



ConBRepro

XIII CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO



IA nas Engenharias

29 nov. a 01 de dezembro 2023

Diretrizes de um Sistema Inteligente para Predição de Custo em Processos de Manufatura de Peças de Chapas Metálicas na Indústria Aeroespacial

Matheus Herman Bernardim Andrade

Departamento de Engenharia de Computação - Pontifícia Universidade Católica do Paraná

Leonardo Cavalcanti Hernandes

Departamento de Engenharia Mecatrônica - Pontifícia Universidade Católica do Paraná

Anderson Luis Szejka

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas (PPGEPS) - Pontifícia Universidade Católica do Paraná

Resumo: A indústria aeroespacial é altamente complexa, envolvendo engenheiros de diferentes nacionalidades em projetos de aeronaves, criando um ambiente desafiador e repleto de variáveis. Gerenciar informações e conhecimentos ao longo do ciclo de vida do produto é essencial, porém complexo, devido à falta de padronização e à heterogeneidade de informações, o que resulta em interpretações equivocadas e erros durante o desenvolvimento e fabricação de peças aeroespaciais, gerando custos substanciais. Além disso, como exemplificação de uma área de aplicação, o processo de cotação de novas peças é demorado e suscetível a erros, contribuindo para despesas elevadas e consumo de tempo de engenharia devido à falta de eficiência em sistemas tradicionais como o PLM. Para superar esses desafios, este artigo propõe a criação de um sistema inteligente que automatiza o cálculo de custos de fabricação de peças complexas com base em variáveis relevantes. Essa solução agiliza o processo de cotação, melhora a precisão e reduz erros, tornando a indústria mais competitiva. A aplicação de Sistemas de Manufatura Inteligentes (SMIs) é crucial para alcançar essa eficiência.

Palavras-chave: Indústria Aeroespacial, Ontologia, Predição de Custos, Sistemas de Manufatura Inteligentes.

Towards an Intelligent System for Cost Prediction in Aerospace Sheet Metal Parts Manufacturing Processes

Abstract: The aerospace industry is highly complex, involving engineers from different nationalities in aircraft projects, creating a challenging environment full of variables. Managing information and knowledge throughout the product life cycle is essential, but complex, due to the lack of standardization and the heterogeneity of information, which results in misinterpretations and errors during the development and manufacture of aerospace parts, generating substantial costs. Furthermore, as an example of an application area, the process of quoting for new parts is time-

consuming and prone to errors, contributing to high expenses and the consumption of engineering time due to the lack of efficiency in traditional systems such as PLM. To overcome these challenges, this article proposes the creation of an intelligent system that automates the calculation of manufacturing costs for complex parts based on relevant variables. This solution speeds up the quotation process, improves accuracy and reduces errors, making the industry more competitive. The application of Intelligent Manufacturing Systems (IMSs) is crucial to achieving this efficiency.

Keywords: Aerospace Industry, Ontology, Cost Prediction, Intelligent Manufacturing Systems.

1. Introdução

A indústria aeroespacial é caracterizada por sua complexidade e sofisticação, onde o projeto e fabricação de aeronaves demandam a colaboração de engenheiros de diferentes nacionalidades localizados em diversos países, tornando a indústria em si uma ciência complexa com uma diversidade de variáveis a serem observadas dentro dos processos de desenvolvimento, projeto e manufatura das peças e partes de uma aeronave (ETTAIBI, 2021). Esses engenheiros precisam compartilhar informações e conhecimentos sobre uma variedade de componentes ao longo de diferentes fases do processo de desenvolvimento do produto e do planejamento de fabricação (MAS *et al.*, 2021). Além disso, a indústria de manufatura tem enfrentado desafios para racionalizar diferentes formas de lançar novos produtos no mercado em um curto espaço de tempo, com preços competitivos, garantindo ao mesmo tempo níveis mais altos de qualidade e personalização. (SZEJKA, 2016).

A informação e o conhecimento de Design de Produto e Manufatura gerenciados ao longo das diferentes fases do ciclo de vida precisam de comunicação eficiente em sistemas de Gerenciamento do Ciclo de Vida do Produto (PLM) modernos, que sejam interoperáveis e colaborativos (BRUNNERMEIER; MARTIN, 2002). Neste contexto, a busca por eficiência na gestão de informações torna-se fundamental, uma vez que a complexidade dos projetos e a variedade de componentes envolvidos podem levar a interpretações errôneas e erros que impactam negativamente na produtividade e nos custos, uma vez que as abordagens tradicionais, como o PLM, muitas vezes são prejudicadas pela falta de clareza e pela existência de múltiplas taxonomias e estruturas a serem utilizadas por diferentes profissionais envolvidos no processo de fabricação, gerando assim problemas entorno do processo de cotação, precificação e produção das peças, o que por sua vez, gera custos para a empresa que produz a aeronave. (SKRZEK *et al.*, 2023)

Neste contexto, a aplicação de sistemas de manufatura inteligentes torna-se crucial para superar esses desafios. Tais sistemas podem automatizar e agilizar o processo de cotação, fornecendo uma abordagem mais consistente e precisa para calcular os custos de fabricação de peças complexas. Ao reduzir erros e melhorar a eficiência, esses sistemas contribuem para a economia de recursos e para a competitividade da empresa no mercado aeroespacial, minimizando os custos, visto que resolver esse problema é um fator econômico importante para muitas indústrias globalmente distribuídas, uma vez que o Design de Produto e a Manufatura impactam em 85% do custo do produto (ROZENFELD *et al.*, 2006).

Sistemas de Manufatura Inteligentes (SMIs) podem ser caracterizados como sistemas de manufatura que operam em tempo real, de forma plenamente integrada e colaborativa, para atender às demandas dinâmicas da indústria, abrangendo as diversas necessidades dos clientes. No entanto, para que os sistemas de manufatura alcancem plena integração e colaboração, é essencial estabelecer uma comunicação completa e eficaz entre diversos sistemas (ZHENG *et al.*, 2018). A aplicação de conceitos da Indústria 4.0 tem sido uma estratégia empregada para promover o aprimoramento dos processos de manufatura da indústria aeroespacial.

Nesse contexto, este artigo propõe a concepção da criação de um sistema inteligente para apoiar o processo de obtenção do custo de fabricação de peças complexas com base em variáveis relevantes. Este sistema automatizado contribui para o desenvolvimento de uma ferramenta que auxilia na cotação de peças aplicadas à indústria aeroespacial, a qual envolve a pesquisa e desenvolvimento em diferentes áreas dentro do âmbito desta pesquisa como por exemplo a formalização e representação do conhecimento por meio do uso de ontologias, o entendimento e extração de informações de modelos 3D para peças e a precificação de peças dentro da indústria aeronáutica.

O presente artigo está estruturado em 5 seções. (I) A seção de introdução explora e descreve o amplo escopo do trabalho atual. (II) A seção seguinte apresenta o referencial teórico, abordando os principais conceitos que servem como base para o desenvolvimento da solução proposta. (III) A seção de metodologia apresenta os métodos e materiais a serem utilizados para o desenvolvimento da solução. (IV) A seção de resultados apresenta a solução do sistema implementado juntamente com a explicação de sua aplicação em um caso experimental. (V) A seção de discussões disserta sobre as possíveis mudanças a serem implementadas bem como recomendação para trabalhos futuros.

2. Referencial Teórico

Nesta seção serão apresentados conteúdos e pesquisas anteriores que moldam e contextualizam o estudo atual, visto que oferecem uma base para o desenvolvimento.

2.1 Digital Twin

O Digital Twin (DT) ou Gêmeo Digital em português, é definido como uma chave fundamental para a transformação digital na manufatura dentro da indústria 4.0. É um processo de replicação virtual de objetos ou processos reais com seus, funções e capacidades de comunicação para o mundo digital (ANDRADE *et al.*, 2023). O DT é usado dentro da produção, especialmente nos processos de modelagem, simulação e comissionamento virtual (JEON; SCHUESSLBAUER, 2020). Tal método permite a integração das diferentes fases do ciclo de vida do produto (PLM), com diferentes aplicações em cada uma, na fase de projeto, pode ajudar os engenheiros a gerenciar futuras alterações de forma mais rápida. Na fase de fabricação, permite a simulação e validação de questões relacionadas ao processo de produção com o próprio DT, além de otimizar o processo de produção (SEMERARO, 2021). Essa conexão com softwares de Gerenciamento do Ciclo de Vida do Produto (PLM) adiciona características importantes à ideia do DT: a consideração e a integração de dados e informações além dos modelos de simulação e o aspecto que abrange o ciclo de vida.

2.2 Reconhecimento de Características

No contexto do processo de design e modelagem de chapas metálicas aeroespaciais (ASM), uma "*feature*" (característica) pode ser definida como uma parte de um modelo geométrico que é significativa em pelo menos uma das fases do ciclo de vida do produto e que pode ser descrita por seus atributos. Portanto, as especificações de uma peça e as informações transmitidas por seu modelo que não são refletidas por sua geometria, como material, propriedades do material, cor e revestimento, não são *features*, mas sim as características da própria peça (GHAFFARISHAHRI; RIVEST, 2020). Neste contexto, "*feature*" é usada no sentido de atributo específico ou parte identificável de um modelo geométrico.

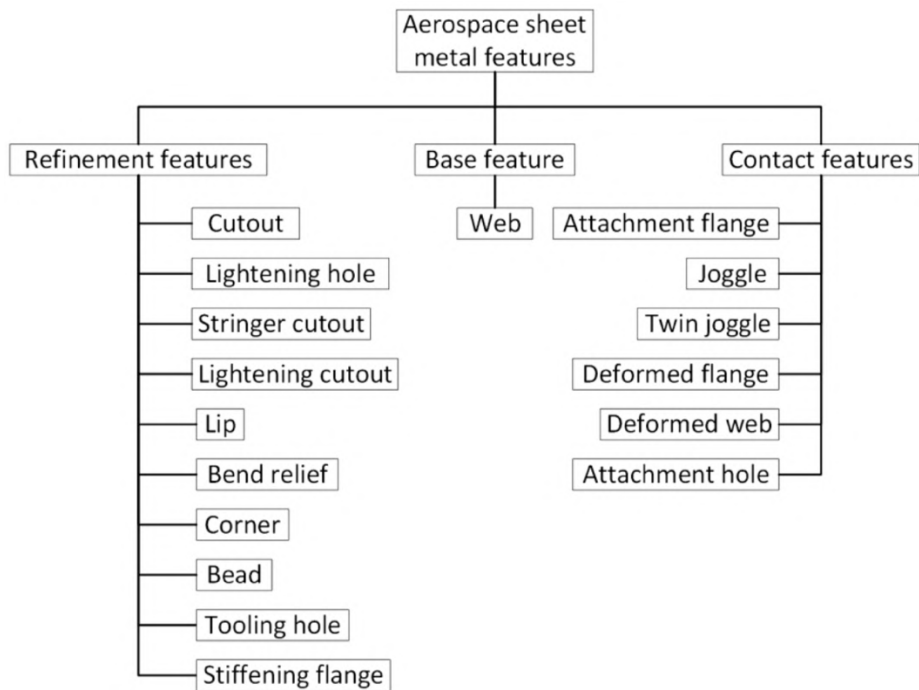
Uma *feature* pode ser definida com base em três atributos principais: sua geometria, suas relações com outras *features* e seus próprios parâmetros. Visando facilitar o entendimento usa-se o exemplo de um furo, em que sua geometria é determinada por suas faces, e sua

relação com sua “*feature* mãe” se dá por meio de arestas de conexão. Os parâmetros associados a este exemplo incluem sua localização, partindo de pontos cartesianos, e seu diâmetro, partindo de sua geometria. A geometria conecta características e sua Representação de Limites (*B-rep*), enquanto as relações de características fornecem insights sobre a estrutura de modelos geométricos (GHAFFARISHAHRI; RIVEST, 2020)

2.3 Classificação de Características

O estudo proposto por Ghaffarishahri (2021) analisou as características presentes nas peças de ASM, propondo uma taxonomia para classificação de tais características baseando-se no processo de fabricação de uma peça de chapa metálica aeroespacial. Neste contexto, as características das peças de ASM foram classificadas como características de base (*Base features*), características de acabamento (*Refinement features*) e características de contato (*Contact features*). A Figura 2 ilustra a taxonomia proposta para as características dos modelos de peças ASM.

Figura 2 – Taxonomia das características de ASM



Fonte: GHAFFARISHAHRI (2023)

As características de base, representadas pela “*web*”, que serve como a face principal sobre a qual outras características construídas ou modificadas, nesse caso a face da peça que será usada como base para fabricação das demais, a fim de proporcionar um contato sólido entre as peças que interagem. As características de contato, desempenham um papel fundamental como fixação e ajuste das peças, além de interação, garantindo um contato sólido entre elas. Essas características incluem elementos como “*attachment flanges*”, “*joggles*”, “*deformed flange*” e “*attachment hole*”. As características de refinamento têm como objetivo aprimorar as peças, seja para economia de peso, facilitar a passagem de elementos, reforçar a estrutura ou atender a fins de fabricação. Elas englobam elementos como *corner*, *bend relief*, *lightening hole*, *lightening cutout*, *cutout*, *stringer cutout*, *lip*, *bead*, *stiffening flange* and *tooling hole*.

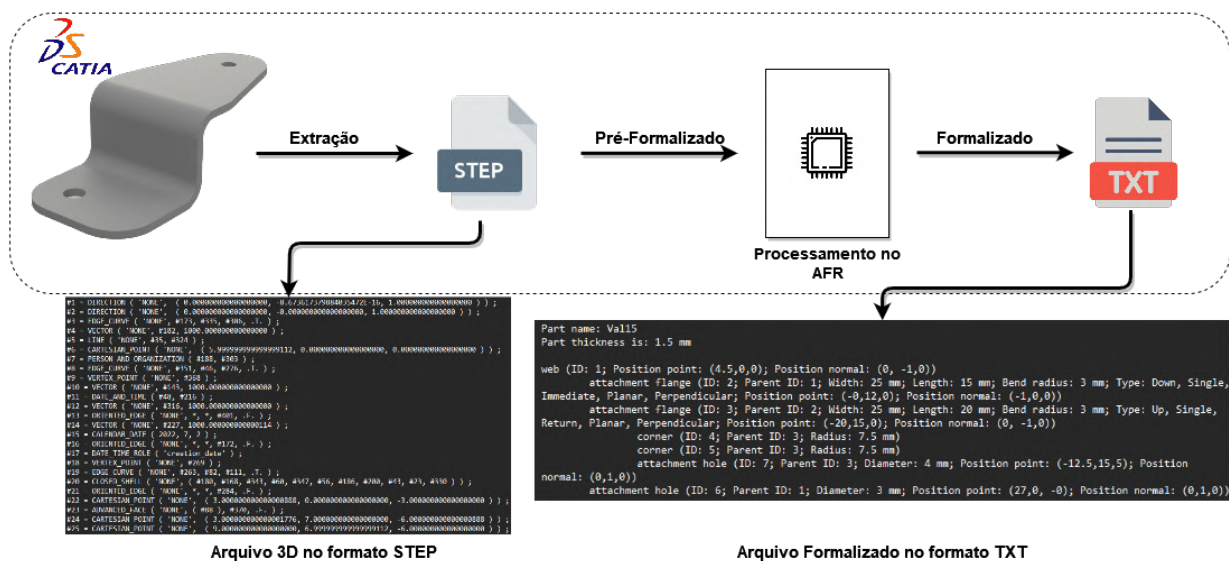
O estudo de Ghaffarishahri (2020) destaca que as relações de características são construídas com base na adjacência topológica, o que permite a identificação de padrões e identificação dos mesmos através da taxonomia. Além disso, os parâmetros de

características capturam a intenção de projeto ou semântica de engenharia e podem abranger informações numéricas ou não numéricas extraídas do modelo geométrico. Certas características podem apresentar diferentes tipos, como flanges curvas ou planas, e esses tipos são considerados parâmetros adicionais (GHAFFARISHAHRI; RIVEST, 2020).

2.4 Reconhecimento Automatizado de Características

A metodologia de Reconhecimento Automatizado de Características (RAC), conforme introduzida por Ghaffarishahri (2023), surge como uma ferramenta essencial com diversas aplicações no domínio do gerenciamento do ciclo de vida do produto. Sua função é de grande importância em tarefas críticas, tais como o planejamento de processos assistido por computador, recuperação de dados e identificação de disparidades em modelos. Especificamente, esta ferramenta tem desempenhado um papel central na identificação de características-chave em peças, baseando-se em uma análise de modelos 3D, especialmente aqueles relacionados a componentes de ASM. A relevância do AFR reside em sua versatilidade e no potencial de revolucionar diversos aspectos da engenharia e do design. Dentro do contexto da pesquisa, a ferramenta foi aplicada para identificar as características das peças, com base em modelos 3D, especialmente em peças de chapas metálicas usadas na aviação, permitindo que o algoritmo de programação desenvolvido aplique essas informações em cálculos relevantes quando necessário.

Figura 3 – Diagrama de Representação do RAC.



2.5 Ontologias

Além dos processos de ASM, outro pilar importante para a estruturação da solução proposta no presente trabalho são as ontologias, que podem ser definidas como uma representação formal e explícita de conceitos compartilhados, estabelecendo definições entre relações e classificações de conceitos dentro de um domínio específico de conhecimento através da similaridade semântica do que está modelado dentro dela, partindo de consultas baseadas em suas informações. (LAKZAEI; SHAMSFARD, 2021). Elas podem ser melhor descritas como ferramentas semânticas que realizam descrições formalizadas dos relacionamentos semânticos e taxinômicos que existem entre os conceitos e são designadas para garantirem o compartilhamento e a interoperabilidade por meio de linguagens formais padronizadas (S. LEMAIGNAN et. al., 2006). Em termos mais simples, uma ontologia é uma representação formal das relações que existem entre os elementos dentro de um determinado campo de conhecimento (LAMY JEAN-BAPTISTE,

2021), permitindo a integração com diversas ferramentas de software e tornando-se assim uma ferramenta eficaz para formalização e representação de conhecimentos.

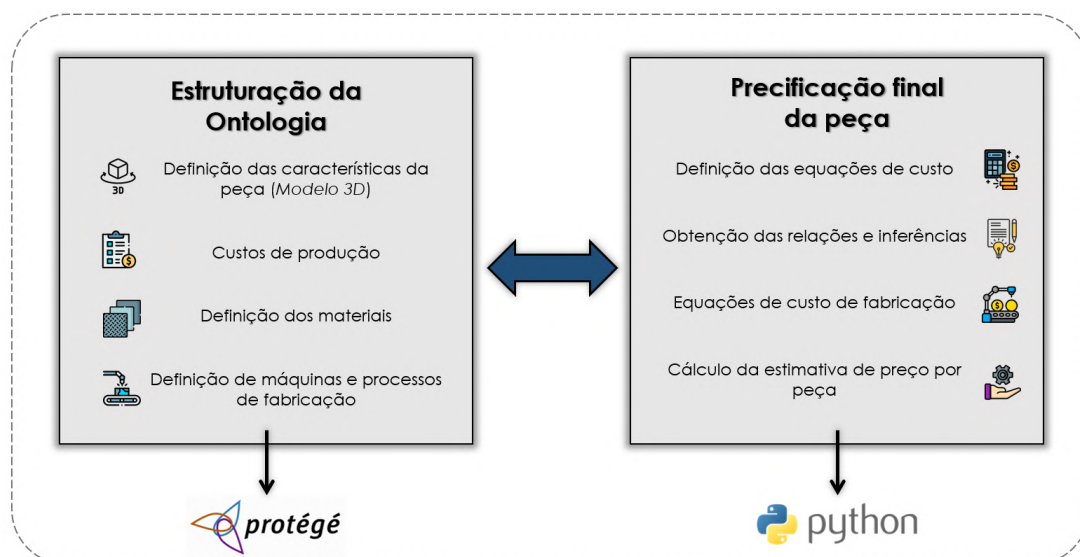
De acordo com Gruber T. R. (1994), é importantíssimo projetar ontologias formais para que ocorra o devido compartilhamento de conhecimento e interoperabilidade entre os programas a serem criados e, diante disto, ele propõe um conjunto de critérios de design para ontologias envolvendo: clareza, exigindo assim definições completas, objetivas e documentadas aplicando-se a linguagem natural; a coerência, demandando que a ontologia seja logicamente consistente; a extensibilidade, permitindo a acomodação de diversas extensões e aplicações não dependendo de alterações nas definições previamente existentes; um viés de codificação mínimo, visando minimizar a dependência de codificações específicas nos diferentes sistemas de representação; e um compromisso ontológico mínimo, com o objetivo de diminuir o número de afirmações possíveis sobre a modelagem feita. O principal papel destes critérios definidos é garantir que as ontologias sejam coerentes, eficazes, flexíveis e não imponham restrições desnecessárias para que a interoperabilidade e principalmente o compartilhamento de conhecimento entre sistemas baseados em ontologias seja mantido.

3. Metodologia

A concepção de um sistema inteligente de precificação de peças é um processo complexo e multifacetado, pois requer a coleta e análise de dados provenientes dos processos reais de manufatura, bem como a estruturação das diretrizes de precificação que pautam o processo produtivo de uma peça, entendendo o processo e suas etapas a fim de obter-se variáveis significativas para desenvolvimento da solução em questão. Essa abordagem visa aprimorar a precisão na determinação de custos de produção, permitindo que as empresas ajustem os preços das peças com base em informações em tempo real, através da adaptação dinâmica às mudanças no mercado e na estrutura de custos e, também, reduzindo os erros de cálculos e a necessidade de retrabalho no processo de precificação. Em última análise, a concepção de um sistema de precificação inteligente é uma estratégia crítica para melhorar a competitividade das empresas em um ambiente industrial em constante evolução.

Visando representar a aplicação de maneira mais intuitiva, foi desenvolvido uma arquitetura conceitual simples representada na Figura 4, ela apresenta a descrição das metas e objetivos propostos pelo presente trabalho, englobando os dois principais focos do presente desenvolvimento, sendo eles a estruturação da ontologia de base e como deve ser feita a precificação por meio da implementação de um programa.

Figura 4 – Arquitetura conceitual do Sistema Inteligente de Predição de Custos de Manufatura.



Para a modelagem e edição da ontologia o software a ser empregue é o *Protégé* e, para a criação das equações de precificações e integrações com outras formas de manipulação de dados será utilizada a linguagem de programação Python juntamente com a biblioteca *OwlReady2*, necessária para esta integração. Como foi brevemente descrito, para sintetizar a proposta de desenvolvimento da solução, a mesma envolve duas etapas principais:

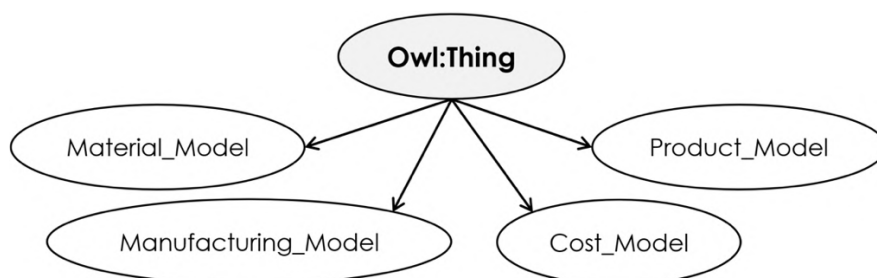
- A criação da ontologia central e suas devidas regras semânticas bem como uma validação por meio das inferências geradas;
- A integração desta ontologia, juntamente com as inferências obtidas, a operações que envolvam valores numéricos como precificação das peças, análise dos dados para predição, integração com inteligência artificial (IA) e aprendizagem de máquina por meio de uma linguagem de programação.

4. Discussão dos Resultados

Esta seção contém uma descrição dos resultados obtido pela pesquisa até o momento, envolvendo o início da estruturação ontológica do conhecimento, a definição de algumas regras de negócio para a obtenção do custo e também uma aplicação a uma peça exemplo para o sistema automatizado de precificação de peças desenvolvido. Ao final, há também uma breve discussão sobre integrações as quais a pesquisa pode ter em diferentes ramos da indústria e áreas de pesquisa, bem como exemplos de aplicações diversos.

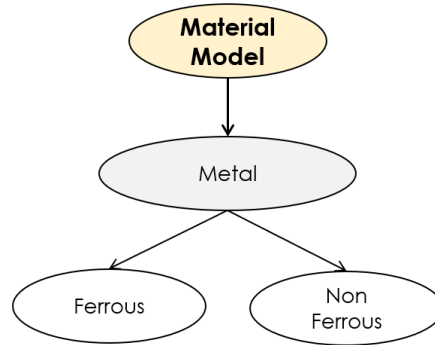
Diante do contexto a qual a pesquisa está inserida, este artigo visa conceber algumas diretrizes para viabilizar a concepção de um sistema inteligente de precificação de peças fabricadas em chapas metálicas para a indústria aeronáutica. Assim, como resultado principal deste processo de concepção do sistema, foi dado início ao desenvolvimento da ontologia central da pesquisa, que pode ser definida como um local onde deve ocorrer toda a formalização e representação do conhecimento dos assuntos e tópicos mais relevantes. Para que uma ontologia seja corretamente estruturada e modelada, faz-se necessário inserir as classes e, além disso, correlacioná-las por meio de propriedades de objeto e de dados. A partir disto, a ontologia implementada possui quatro classes principais: a classes dos custos gerais do processo (*Cost_model*), a classe das características gerais do produto e dados importantes do modelo 3D (*Product_Model*), a classe de referência dos materiais aplicáveis (*Material_Model*) e a classe com as referências de máquinas e processos de manufatura no setor aeronáutico (*Manufacturing_Model*).

Figura 5 – Ramos de aplicação da Ontologia



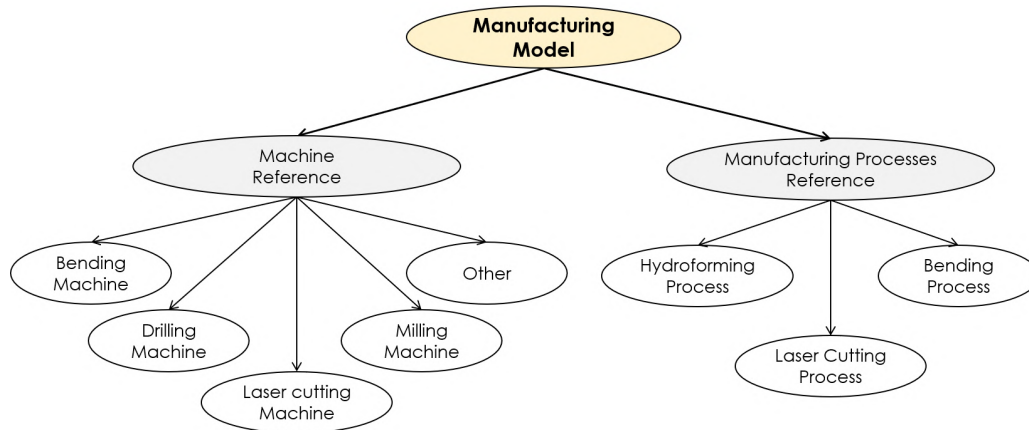
Com o patamar geral o contexto ontológico apresentado, mais detalhes de cada uma elas podem ser descritas. Assim, a primeira classe a ser apresentada é o Modelo de Materiais (*Material_Model*), que contempla a definição de materiais a serem manuseados para os diferentes tipos de processos de fabricação e aplicações. Este modelo possui, até o presente momento, a simples estruturação da classe dos metais, que estão divididos em metais “Ferrosos” e “Não ferrosos”.

Figura 6 – Classes da Ontologia de Modelo de Materiais



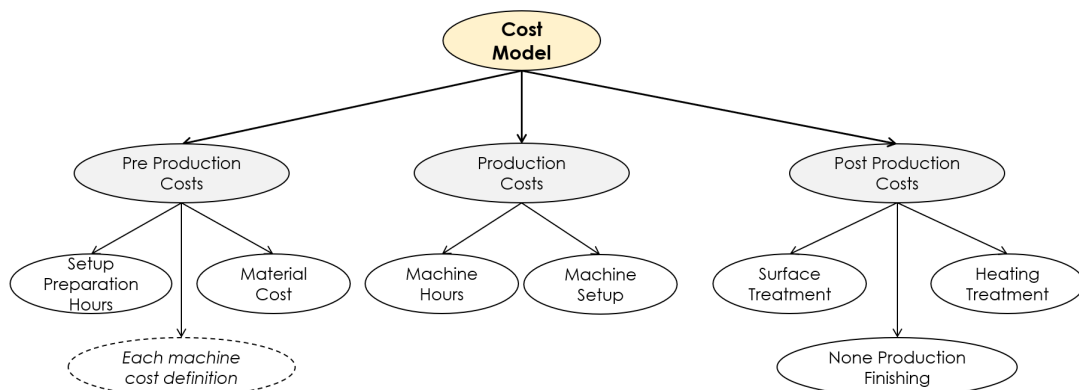
A segunda classe contempla o Modelo de Manufatura (*Manufacturing_Model*) e contém as características e referências das máquinas (*Machine_Reference*) e dos processos de manufatura principais para a indústria aeronáutica (*Manufacturing_Processes_Reference*). A referência de máquinas possui a definição de alguns processos como dobra, corte a laser, hidroconformação, estampagem, entre outros processos que se associam com a classe dos processos de fabricação.

Figura 7 – Classes da Ontologia de Modelo de Manufatura



Para a estruturação do Modelo de Custo (*Cost_Model*) foram divididos três grandes grupos de custos: os custos de pré-produção (*Pre_Production_Costs*), referentes aos custos de material, preparação de máquinas envolvidas no processo, custos de horas destas máquinas e outras despesas que precedem a manufatura; os custos de produção (*Production_Costs*) envolvem os custos da produção real da peça desejada; e por fim os custos pós-produção (*Post_Production_Costs*), definindo os processos de finalização e acabamento da peça como por exemplo tratamentos térmicos ou tratamentos de superfície.

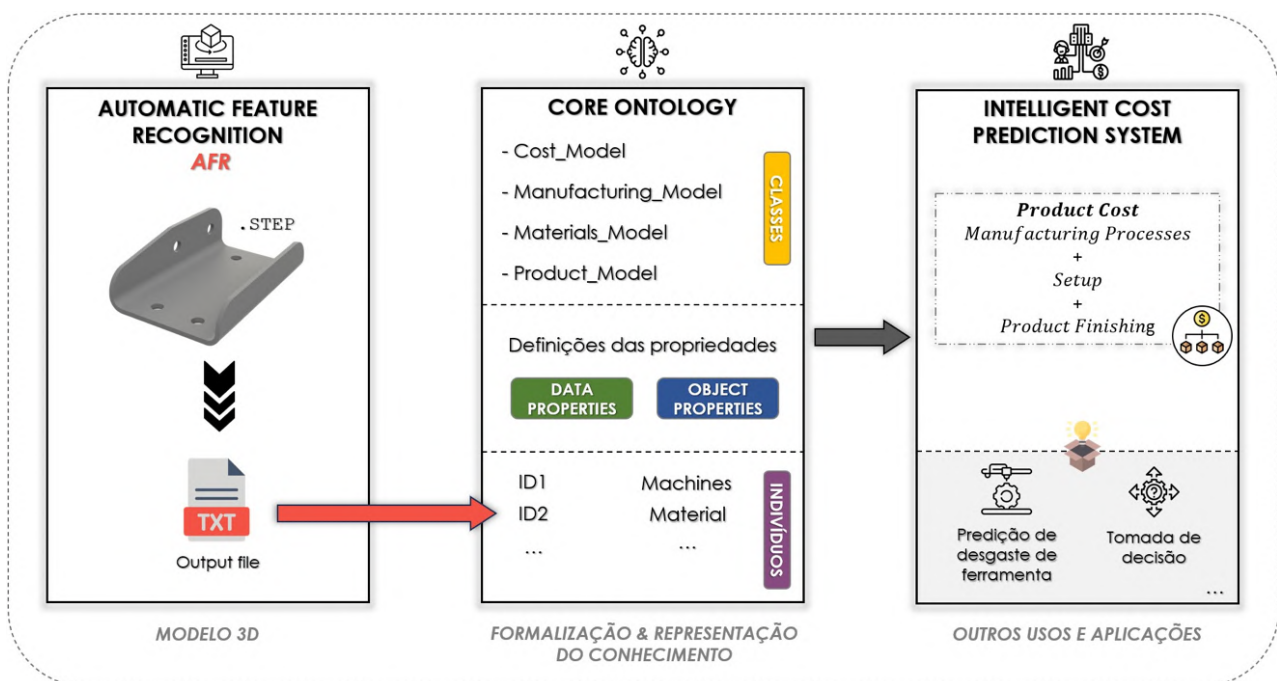
Figura 8 – Classes da Ontologia de Modelo de Custos



Finalmente, a última classe a ser melhor descrita é o Modelo de Produto (*Product_Model*), a qual possui dados importantes da peça a ser fabricada. Estas informações são separadas por informações gerais da peça (*Part_Information*) como o nome, espessura da chapa, área, perímetro e peso e as *features* da peça (*Part_features*), contemplando as informações das características da peça provenientes do software de extração AFR representado na Figura 2. A partir da definição da ontologia base, a qual servirá como fonte de informação formalizada para todas as aplicações da pesquisa, o outro pilar necessário para a criação do sistema inteligente é a integração com uma linguagem de programação, a qual deve realizar a integração deste depósito de conhecimento com valores e expressões numéricas para a viabilização de diversas ferramentas, entre elas, um sistema de precificação de peças. Esta integração é viabilizada pela biblioteca *Owlready2* da linguagem *Python*, onde é possível ter acesso a toda a estruturação de classes, definição de propriedade e outros componentes feitos dentro do *Protégé* e salvos no formato de arquivo OWL (*Web Ontology Language*).

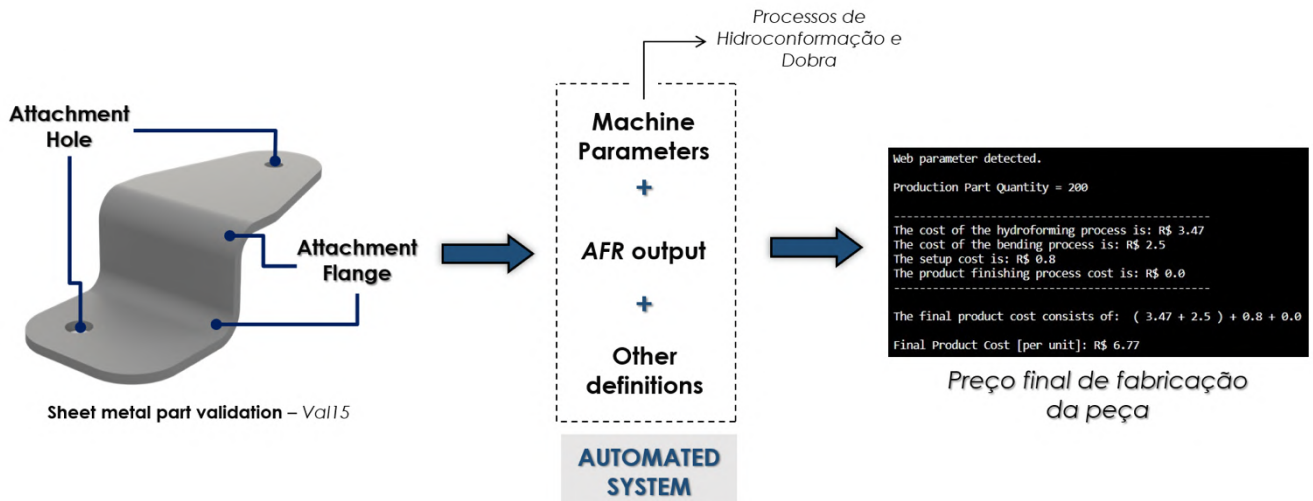
Uma vez que o processo de idealização de uma solução é um processo que contempla várias etapas até chegar ao objetivo final, o presente projeto também passou por isso e, para demonstrar algumas destas etapas, abaixo há uma demonstração de algumas evoluções do tema realizadas até o momento.

Figura 10 – Diagrama demonstrativo sobre as diferentes abordagens



Como pode-se observar, um dos desenvolvimentos feitos foi o sistema automatizado para o cálculo dos custos de fabricação, o qual viabiliza o preço final da peça conforme informações de quantidade, algumas especificações dos processos que a peça irá sofrer, definições de custos (de setup, horas máquinas, entre outros custos envolvidos) e finalização da peça. Para que as funcionalidades do sistema pudessem ser testadas, foi utilizado uma peça de teste contendo furos e dobras em sua estrutura e, a partir dela, as suas *features* foram obtidas e inseridas manualmente dentro da ontologia como forma de instâncias (também nomeadas de indivíduos) para que estas informações pudessem ser consumidas dentro do algoritmo. Neste programa havia definições de funções que acessam as informações da ontologia para, no final de todas as obtenções e cálculos necessários, prover ao usuário o custo final de produção da peça com base na quantidade desejada. Como forma de representação deste funcionamento, o diagrama abaixo demonstra a saída do programa ao usuário.

Figura 11 – Representação de custo do produto final



Além do sistema automatizado, também foi criado um outro algoritmo que recebe como entrada o arquivo .txt proveniente do *software* AFR descrito anteriormente. A tarefa principal desta implementação é percorrer o arquivo linha por linha e armazenar cada informação de maneira organizada e acessível para que, posteriormente, este dado seja consumido dentro da programação do sistema inteligente a ser concebido. O principal motivo da elaboração deste separador de informações é automatizar a inserção das características do modelo 3D dentro das instâncias da ontologia, fazendo com que somente as informações que realmente dependem de uma iteração com o usuário sejam inseridas de forma manual e, ao final disto, prover o custo final de manufatura da peça.

5. Conclusões

A automação do processo de precificação demonstrou um potencial sucesso por meio da implementação do sistema completo, incluindo a estruturação das informações e a aplicação de regras de negócios para determinar o custo. Nesse contexto, este artigo propôs uma abordagem para a precificação automatizada de peças aeronáuticas em diferentes processos de produção, através de uma ontologia que visa classificar os modelos baseando-se em suas características geométricas, e promover o detalhamento de custo para elas com base em alguns tipos de máquinas do processo produtivo. Isso abre caminho para a implementação inúmeras abordagens visando melhorar os processos entorno do ciclo de vida do produto, uma vez que a aplicação de sistemas de manufatura inteligentes demonstrou ser fundamental para automatizar o processo de cotação, reduzir erros e minimizar custos.

A abordagem foi experimentalmente testada em uma peça de chapa metálica de um avião e com limitados tipos de processos produtivos, obtendo resultados relevantes quanto à capacidade de classificação e de predição do custo com base nas informações obtidas. No entanto, essa abordagem deve ser avaliada em mais casos para medir os ganhos alcançados com a solução proposta, para isso, torna-se necessário o aprimoramento da ontologia de custos proposta, incorporando conceitos adicionais, e para otimizar o processo de precificação com uma maior quantidade de dados. O próximo passo é validar este método, aplicando a abordagem de ontologia a uma peça real do processo de ASM. Nesse processo, busca-se melhorar os parâmetros de cotação e reduzir o tempo de processamento. Além disso, pretende-se estender os estudos para abranger os processos de formação de peças ASM, desenvolvendo regras de negócios correspondentes. Isso permitirá uma compreensão mais abrangente e eficaz do processo de precificação de manufatura. A aplicação de sistemas de manufatura inteligentes se torna um elemento-

chave para viabilizar uma melhor eficiência e precisão da precificação na indústria aeroespacial, permitindo economia de recursos e a manutenção da competitividade em um setor complexo e globalizado.

6. Agradecimentos

Os autores agradecem especialmente o apoio financeiro da Pontifícia Universidade Católica do Paraná (PUCPR) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Industrial e de Sistemas (PPGEPS), do Programa Universidade Para Todos (PROUNI) e do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq - Brasil).

Referências

ANDRADE, M. H. B.; SZEJKA, A. L.; MAS, F. **Application of Models for manufacturing (MfM) methodology to Aerospace Sheet Metal Parts manufacturing**. 10th Manufacturing Engineering Society International Conference (MESIC 2023). **Anais...**Switzerland: Trans Tech Publications Ltd, 2023.

BRUNNERMEIER, S. B.; MARTIN, S. A. Interoperability costs in the US automotive supply chain. **Supply Chain Management: An International Journal**, v. 7, n. 2, p. 71–82, 2002.

ETTAIBI, M.; MOKHTARI, B. Integrative Digital Transformation and Organizational Competitiveness(OC): Proposal for a Transition Strategy to the Aeronautics Industry 4.0 (TSAI) based on a Knowledge Management(KM) approach in a Moroccan ecosystem environment. **E3S web of conferences**, v. 319, p. 01021, 2021.

GHAFFARISHAHRI, S.; RIVEST, L. Feature recognition for structural aerospace sheet metal parts. **Computer-aided design and applications**, v. 17, n. 1, p. 16–43, 2019.

GHAFFARISHAHRI, S.; RIVEST, L. Feature-based model difference identification for aerospace sheet metal parts. **Computer-aided design and applications**, v. 18, n. 3, p. 443–467, 2020.

GRUBER, T. R. Toward principles for the design of ontologies used for knowledge sharing? **International journal of human-computer studies**, v. 43, n. 5–6, p. 907–928, 1995.

JEAN-BAPTISTE, L. **Ontologies with Python: programming OWL 2. 0 ontologies with Python and Owlready2**. Berkeley, Ca: Apress, 2021.

JEON, S. M.; SCHUESSLBAUER, S. **Digital Twin Application for Production Optimization**. 2020 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM). **Anais...**IEEE, 2020.

LEMAIGNAN, S. et al. **MASON: A proposal for an ontology of manufacturing domain**. IEEE Workshop on Distributed Intelligent Systems: Collective Intelligence and Its Applications (DIS'06). **Anais...**IEEE, 2006.

MAS, F. et al. **An updated review of PLM impact on US and EU Aerospace Industry.** 2021 IEEE International Conference on Engineering, Technology and Innovation (ICE/ITMC). **Anais...IEEE**, 2021.

MURILLO et al. Towards an Automated System to Support the Complex Parts Manufacturing Quotation in the Aerospace Industry. **European Simulation and Modelling Conference (ESM)**, v. 37, [s.d.].

ROZENFELD, H. et al. **Gestão de desenvolvimento de produtos: uma referência para a melhoria do processo Product Development Management: a reference to improve the process.** [s.l: s.n.].

SZEJKA, A. L. **Contribution to interoperable products design and manufacturing information: application to plastic injection products manufacturing.** [s.l.] Université de Lorraine ; Pontifical Catholic University of Parana (PUC-PR), 14 out. 2016.

ZHENG, P. et al. Smart manufacturing systems for Industry 4.0: Conceptual framework, scenarios, and future perspectives. **Frontiers of Mechanical Engineering**, v. 13, n. 2, p. 137–150, 2018.