivas formuladas especificamente para cada tipo de planta, conforme Resh (2022). Essa técnica otimiza o uso de recursos e possibilita a produção em áreas que seriam, de outra forma, inadequadas para o cultivo tradicional. O sucesso da hidroponia está intrinsecamente ligado ao controle rigoroso de parâmetros essenciais da solução nutritiva, como o pH e a Condutividade Elétrica (EC). Esses parâmetros são cruciais para assegurar que as plantas recebam a quantidade exata de nutrientes necessários, prevenindo tanto a deficiência quanto o excesso.

A automação e o monitoramento desses processos têm sido amplamente facilitados pela integração de sensores e atuadores em sistemas de Internet das Coisas (IoT). No entanto, a heterogeneidade de dispositivos e protocolos de comunicação inerente a esses sistemas cria desafios significativos para a interoperabilidade e a gestão eficiente. Diante desse cenário, este trabalho propõe o desenvolvimento de uma ontologia. Essa ontologia visa gerenciar a produção de soluções nutritivas em cultivos hidropônicos, promovendo a integração otimizada e a reutilização do sistema.

Visando superar esse tipo de desafio, este trabalho propõe o desenvolvimento de uma ontologia de domínio específica para o gerenciamento da produção de soluções nutritivas para o plantio de culturas hidropônicas. Uma ontologia pode ser descrita como uma especificação formal de uma conceituação compartilhada [Gómez-Pérez *et al.*, 2004]. A ontologia tem como objetivo assegurar a interoperabilidade entre os diversos componentes do sistema hidropônico, permitindo a integração otimizada dos recursos.

2. Fundamentação Teórica

Esta seção introduz os conceitos fundamentais e a terminologia essencial para a compreensão deste estudo.

2.1 Noções básicas de ontologia

O termo Ontologia foi introduzido inicialmente dentro da Filosofia, sendo o ramo que estuda a natureza e o que chamamos de realidade. Isso foi idealizado e descrito por Aristóteles, no século IV a.C, em *Metaphysics* como a “*Ciência do ser enquanto ser*” [Guarino 2009].

A primeira menção ao termo ontologia no contexto computacional surgiu em 1967 por G.H. Mealy, na área de processamento de dados, em sua proposta de modelo de dados e processamento [Mealy 1967]. A partir daí o termo passou a ser utilizado amplamente em várias áreas, como Engenharia de Software (SE), Sistemas de Informação (SI), Inteligência Artificial (IA) e Web Semântica (WS), porém de formas distintas e com diferentes objetivos. Sendo para ES e SI, ontologias são comumente utilizadas de acordo com o significado filosófico, ou seja, como um sistema de categorias independente de linguagem.

É uma representação estruturada e formal do conhecimento que captura as relações entre vários conceitos em um domínio específico. Serve como uma ferramenta para organizar informações, facilitar a comunicação e permitir que sistemas inteligentes raciocinem e interpretem dados. Define um vocabulário compartilhado de termos e conceitos, juntamente com as relações e regras que regem a sua utilização e interação [Gómez-Pérez *et al.*, 2004]. Ao estabelecer um entendimento comum sobre o domínio semântico, fornece uma base para o compartilhamento de conhecimento, tomada de decisão e solução de problemas em sistemas complexos.

Uma ontologia é composta por classes, relações e regras lógicas [Gómez-Pérez *et al.*, 2004]. As classes categorizam uma entidade enquanto relações especificam como essas entidades se relacionam entre si. As regras lógicas podem ser aplicadas para realizar a razão sobre um conhecimento estruturado. A organização de entidades em classes é uma parte importante da representação do conhecimento, assim servindo não

apenas para categorizar as entidades, mas também para fazer previsões quando uma entidade é classificada [Russell e Norving 2010].

Ontologias podem ser classificadas em quatro tipos diferentes de acordo com [Guarino 1998], sendo elas: ontologias de topo, ontologias de tarefa, ontologias de domínio e ontologias de aplicação. Ontologias de topo são também chamadas de ontologias de fundamentação, recebem este nome porque visam, independentemente da aplicação (domínio), representar conceitos gerais de entidades, eventos e alguns tipos de relacionamento entre eles. Enquanto ontologias de tarefa e domínio especializam ontologias de topo fornecendo vocabulário sobre uma tarefa ou campo específico a ser modelado. Ontologias de aplicação, no entanto, combinam características tanto de ontologias de domínio quanto de tarefas.

2.2 Ontologia Formal Básica

A Ontologia Formal Básica (BFO) é uma ontologia de topo desenvolvida inicialmente para uso em domínios científicos como biomedicina [Spear *et al.*, 2016], projetada para apoiar a recuperação, análise e integração de informações que podem ser utilizadas em diversos domínios científicos. A BFO divide a realidade em duas categorias principais: continuantes (Figura 1) e ocorrentes (Figura 2).

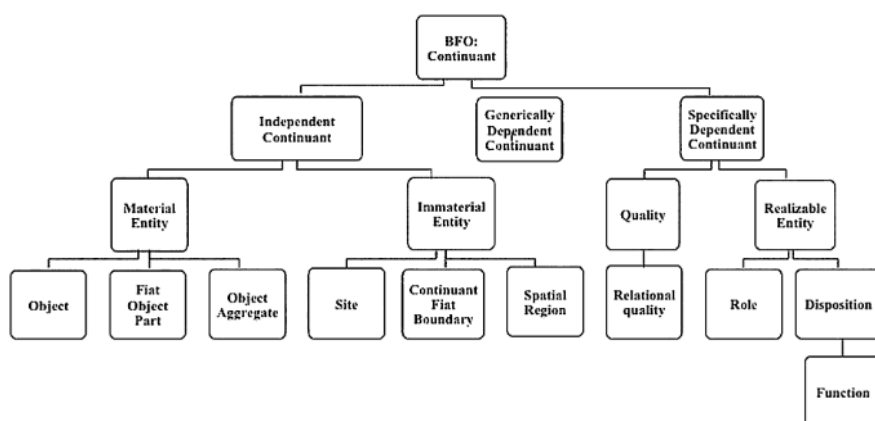


Figura 1. Continuantes universais na Ontologia Formal Básica. Fonte: Spear *et al.*, (2016).

Continuantes são entidades que persistem ao longo do tempo, como objetos, qualidades e funções. Já as ocorrentes são eventos ou acontecimentos nos quais os continuantes participam. Essa distinção é fundamental para a compreensão e integração de como as entidades existem e interagem ao longo do tempo.

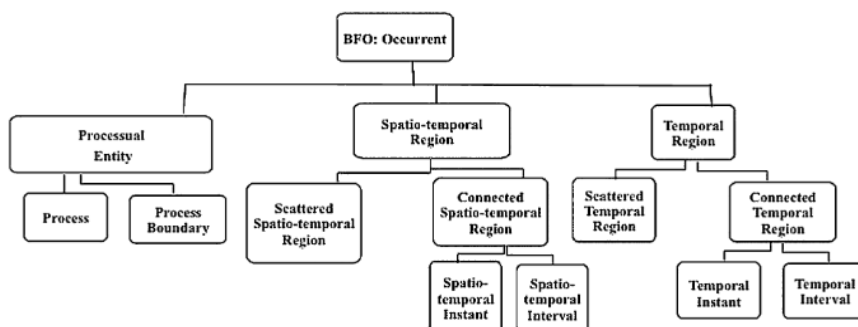


Figura 2. Ocorrentes universais na Ontologia Formal Básica. Fonte: Spear *et al.*, (2016).

A BFO oferece uma estrutura robusta para a análise em diversos contextos, permitindo uma compreensão mais rica das interações entre as entidades e suas capacidades. Ela foi projetada para ser consistente e sucinta, com um conjunto limitado de categorias superiores que podem ser aplicadas em diferentes domínios, isso facilita a interoperabilidade entre as ontologias de domínio, permitindo que os dados de diferentes fontes sejam integrados de maneira uniforme, assim se tornando fundamental em garantir a precisão e a relevância das ontologias desenvolvidas com base na BFO.

3. Domínio de aplicação

O cultivo hidropônico é uma técnica agrícola que permite o crescimento de plantas sem a utilização do solo, mantendo as raízes imersas em soluções nutritivas que fornecem nutrientes essenciais para o desenvolvimento das plantas [Resh 2022]. Este método apresenta várias vantagens, como o uso eficiente da água e nutrientes, maior controle sobre as condições de crescimento e a possibilidade de cultivo em ambientes onde o solo é inadequado.

A produção dessas soluções envolve a mistura de água com fertilizantes específicos, sendo crucial o monitoramento constante do pH e da condutividade elétrica (EC) para garantir a disponibilidade adequada de nutrientes [Jones 2014]. O pH influencia a disponibilidade de nutrientes para as plantas, enquanto a CE indica a concentração de nutrientes na solução.

A gestão eficiente das soluções nutritivas é fundamental para o sucesso do cultivo hidropônico. Sistemas baseados em Internet das Coisas (IoT) têm sido amplamente implementados para otimizar esse processo, utilizando sensores e atuadores, conhecidos como ativos industriais, para monitorar e controlar parâmetros como pH, CE e temperatura [Gutiérrez *et al.*, 2013]. Esses dispositivos de IoT podem suportar vários protocolos de comunicação interoperáveis, comunicando-se com outros dispositivos e também com a infraestrutura. [Ray 2018].

Este trabalho propõe o desenvolvimento de uma ontologia para gerenciar a produção de soluções nutritivas no cultivo hidropônico através do uso de ontologias, facilitando a interoperabilidade entre os componentes do sistema e proporcionando uma representação clara da estrutura física dos processos envolvidos. A ontologia proposta visa melhorar a eficiência da gestão das soluções nutritivas e facilitar a replicação do sistema em diferentes contextos.

4. Estudo de caso

O caso de uso escolhido é do domínio agrícola e químico, disponível na Universidade Los Andes, na Colômbia, apresentado em [Pereira 2022].

O estudo de caso refere-se ao processo de produção de uma solução nutritiva para agricultura sem solo, por exemplo, técnicas agrícolas hidropônicas. Esta técnica de cultivo é conhecida por cultivar plantas em meio inerte utilizando uma solução de fertilizantes minerais dissolvidos em água. Baseia-se em diversas variáveis agronômicas e ambientais que devem ser geridas para maximizar o retorno dos fatores de produção e, ao mesmo tempo, conservar os recursos. Pode proporcionar uma produção alimentar intensiva em áreas limitadas com uma gestão de recursos mais eficiente, incluindo locais

não aráveis, como desertos e cidades. A cultura sem solo é vista como um instrumento viável para segurança alimentar, uma vez que são necessários novos sistemas agrícolas para satisfazer a procura alimentar e, ao mesmo tempo, reduzir os impactos ambientais da produção.

A bancada de testes utilizada para os módulos de solução nutricional (NSM) [Barbieri *et al.*, 2021], representada na Figura 3, é um sistema aberto de estoque duplo, o que significa que apenas o pH e a EC são controlados ao longo de todo o processo, em cada ciclo. Portanto, para cada irrigação é produzida uma nova solução. Vários sensores e atuadores são usados na bancada de testes: oito sensores de nível, um sensor de pH, um sensor de condutividade elétrica (EC), uma válvula, cinco bombas e um compressor de ar. Para que esses ativos tenham nomes padronizados compostos por um caractere e três dígitos numéricos, o caractere indica o tipo do ativo, como L para sensores de nível e P para bombas. O primeiro e o segundo dígitos numéricos representam a unidade de montagem e o tanque no qual ela está colocada. Por fim, o terceiro dígito é reservado para sensores de nível digital; o que especifica se o sensor é de alto nível (igual a zero) ou de baixo nível (definido como um).

O NSM consiste em dois subsistemas: unidade de filtração e unidade de preparação de receitas. A unidade de filtração é inicializada quando a válvula solenóide V110 é acionada, enchendo o tanque T110 com água da torneira. Quando ambos os sensores de nível do primeiro tanque são acionados, a bomba P110 fornece água para o filtro de osmose inversa F110 para reduzir seu teor de cloreto e SST. O subsistema é concluído quando o tanque T120 é enchido com água recém-filtrada. Na preparação da receita, o compressor de ar C200 agita os tanques de fertilizante T220 e T230 para evitar que os nutrientes concentrados se assentem. O ar também é entregue ao tanque de mistura T240 para misturar os nutrientes durante a preparação da solução.

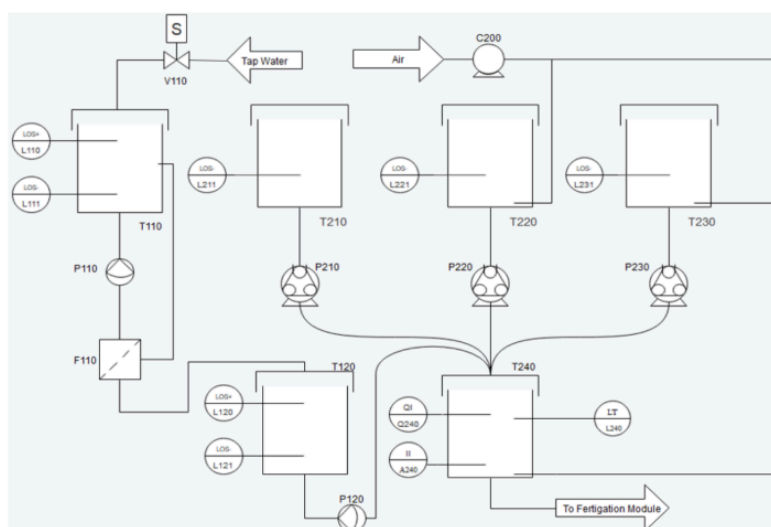


Figura 3. Diagrama de tubulação e instrumentação para módulo de solução nutritiva.

Fonte: Adaptado de [Barbieri *et al.*, 2021].

Nos tanques T210 (estoque ácido), T220 e T230 (estoque A e B), um sensor de baixo nível é instalado para alertar o operador quando o ácido e os nutrientes

concentrados precisam ser reabastecidos. Ácido e nutrientes são fornecidos através de bombas peristálticas P210, P220 e P230 para controlar o pH e a EC do fluido. Os dados da solução no tanque T240 são monitorados por três sensores, Q240, A240 e L240, que são usados para medir pH, EC e nível, respectivamente.

O diagrama da máquina de estados do NSM é mostrado na Figura 4. Os dois primeiros estados foram configurados para encher os dois primeiros tanques, T110 e T120. Em seguida, a água filtrada é enviada ao tanque misturador T240 para iniciar o preparo da solução. No entanto, os três tanques, T110, T120 e T240, devem ser enchidos para acelerar a produção ascendente da solução antes de continuar o processo. Devido à responsabilidade do módulo pela gestão de duas soluções nutritivas distintas, é fornecido um valor alvo específico de EC e pH, dependendo da amostra de plantas consideradas. Ao longo das fases subsequentes, o compressor de ar C200 estará ativo. Primeiramente, o valor EC será controlado; para isso, as bombas P220 e P230 serão acionadas até que o valor medido pelo sensor seja o configurado pelo operador.

O controle de pH será realizado no próximo estado, acionando a bomba P210 e bombeando o estoque de ácido para a solução. Após estabilizar a EC e o pH na faixa indicada pelo usuário, o C200 é desativado. Esse processo conclui um dos ciclos para que a solução nutritiva fique pronta e possa ser armazenada para uso futuro. O sistema pode iniciar um novo ciclo, mas agora a partir do estado "Enchimento do Tanque 240".

A automatização da produção da solução nutritiva é de suma importância para atingir os objetivos do sistema. Exige monitoramento contínuo de diversas variáveis do processo utilizando diferentes sensores e controle remoto para garantir a sequência adequada das etapas de produção descritas na máquina de estados. A utilização de dispositivos heterogêneos com sensores e atuadores específicos deverá permitir que o processo ocorra de forma autônoma e segura.

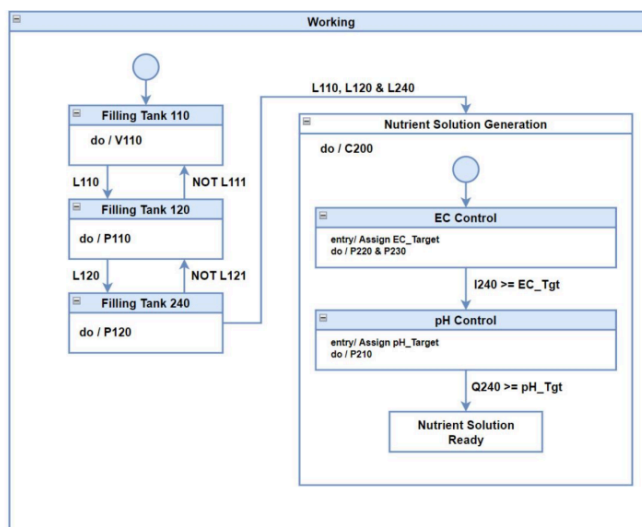


Figura 4. Diagrama de tubulação e instrumentação para módulo de solução nutritiva.

Fonte: Adaptado de [Barbieri et al., 2021].

Portanto, três dispositivos IoT são identificados no estudo de caso apresentado acima, cada um comunicando-se utilizando um protocolo de comunicação diferente. Os sensores e atuadores estão conectados a esses dispositivos. Conforme ilustrado na Figura 5, três grupos correspondentes a três protocolos de comunicação

diferentes (DDS, MQTT e OPC UA) podem ser identificados pelas cores laranja, azul e vermelho.

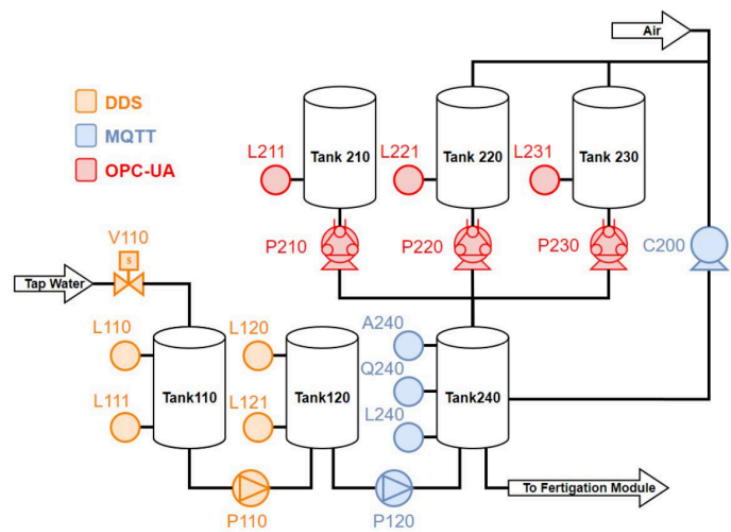


Figura 5. Agrupamento de ativos de caso de uso.
Fonte: Pereira (2022).

4. Resultado e Discussões

Esta seção tem como objetivo a apresentação da aplicação da modelagem da ontologia de topo BFO ao caso de uso desenvolvido para o domínio de culturas hidropônicas. A análise da aderência e coerência da ontologia frente aos requisitos apresentados no caso de uso estabelecido, como forma de validar sua eficácia na modelagem em seu domínio de aplicação.

O caso de uso proposto abrange a modelagem dos principais processos e entidades associadas à planta de produção da solução nutritiva, incluindo o sistema de formulação nutritiva e substratos. A Ontologia BFO foi utilizada para a categorização hierárquica e o estabelecimento de relações entre esses elementos. No mapeamento ontológico , conceitos fundamentais como entidades, processos e qualidades, foram utilizados para modelar os componentes essenciais do sistema de produção da solução nutritiva como apresentado na Tabela 1.

Tabela 1. Classificação do vocabulário alvo do domínio (Autores, 2025).

Tipo	Entidades
independent continuant	Fluid, LiquidFertilizerSolution, LiquidPhosphoricAcidSolution, Water, NutrientSolution, GatewayDevice, IoTDevices, Compressor, AirCompressor, Filter, InverseOsmosisFilter, Pump, Sensor, DigitalECSensor, DigitalLevelSensor, DigitalPHSensor, Tank, Valve, SolenoidValve, NutrientSolutionModule.
specifically dependent continuant	Filters, Pumps, Sensing, EC, Level, PH.
scale (Outside BFO)	BinaryScale, PotentialOfHydrogen.
generically dependent continuant	CommunicationProtocol, DDS, MQTT, OPCUA, Message, SensorData, LevelData, PHSensorData, SensorDataStructure.
relation	formatted_according, stores, communicates.
process	Message_Exchange, ECMeasure, LevelMeasure, PHMeasure, MeasuredValue.

‘ A consistência interna da ontologia foi avaliada com base na capacidade de modelar de forma não ambígua as interações entre as entidades materiais. A coerência da ontologia foi particularmente evidenciada através da categorização das entidades e processos que corresponde ao grafo conceitual da ontologia. A análise da cobertura da BFO aos requisitos específicos mostrou-se abrangente e eficaz para os aspectos do domínio. Os requisitos incluíam a necessidade de uma modelagem dos processos utilizados na planta de produção da solução nutritiva para o fornecido um valor alvo específico de EC e pH.

Para ilustrar a aplicação da ontologia proposta, foi utilizado o raciocinador HermiT 1.4.2.456. O processo completo de execução do raciocinador levou aproximadamente 21 minutos e não revelou nenhuma inconsistência, conforme mostrado na Figura 6.

O raciocinador conseguiu inferir corretamente as relações que não foram explicitamente definidas nas instâncias. Um exemplo disso é a instância C200, referente ao compressor de ar, como ilustrado na Figura 7. A instância possuía apenas a relação feedsFluidTo. No entanto, como essa relação é uma subpropriedade de outras relações, estas foram inferidas e adicionadas aos atributos.

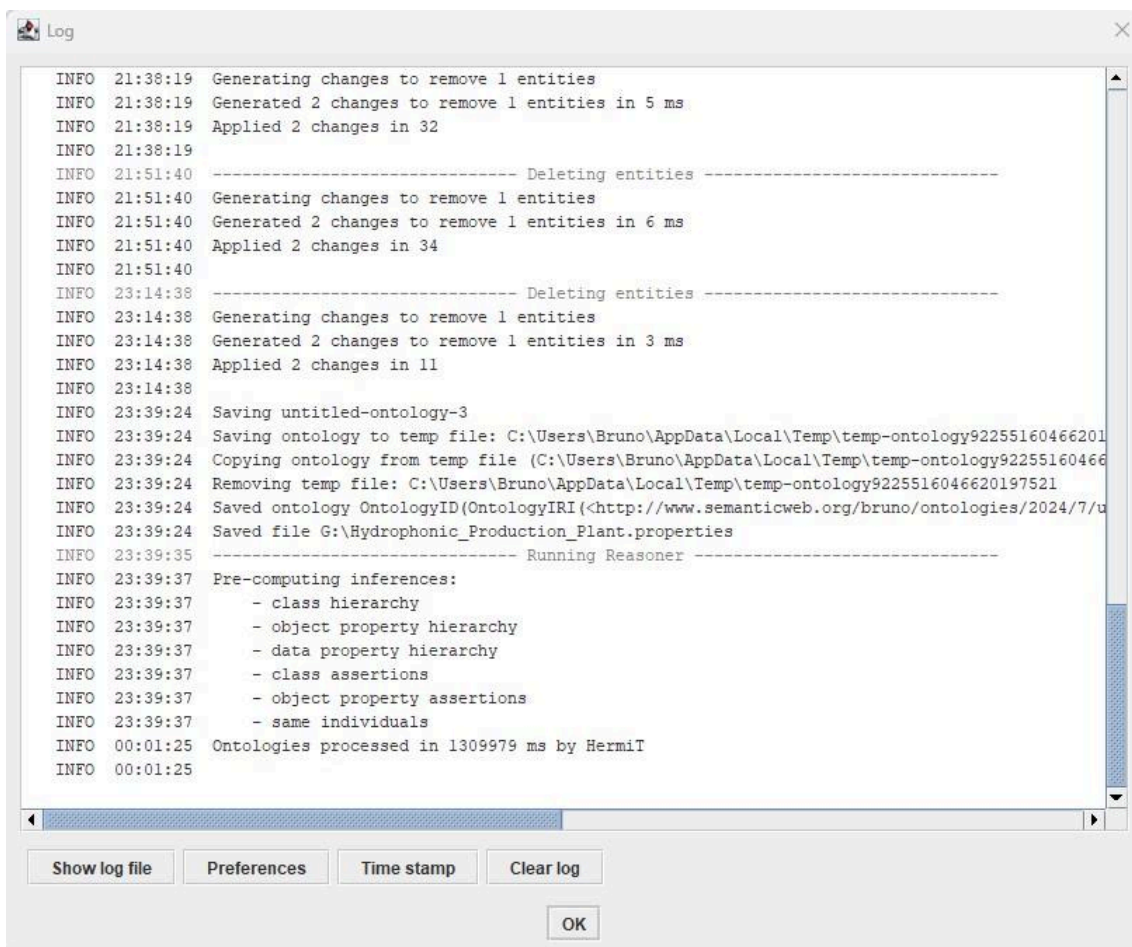


Figura 6. Log da execução do HermiT sobre a ontologia (Autores, 2025).

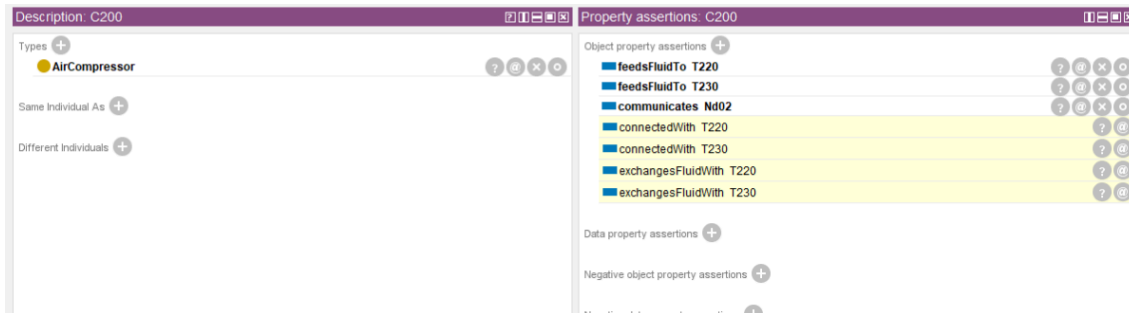


Figura 7. Relações inferidas do compressor C200 (Autores, 2025).

Os resultados obtidos indicam que a ontologia BFO é eficaz na modelagem do domínio, demonstrando alta coerência e aderência aos requisitos estabelecidos. A ontologia é capaz de modelar eficientemente diferentes domínios trazendo cobertura semântica aos dados através da modelagem das entidades e suas relações, facilitando a compreensão dos acontecimentos no domínio.

Entretanto, o processo de aplicação da BFO também revelou algumas limitações, na camada semântica, por isso a necessidade de utilização de ontologias complementares via importação como por exemplo a ontologia IAO para a representação de artefatos informacionais relacionados a entidades físicas presentes na modelagem. Esse aspecto sugere que, embora a BFO forneça uma estrutura sólida para modelagem, ela pode exigir refinamentos para alcançar uma representatividade ainda mais precisa em domínios específicos.

5. Conclusão

Este estudo evidenciou a eficácia da aplicação da Ontologia Formal Básica (BFO) no domínio de soluções nutritivas para o cultivo hidropônico, demonstrando sua capacidade de fornecer uma modelagem estruturada e coerente para processos complexos. A ontologia proposta permitiu a categorização precisa das entidades e a representação das interações entre os componentes essenciais do sistema, assegurando uma cobertura abrangente e semântica dos dados.

Os resultados obtidos validam a viabilidade da BFO como uma ferramenta robusta para a organização e o raciocínio sobre o conhecimento em sistemas hidropônicos. A capacidade da ontologia em inferir relações não explicitamente definidas destaca sua utilidade na automação e otimização de processos agrícolas, contribuindo para a eficiência da gestão de recursos e para a segurança alimentar em contextos onde o solo é inadequado para o cultivo tradicional.

Entretanto, o estudo também revelou limitações inerentes à BFO, especialmente na camada semântica, que pode requerer a importação de ontologias complementares, como a IAO, para uma representação mais detalhada de artefatos informacionais. Esse achado sugere que, embora a BFO forneça uma base sólida para a modelagem de domínios científicos, sua aplicação em cenários específicos pode exigir ajustes adicionais para capturar a totalidade das nuances presentes no domínio de aplicação.

6. Referências

- Barbieri, G., Quintero, G., Cerrato, O., Otero, J., Zanger, D. & Mejia, A. (2021). A mathematical model to enable the virtual commissioning simulation of wick soilless cultivations. *J. Eng. Sci. Technol*, 16 (4), 3325-3342.
- Guarino, N., Oberle, D., & Staab, S. (2009). What is an ontology? In *Handbook on ontologies* (pp. 1–17). Springer.
- Gómez-Pérez, A., Fernández-López, M., & Corcho, O. (2004). *Ontological Engineering*. In Springer eBooks. Springer Nature. <https://doi.org/10.1007/b97353>
- Guarino, N. (Ed.). (1998). *Formal ontology in information systems: Proceedings of the first international conference (FOIS'98)*, June 6-8, Trento, Italy (Vol. 46). IOS Press.
- Guizzardi, G. (2005). *Ontological foundations for structural conceptual models*.
- Gutiérrez, J., Villa-Medina, J. F., Nieto-Garibay, A., & Porta-Gándara, M. Á. (2013). Automated irrigation system using a wireless sensor network and GPRS module. *IEEE transactions on instrumentation and measurement*, 63(1), 166-176.
- Jones Jr, J. B. (2014). *Complete guide for growing plants hydroponically*. CRC Press.
- Mealy, G. H. (1967). Another look at data. In *Proceedings of the November 14-16, 1967, Fall Joint Computer Conference* (pp. 525–534).
- Pereira, P. H. M. (2022). *Interoperability middleware for IIoT gateways based on international standard ontologies and standardized digital representation*.
- Ray, P. P. (2018). A survey on Internet of Things architectures. *Journal of King Saud University-Computer and Information Sciences*, 30(3), 291-319.
- Resh, H. M. (2022). *Hydroponic food production: a definitive guidebook for the advanced home gardener and the commercial hydroponic grower*. CRC press.
- Russell, S. J., & Norvig, P. (2010). *Artificial intelligence: a modern approach*. Pearson. Prentice Hall, 3 edition.
- Spear, A. D., Ceusters, W., & Smith, B. (2016). Functions in basic formal ontology. *Applied Ontology*, 11(2), 103-128.