UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
COORDENAÇÃO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA E TECNOLÓGICA

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

LUIZA MOECKEL OSINSKI

RELATÓRIO FINAL

SIMULAÇÃO DE PROCESSOS DE USINAGEM

Relatório apresentado à Coordenação de Iniciação Científica e Tecnológica da Universidade Federal do Paraná como requisito parcial da conclusão das atividades de Iniciação Científica - Edital 2025/2026
Orientador: Professor Dr Dalberto Dias da Costa

Título do Projeto: Simulação de Processos de Usinagem

CURITIBA
2026

RESUMO

Este trabalho integra o projeto institucional intitulado "Avaliação em Tempo Real da Sustentabilidade dos Processos de Usinagem", em desenvolvimento no Laboratório de Usinagem da UFPR, que possui entre seus objetivos desenvolver modelos virtuais do tipo CAM (*Computer-Aided Manufacturing*) para máquinas-ferramenta. Um desafio central neste processo é a falta de modelos oficiais fornecidos pelos fabricantes, o que demanda a aplicação de engenharia reversa para a reconstrução da geometria e cinemática da máquina. Nessa perspectiva, o intuito deste trabalho é desenvolver um modelo virtual de um torno equipado com tecnologia CNC (Comando Numérico Computadorizado) disponível na UFPR. A metodologia adotada compreende três fases principais: modelagem geométrica, modelagem cinemática e elaboração do pós-processador. O pós-processador atua de forma análoga a um compilador, sendo responsável por transformar o programa vindo do *software* CAM em linguagem baseada em código G, conforme a sintaxe estabelecida pelo fabricante do CNC. Para implementar a metodologia, optou-se pela utilização de *softwares* comerciais do tipo CAD (*Computer-Aided Design*) e CAM. O primeiro foi o Solid Edge®, por meio do qual realizou-se a modelagem da geometria do torno como uma montagem de seus componentes principais. O segundo foi o NX®, que conta com recursos para a modelagem cinemática e a geração do pós-processador. No estágio atual, já se dispõe de um modelo geométrico-cinemático do referido torno. Ainda que se trate de um modelo simplificado, ele representa satisfatoriamente o volume interno da máquina, englobando informações de velocidade, aceleração e trajetórias, o que é fundamental para simular os processos de usinagem. O pós-processador encontra-se em fase de testes iniciais, porém sua primeira versão já torna possível a geração e os testes de programas em código G no comando Mazak-Mazatrol®. Pelos resultados apresentados, conclui-se que o projeto já conta com um modelo virtual do torno CNC disponível no Laboratório de Usinagem. O aprendizado desenvolvido neste estudo permite que a metodologia seja estendida a outras máquinas, colaborando, assim, para o cumprimento dos objetivos do projeto.

INTRODUÇÃO

A manufatura moderna, impulsionada pela Indústria 4.0, exige processos de usinagem que combinem alta produtividade com a utilização sustentável de recursos. Para atingir esse objetivo e minimizar o desperdício de materiais, as máquinas-ferramenta operadas por Comando Numérico Computadorizado (CNC) tornaram-se indispensáveis graças à sua alta precisão. Contudo, dada a complexidade desses equipamentos, as simulações virtuais assumem um papel estratégico, permitindo o planejamento, a validação e a otimização das trajetórias de corte antes de qualquer intervenção na máquina física. Entretanto, sua implementação ainda enfrenta um importante desafio: a indisponibilidade de modelos digitais oficiais fornecidos pelos fabricantes das máquinas-ferramenta. Essa limitação demanda a aplicação de técnicas de engenharia reversa para a reconstrução da geometria e da cinemática dos equipamentos, de modo que o ambiente virtual represente fielmente o comportamento da máquina física.

O presente trabalho integra o projeto institucional intitulado "Avaliação em Tempo Real da Sustentabilidade dos Processos de Usinagem", atualmente em desenvolvimento no Laboratório de Usinagem da Universidade Federal do Paraná (UFPR). Entre os objetivos do projeto está o desenvolvimento de modelos virtuais do tipo CAM (Computer-Aided Manufacturing) para as máquinas-ferramenta do laboratório, visando estimar com maior precisão parâmetros como tempo de corte e viabilidade de trajetórias de usinagem.

Para atender a essa demanda, este plano de trabalho tem como objetivo desenvolver um modelo virtual tridimensional, lógico e cinemático de um torno equipado com tecnologia CNC disponível na UFPR, utilizando os softwares comerciais Solid Edge® e Siemens NX®. Para alcançar esse objetivo, propõe-se, inicialmente, realizar a modelagem geométrica dos componentes estruturais do torno com base em medições físicas e no diagrama de volteio do equipamento. Em seguida, será estruturada a cadeia cinemática no ambiente virtual, definindo as hierarquias de montagem, os limites de curso e o referenciamento do Zero Máquina (Machine Zero). Adicionalmente, o modelo foi estruturado para permitir sua futura integração a um pós-processador, possibilitando a tradução das trajetórias neutras para a

sintaxe em código G específica do controlador CNC em etapas posteriores do projeto. A validação final do modelo ocorrerá por meio da simulação baseada no código de máquina (*Machine Code Based Simulation*), utilizando os drivers CSE (*Common Simulate Engine*), permitindo verificar a ausência de colisões e de inconsistências lógicas durante a execução virtual do processo de usinagem.

REVISÃO DA LITERATURA

Modelagem Virtual e Simulação na Indústria 4.0

Dentre os processos de manufatura contemporâneos, a usinagem por Comando Numérico Computadorizado (CNC) ocupa uma posição de destaque. Com o advento da Indústria 4.0, a busca por maior eficiência nessas operações passou a depender fortemente da integração entre os sistemas CAD (Computer-Aided Design) e CAM (Computer-Aided Manufacturing), viabilizando a construção de modelos virtuais de alta fidelidade. Antes da execução da usinagem no equipamento físico, a utilização de uma representação digital, conhecida na literatura como Máquina-Ferramenta Virtual (Virtual Machine Tool – VMT), permite reproduzir o comportamento geométrico, cinemático e lógico do equipamento, tornando possível validar trajetórias de usinagem, verificar as trocas de ferramentas e identificar potenciais colisões ainda no ambiente virtual. Esses procedimentos contribuem para reduzir o tempo de preparação (setup), minimizar o desperdício de matéria-prima e preservar equipamentos de alto custo.

Como evolução dos modelos virtuais convencionais, surgem os Gêmeos Digitais de Processo (*Digital Process Twins*). Nesse contexto, Anbalagan et al. (2025) propuseram uma arquitetura baseada na integração entre a Internet Industrial das Coisas (IIoT) e o protocolo aberto OPC UA para sincronizar, em tempo real, os dados provenientes do controlador da máquina com o ambiente virtual. Os autores ressaltam, contudo, que a implementação dessas arquiteturas ainda demanda infraestrutura computacional e de alta capacidade de transmissão de dados, o que limita sua adoção em diversos cenários industriais. Ainda assim, a literatura evidencia que a construção de um modelo virtual geometricamente e cinematicamente consistente constitui a base para futuras implementações de Gêmeos Digitais de Processo. É justamente nessa

etapa que se concentra o presente trabalho, cujo objetivo é estruturar uma máquina virtual capaz de representar fielmente o equipamento físico e servir como fundamento para futuras integrações com tecnologias de simulação, monitoramento e validação de processos de usinagem.

Modelagem Geométrica e Cinemática

Um dos desafios encontrados no desenvolvimento de modelos virtuais de máquinas CNC é a necessidade de representar corretamente seus componentes mecânicos e suas relações cinemáticas, especialmente quando não há modelos digitais padronizados disponibilizados pelos fabricantes. Para solucionar essa falta de padronização, Vichare et al. (2009a) propuseram o Unified Manufacturing Resource Model (UMRM), estabelecendo uma estrutura padronizada para representar componentes, eixos, juntas cinemáticas e dispositivos auxiliares de máquinas-ferramenta. Posteriormente, Vichare, Nassehi e Newman (2009b) expandiram essa abordagem para contemplar máquinas de cinemática paralela, demonstrando que os princípios de modelagem dos elementos mecânicos e de suas relações cinemáticas podem ser aplicados a diferentes arquiteturas de máquinas CNC.

A construção de um ambiente de simulação virtual fidedigno exige a integração de diferentes informações do equipamento físico. De acordo com Vichare et al. (2017), a representação de uma máquina-ferramenta em sistemas de manufatura virtual envolve informações geométricas, cinemáticas e tecnológicas, incluindo parâmetros relacionados aos eixos, limites de deslocamento, sistemas de coordenadas, ferramentas e características do controlador. Os autores destacam que, embora a geometria possa ser transferida entre diferentes sistemas por meio de formatos neutros, as informações cinemáticas e tecnológicas permanecem frequentemente associadas a estruturas proprietárias, tornando necessária sua configuração específica para cada ambiente de simulação. Nesse contexto, a incorporação de controladores virtuais às plataformas PLM representa uma estratégia para aproximar o comportamento do modelo virtual daquele da máquina física e ampliar a capacidade de verificação das operações antes da execução real.

Partindo dessa necessidade de estruturar não apenas a geometria, mas também as relações de movimento da máquina, Sanchez Gomez, Gil Castiblanco e Arroyo Osorio (2017) descrevem a implementação da cadeia cinemática (*kinematic chain*) em uma plataforma PLM utilizando o Siemens NX, demonstrando como a definição hierárquica dos componentes mecânicos, dos sistemas de coordenadas e das restrições de movimento permite construir uma máquina-ferramenta virtual funcional. Em um contexto mais recente, Setiawan et al. (2024) aplicaram princípios semelhantes à modelagem cinemática de um centro de usinagem de cinco eixos (DMG 50U), demonstrando que a correta configuração dos eixos lineares e rotativos, do sistema de coordenadas da máquina e do pós-processador é fundamental para garantir a consistência entre a simulação virtual e a execução da usinagem. Com base nesses princípios, a parametrização desenvolvida no presente trabalho foi realizada a partir dos manuais originais da máquina (MAZAK, 2006) e do sistema (SIEMENS, 2025), assegurando que os limites de curso (*soft* e *hard limits*) e o diagrama de volteio permanecessem compatíveis com a configuração da máquina real.

A automação de tarefas no ambiente CAD/CAM também tem sido explorada como estratégia para aumentar a produtividade e reduzir a intervenção manual durante o desenvolvimento de modelos e programas de usinagem. Nesse âmbito, Abidin et al. (2019) propuseram uma metodologia para a customização paramétrica de modelos CAD no Siemens NX por meio da integração entre programação em Visual Basic e interfaces gráficas, permitindo a atualização automática da geometria a partir de parâmetros definidos pelo usuário. Em complemento, Mohamad e Zahid (2019) desenvolveram uma aplicação baseada nas ferramentas de Journaling do Siemens NX CAM e programação em Visual Basic para automatizar a criação e a simulação de operações de usinagem em quatro eixos, reduzindo significativamente o tempo necessário para o planejamento do processo. Esses avanços evidenciam o potencial das ferramentas de customização do Siemens NX para automatizar tarefas repetitivas e ampliar a eficiência dos ambientes virtuais de manufatura.

Pós-processamento

A etapa que conecta o planejamento computacional à execução física na máquina CNC é o pós-processamento. Essa ferramenta é responsável por traduzir o programa

gerado internamente pelo sistema CAM, que utiliza a linguagem universal APT (*Automatically Programmed Tool*), para a sintaxe em código G específica do controlador da máquina. Nesse contexto, Setiawan et al. (2024) demonstram que a correta configuração do pós-processador é essencial para garantir que as trajetórias planejadas no ambiente CAD/CAM sejam convertidas em comandos compatíveis com a arquitetura cinemática da máquina-ferramenta. Complementando essa abordagem, Živković (2016) analisou o comportamento dos módulos de pós-processamento do Siemens NX e demonstrou que inconsistências na implementação da cinemática inversa e na definição de parâmetros como *Machine Zero*, *Pivot Distance* e *offsets* podem produzir códigos NC incorretos, mesmo quando a trajetória da ferramenta foi gerada adequadamente. Esses resultados evidenciam a importância da validação do pós-processador para assegurar a fidelidade entre o modelo virtual e o comportamento da máquina física.

Para mitigar esses riscos e validar o código G, Schmid et al. (2020) propõem a integração do Virtual Numerical Control Kernel (VNCK) ao ambiente de simulação. Os autores demonstram que a simulação baseada no código de máquina (*Machine Code Based Simulation*), realizada por meio da interação entre o VNCK e o *Common Simulation Engine* (CSE), permite processar exatamente o mesmo código NC que será executado na máquina física. Logo, torna-se possível identificar falhas de processamento lógico, movimentos incorretos, ultrapassagens dos limites cinemáticos e outras inconsistências que não seriam detectadas em simulações baseadas apenas na trajetória da ferramenta (*Tool Path Based Simulation*).

Por fim, a precisão da cadeia cinemática, do modelo lógico e do pós-processador influencia diretamente a confiabilidade das simulações e das estimativas de tempo obtidas em ambiente virtual. Conforme discutido por Schmid et al. (2020), a utilização de modelos digitais integrados ao controlador virtual e à simulação baseada no código de máquina permite validar trajetórias, prever tempos de operação e identificar inconsistências antes da fabricação. Dessa forma, a construção de um modelo virtual fiel à máquina física representa um requisito fundamental para avaliações relacionadas à eficiência, à segurança e à sustentabilidade dos processos de usinagem, objetivos centrais do projeto institucional ao qual o presente trabalho está vinculado.

MATERIAIS E MÉTODOS

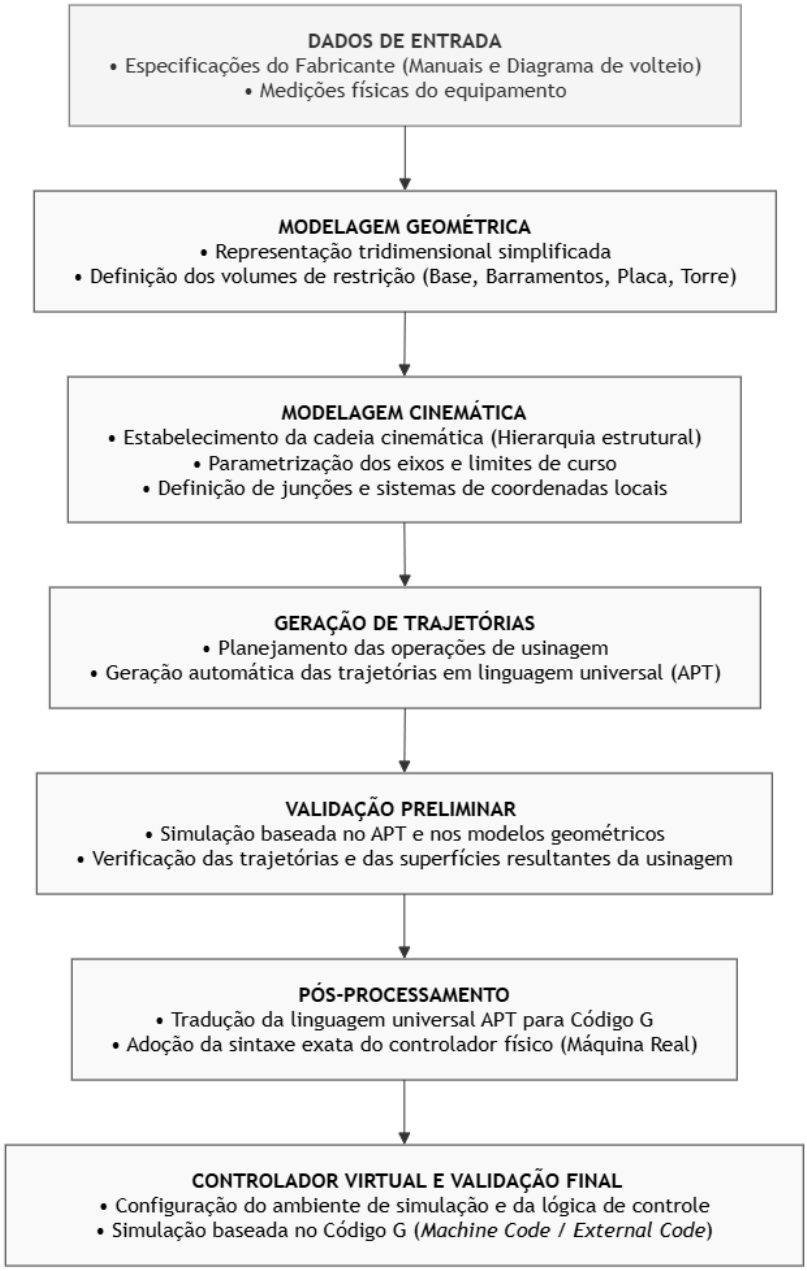
Metodologia

A metodologia para o desenvolvimento do modelo virtual da máquina-ferramenta compreende três etapas fundamentais: a modelagem geométrica, a modelagem cinemática e a configuração do ambiente de simulação e do controlador virtual. Essas etapas foram desenvolvidas de forma integrada, de modo que a representação tridimensional do equipamento pudesse ser associada às suas relações de movimento e, posteriormente, à lógica de controle utilizada na simulação.

A modelagem geométrica consiste na representação tridimensional dos componentes da máquina, enquanto a modelagem cinemática estabelece a hierarquia de movimentos, as relações entre os componentes e suas respectivas restrições de deslocamento. Um dos principais desafios dessa etapa está na disponibilidade limitada de modelos digitais oficiais das máquinas-ferramenta, uma vez que os fabricantes nem sempre fornecem representações tridimensionais detalhadas ou adequadas para utilização em ambientes de simulação. Dessa forma, torna-se necessário reconstruir e adequar a geometria do equipamento a partir de documentação técnica, medições e outras informações disponíveis, além de estruturar posteriormente suas características cinemáticas para que o modelo possa representar o comportamento da máquina real.

Concluída a integração dos modelos geométrico e cinemático, a validação do processo ocorre por meio da simulação. Essa etapa compreende a geração automática das trajetórias e das superfícies resultantes da usinagem, bem como a verificação de colisões. Tais análises são baseadas na linguagem universal APT (*Automatically Programmed Tool*) em conjunto com os modelos geométricos da peça, das ferramentas e da máquina. Por fim, a metodologia estabelece o pós-processamento do arquivo APT gerado, convertendo-o em código G fundamentado na sintaxe nativa da máquina real. O fluxograma geral dessa metodologia está sumarizado na Figura 1.

Figura 1 – Fluxograma das etapas de desenvolvimento e validação do modelo virtual.



Fonte: Autoria própria (2026).

Implementação

O objeto de estudo para a construção da representação digital foi o torno CNC Mazak Quick Turn Nexus 100-II, equipamento pertencente ao Laboratório de Usinagem da UFPR (Figura 2).

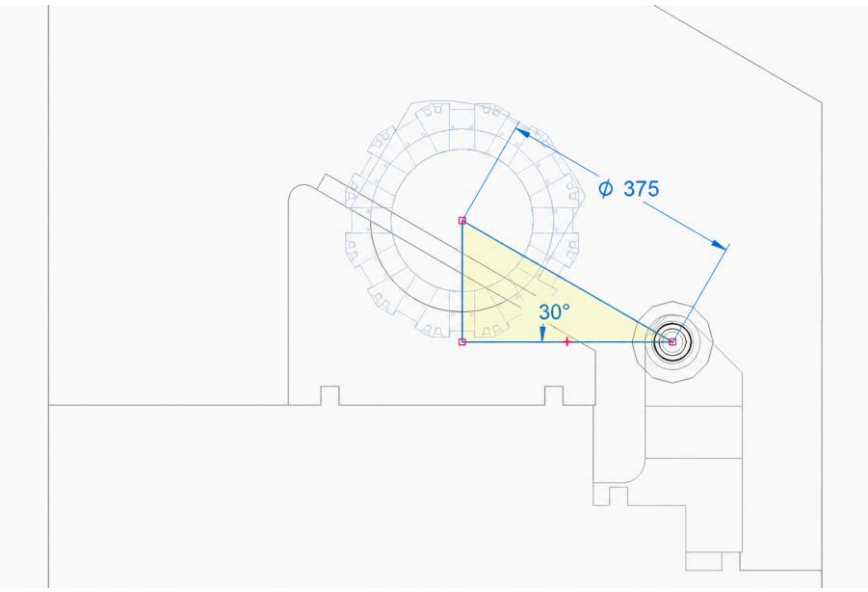
Figura 2 – Torno CNC Mazak QTN 100-II empregado como referência para o projeto.



Fonte: LABUSIG (2025).

Para garantir que o ambiente de simulação refletisse fielmente as restrições mecânicas da máquina física, a primeira etapa consistiu no refinamento e na adequação geométrica do equipamento utilizando o software CAD Solid Edge®. Cabe ressaltar que o objetivo desta etapa não foi modelar inteiramente o torno em seus detalhes mecânicos precisos, mas apenas estabelecer os volumes e as posições dos componentes principais que serão utilizados na simulação, tais como a base, a placa, o barramento Z, o barramento X e a torre de ferramentas. A Figura 3 ilustra o processo de construção bidimensional desses elementos, evidenciando a aplicação das cotas e restrições angulares utilizadas para parametrizar a geometria do modelo.

Figura 3 – Processo de parametrização geométrica e restrição bidimensional dos componentes no software Solid Edge®.



Fonte: Autoria própria (2026).

Para garantir que o modelo virtual representasse adequadamente a máquina física, as principais dimensões foram obtidas a partir do diagrama de volteio e das especificações técnicas presentes no manual original do fabricante (MAZAK, 2006). Como essas informações não eram suficientes para representar todos os componentes do torno, também foram realizadas medições de engenharia reversa diretamente no equipamento, utilizando instrumentos de medição dimensional, tais como paquímetro, trena e goniômetro.

A comparação entre as medidas obtidas no manual e aquelas levantadas na máquina permitiu revisar e ajustar a geometria do modelo virtual previamente existente, refinando as dimensões dos componentes, os volumes de trabalho e o posicionamento relativo dos eixos. Essa etapa foi fundamental para aumentar a fidelidade do modelo virtual e garantir que as simulações representassem de forma mais confiável o comportamento da máquina, reduzindo a ocorrência de colisões decorrentes de inconsistências geométricas ou de limites de curso incorretamente definidos.

No ambiente do Siemens NX®, a validação do processo de usinagem compreende tanto a verificação da trajetória geométrica da ferramenta quanto a simulação orientada ao código de máquina. Nessa segunda abordagem, o software utiliza um núcleo de processamento interno

chamado *Common Simulation Engine* (CSE). Esse sistema interpreta o código G final e reproduz os movimentos que ocorrerão no controlador do equipamento físico.

A configuração da máquina virtual envolve diferentes recursos do Siemens NX®. O *Machine Tool Builder* (MTB) é o ambiente utilizado para a modelagem cinemática, onde são definidos os eixos de movimento, os limites de curso e a hierarquia dos componentes do torno. O *Post Builder* é responsável pela configuração do pós-processador que posteriormente deverá traduzir as trajetórias geradas pelo CAM para a linguagem específica do controlador da máquina. Por fim, o *Machine Kit Wizard* (MKW) realiza a associação entre o modelo 3D, as configurações cinemáticas do MTB e o pós-processador, estruturando os arquivos necessários para a execução da simulação.

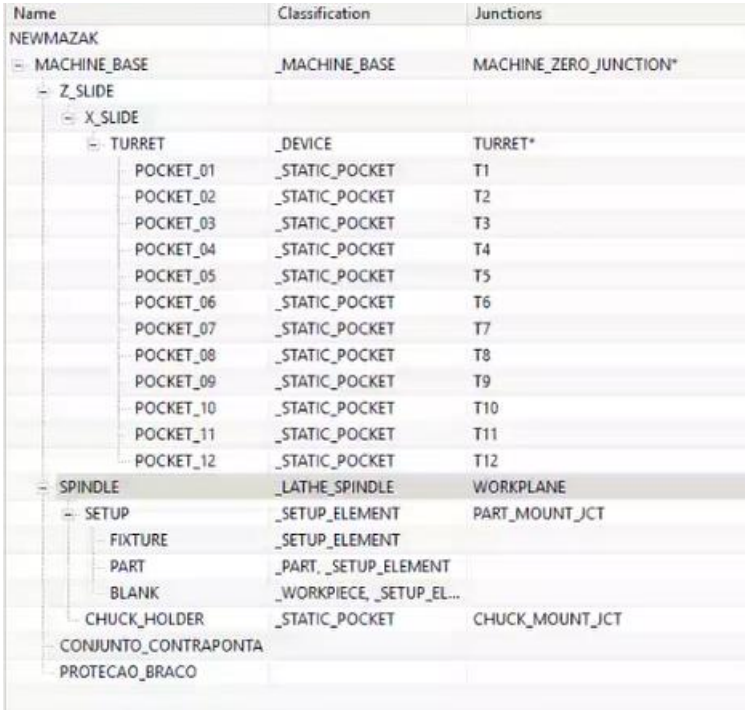
Na estruturação cinemática dentro do ambiente *Machine Tool Builder* (MTB), os volumes geométricos representam os sólidos tridimensionais empregados na restrição espacial e na detecção de colisões. A mobilidade do equipamento é configurada pelos eixos (*axes*), que determinam os vetores de deslocamento e os limites de curso da máquina. A organização de toda a montagem é regida pela cadeia cinemática (*chain*), que estabelece a relação de dependência hierárquica entre os componentes estruturais a partir da base fixa do equipamento. Para integrar a peça de trabalho e as ferramentas de corte à simulação, utilizam-se as junções (*junctions*). Elas atuam como sistemas de coordenadas locais que definem os pontos exatos de montagem e referenciamento para esses itens no ambiente virtual. O gerenciamento dos movimentos fica a cargo dos canais (*channels*), que agrupam os eixos de forma lógica para garantir a execução simultânea e consistente dos comandos do código NC.

Com a adequação geométrica concluída, a construção do modelo virtual teve início com a importação dos modelos tridimensionais para o *Machine Tool Builder*. Nessa fase, o trabalho concentrou-se na estruturação da hierarquia cinemática da máquina, estabelecendo as relações entre os componentes fixos e móveis do torno. Inicialmente, a base estrutural do equipamento foi definida como o *Machine Base Component*, elemento que constitui a referência fixa da máquina e a partir do qual são organizados os demais componentes e eixos de movimentação.

No torno CNC estudado, foi configurado inicialmente o eixo Z, responsável pelo deslocamento longitudinal do carro. Em seguida, foi definido o eixo X, responsável pelo

posicionamento da ferramenta na direção radial da peça. A parametrização de cada eixo incluiu a definição dos respectivos limites de curso (*soft limits* e *hard limits*), permitindo que o modelo virtual identificasse quando esses limites fossem ultrapassados de forma compatível com o comportamento esperado do controlador da máquina (Figura 4). A Figura 4 ilustra a hierarquia estrutural estabelecida no módulo *Machine Tool Builder*, evidenciando a dependência cinemática entre a base estrutural do equipamento e os seus respectivos eixos de movimentação. No núcleo do software, toda essa configuração mecânica é mapeada e armazenada em um arquivo estruturado no formato JSON, o qual registra de forma lógica a hierarquia e as relações de dependência entre os componentes. A fim de simplificar o entendimento dessa matriz de dados, a Figura 5 apresenta um diagrama em blocos que resume a cadeia cinemática extraída do arquivo JSON do torno estudado.

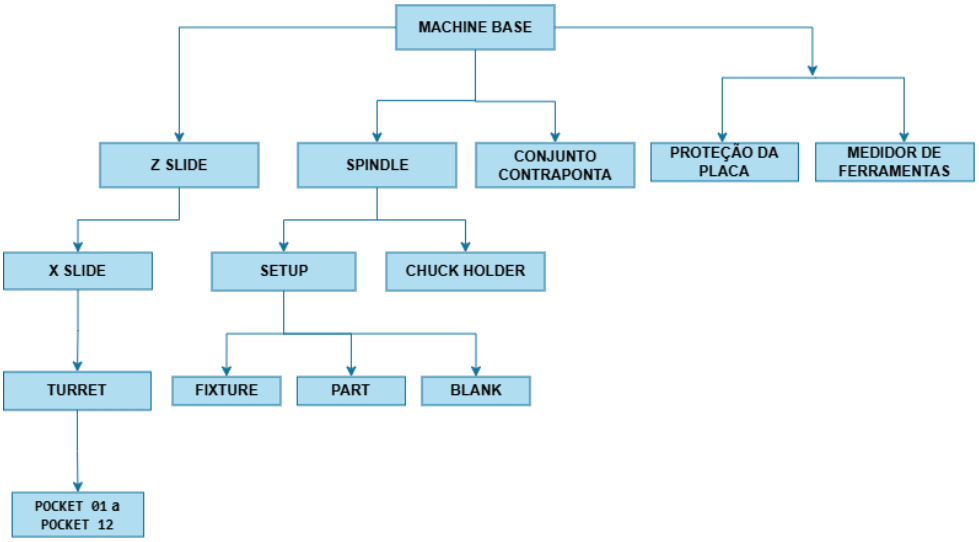
Figura 4 – Hierarquia cinemática e parametrização dos eixos do torno no ambiente Siemens NX®.



Name	Classification	Junctions
NEWMAZAK		
MACHINE_BASE	_MACHINE_BASE	MACHINE_ZERO_JUNCTION*
Z_SLIDE		
X_SLIDE		
TURRET	_DEVICE	TURRET*
POCKET_01	_STATIC_POCKET	T1
POCKET_02	_STATIC_POCKET	T2
POCKET_03	_STATIC_POCKET	T3
POCKET_04	_STATIC_POCKET	T4
POCKET_05	_STATIC_POCKET	T5
POCKET_06	_STATIC_POCKET	T6
POCKET_07	_STATIC_POCKET	T7
POCKET_08	_STATIC_POCKET	T8
POCKET_09	_STATIC_POCKET	T9
POCKET_10	_STATIC_POCKET	T10
POCKET_11	_STATIC_POCKET	T11
POCKET_12	_STATIC_POCKET	T12
SPINDLE	_LATHE_SPINDLE	WORKPLANE
SETUP	_SETUP_ELEMENT	PART_MOUNT_JCT
FIXTURE	_SETUP_ELEMENT	
PART	_PART, _SETUP_ELEMENT	
BLANK	_WORKPIECE, _SETUP_EL...	
CHUCK_HOLDER	_STATIC_POCKET	CHUCK_MOUNT_JCT
CONJUNTO_CONTRAPONTA		
PROTECAO_BRACO		

Fonte: Autoria própria (2026).

Figura 5 – Diagrama lógico do arquivo JSON de configuração.



Fonte: Autoria própria (2026).

Além da configuração dos limites físicos dos eixos, foi necessário definir os sistemas de coordenadas e os pontos de referência utilizados pelo modelo virtual. O *Machine Zero* (Zero Máquina) foi estabelecido como o sistema de coordenadas de referência da máquina, servindo de base para o posicionamento dos componentes e para os cálculos realizados durante a simulação e o pós-processamento.

Na sequência, foram configuradas as *Junctions*, responsáveis pelo posicionamento e pela associação dos diferentes elementos da máquina. A *Part Mount Junction* foi posicionada na face da placa de fixação, definindo o local onde o sistema insere o material bruto (*blank*) e a peça durante a simulação. Já a *Tool Mount Junction* foi posicionada na torre de ferramentas, estabelecendo o ponto de montagem dos porta-ferramentas e das ferramentas de corte. A definição desses referenciais foi fundamental para estruturar corretamente a cadeia cinemática da máquina e garantir o funcionamento consistente do modelo virtual nas etapas posteriores de simulação e pós-processamento.

Durante a configuração das ferramentas de usinagem, foi identificada uma limitação na biblioteca padrão do Siemens NX®, cujos dispositivos disponíveis não representavam adequadamente o sistema de fixação utilizado no torno CNC estudado. Como consequência, as ferramentas de usinagem interna, como as brocas, não eram posicionadas corretamente no ambiente virtual.

Para contornar essa limitação, foi modelado um adaptador (*adapter*) com base em medições realizadas diretamente na máquina, de forma a reproduzir as características do sistema de fixação utilizado no equipamento. Em seguida, esse componente foi cadastrado manualmente no banco de dados do sistema por meio da edição do arquivo device_database.dat, sendo classificado como um *Tool Holder*. Essa adaptação permitiu representar corretamente a interface entre a torre e as ferramentas, garantindo o posicionamento adequado das ferramentas de usinagem interna e maior fidelidade ao comportamento da máquina real.

Em paralelo às adequações realizadas na torre de ferramentas, o trabalho iniciou a estruturação da placa de fixação do torno. O modelo geométrico deste componente já se encontra finalizado e integrado ao ambiente virtual. A modelagem de sua cinemática, entretanto, foi mapeada como uma etapa subsequente do projeto. A configuração estrutural desses movimentos será um requisito fundamental para que o modelo virtual consiga detectar com precisão eventuais colisões entre as ferramentas de corte e o dispositivo de fixação da peça.

A etapa final da configuração cinemática consistiu na parametrização dos elementos responsáveis pela montagem e pelo posicionamento dos componentes da máquina. Na torre de ferramentas, os alojamentos (*pockets*) foram configurados respeitando a inclinação construtiva de 30°, conforme as especificações do torno. Além disso, durante a definição das *Junctions*, foi configurado o parâmetro *Lathe Work Plane Z/X*, responsável por estabelecer a orientação correta do plano de trabalho durante a indexação da torre. Também foram realizados ajustes no *Machine Zero* (Zero Máquina) e nos limites de curso (*soft limits* e *hard limits*), tomando como referência as dimensões e coordenadas apresentadas no diagrama de volteio do fabricante.

Para a etapa de validação lógica, foi estruturado um ambiente de controle virtual baseado no *Common Simulation Engine* (CSE). Após diversos testes realizados com o *Machine Kit Wizard* (MKW), verificou-se que a configuração mais adequada consistia em integrar o modelo virtual desenvolvido neste trabalho à lógica de um controlador da família Sinumerik já disponível na plataforma. Para que o equipamento fosse reconhecido pelo sistema, realizou-se o seu registro na biblioteca do software por meio da edição do arquivo machine_database.dat.

Em paralelo, a integração lógica exigiu a adaptação de subprogramas internos do controlador virtual, com destaque para o ToolChange.SPF, responsável por definir a sequência lógica executada durante as trocas de ferramenta. No ambiente de simulação do Siemens NX®, esse subprograma é acionado sempre que um comando de troca de ferramenta é identificado no código G, controlando movimentos como o afastamento dos eixos e o posicionamento da torre. Foi necessário adaptar essa rotina para remover referências a eixos inexistentes e adequar sua lógica à configuração do torno estudado, composto apenas pelos eixos X e Z. Também foram realizados ajustes para que o controlador reconhecesse corretamente a torre de ferramentas como o transportador ativo (*tool carrier*) durante a simulação. Conforme detalhado na Figura 6, a edição do subprograma garantiu a correta declaração do referencial cinemático "Turret", evitando falhas de compilação durante a leitura dos comandos de troca.

Figura 6 – Trecho adaptado do subprograma de troca de ferramenta (ToolChange.SPF).

```
G0 G90 D0

; Set the tool change position values in metric X,Y,Z
R501=370
R502=434

; check the activ unit and change values if inch is in use
; 3 for G700
IF ($P_GG[13] == 1 OR $P_GG[13] == 3)
  R501 = R501 / 25.4;
  R502 = R502 / 25.4;
ENDIF

G0 G53 X=R501 Z=R502

##LANGUAGE AC
  INT nToolID;
  nToolID = getArrayElement("$TC_TP1",getVariable("$P_TOOLP"));

  move (AXIS, "Turret", (nToolID-1)*360.0/12.0, 1.0);

  STRING strCarrierTool;
  strCarrierTool=getCarrierTool ("Turret", ITOS(nToolID));

  setNextTool (strCarrierTool, "Turret");
  activateNextTool ("Turret");
##LANGUAGE NATIVE
ret
```

Fonte: Autoria própria (2026).

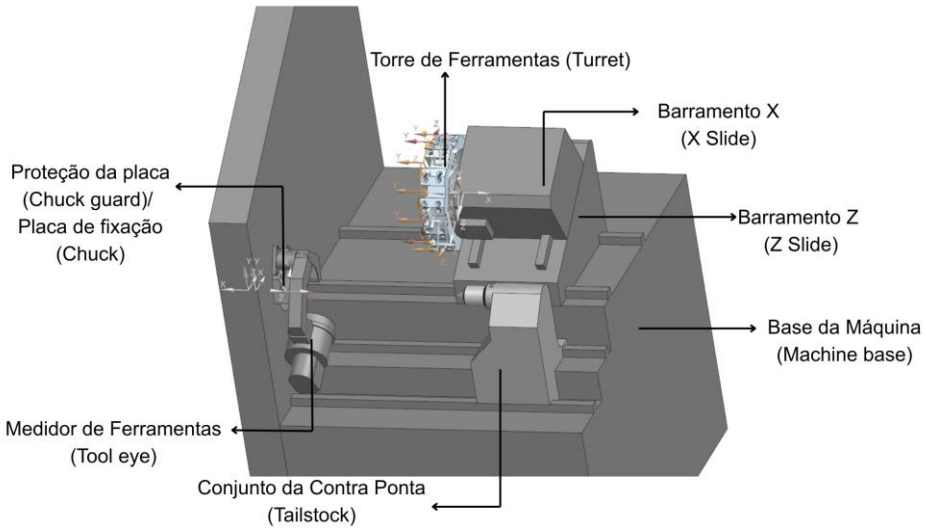
Por fim, a validação operacional do modelo compreendeu a Simulação Baseada no Código de Máquina (*Machine Code Based Simulation*) e a simulação de programas externos (*External Program Simulation*). Com o processamento direto do código G no

ambiente virtual configurado, foi possível verificar o funcionamento integrado da geometria, da cadeia cinemática e da lógica do controlador virtual. Durante essa etapa, foram identificadas e corrigidas incompatibilidades relacionadas à configuração da máquina, como erros associados a falsas operações de fresamento e falhas de configuração do controlador, permitindo a execução consistente das rotinas de usinagem no ambiente de simulação.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos até o presente momento demonstram o desenvolvimento e a validação do modelo virtual do torno CNC Mazak Quick Turn Nexus 100-II no ambiente Siemens NX®. As etapas de modelagem geométrica, configuração da cadeia cinemática e parametrização dos sistemas de referência permitiram a construção de um modelo compatível com as características do equipamento físico. A Figura 7 apresenta a consolidação estrutural desse modelo, destacando seus componentes principais após o processo de montagem.

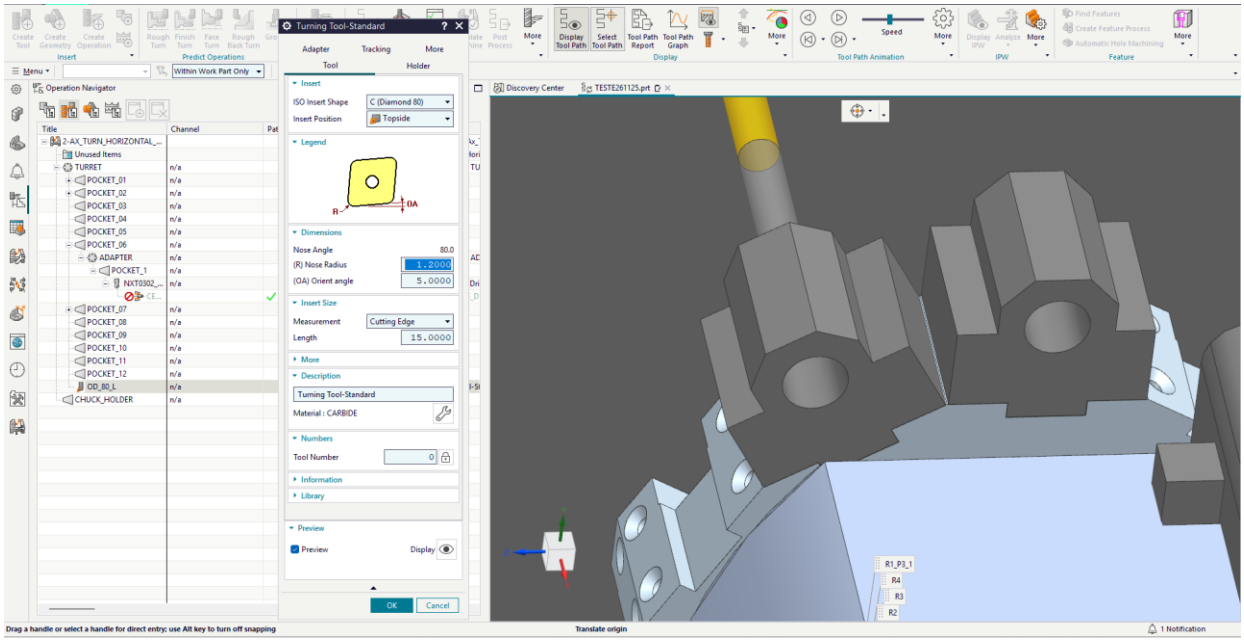
Figura 7 – Representação tridimensional do modelo virtual com a identificação de seus componentes estruturais.



Fonte: Autoria própria (2026).

Durante o processo de validação, o desenvolvimento de um adaptador customizado para as ferramentas de usinagem interna solucionou os problemas de posicionamento observados nos testes iniciais, possibilitando a montagem correta de brocas e barras de mandrilar (Figura 8). Conforme ilustrado, a estruturação hierárquica desse adaptador na árvore de operações garantiu que o componente atuasse como uma interface estável no sistema. Da mesma forma, a configuração dos alojamentos (*pockets*) da torre e os ajustes realizados com base no diagrama de volteio do fabricante contribuíram para garantir a compatibilidade geométrica entre o modelo virtual e a máquina real.

Figura 8 – Estruturação hierárquica e visualização tridimensional do adaptador customizado no Siemens NX®.



Fonte: Autoria própria (2026).

Um resultado importante para a consistência geométrica e cinemática do modelo foi obtido por meio da parametrização do espaço de trabalho da máquina. A configuração do *Machine Zero* (Zero Máquina) e dos limites de curso (*soft limits* e *hard limits*), realizada com base nas dimensões e coordenadas do diagrama de volteio do fabricante, permitiu alinhar o modelo virtual às condições de movimentação do equipamento real. Esses ajustes contribuíram para evitar falsas colisões e extrapolações dos limites de curso durante as

simulações, mantendo os movimentos do modelo compatíveis com as restrições físicas da máquina.

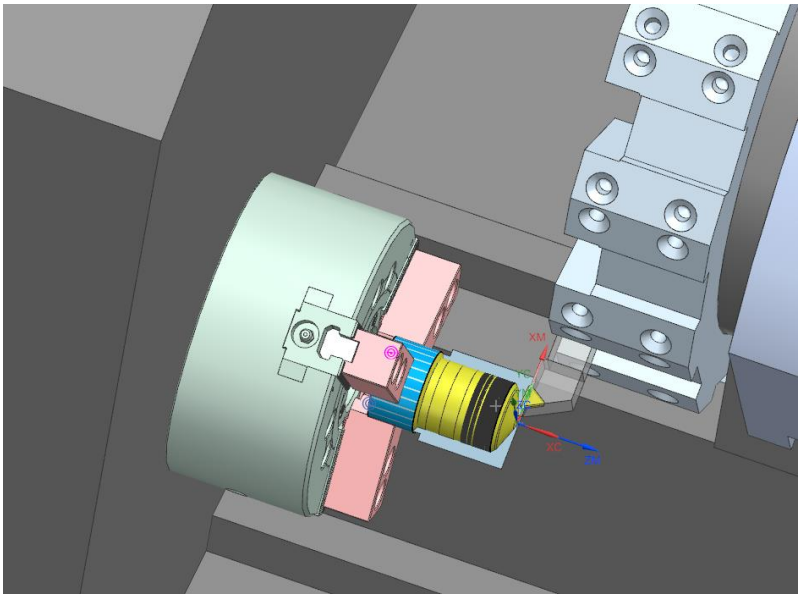
No que se refere à validação do controlador virtual, também foram obtidos resultados relevantes durante a configuração do *Common Simulation Engine* (CSE). Em vez de desenvolver um novo ambiente de controle, optou-se por adaptar o modelo sim11_turn_2ax, disponibilizado na biblioteca do Siemens NX® e originalmente desenvolvido para um torno CNC de dois eixos equipado com controlador Sinumerik. A escolha desse modelo ocorreu devido a uma limitação encontrada no uso do *Machine Kit Wizard* (MKW): observou-se que o modelo gerado automaticamente por esse assistente não realizava a simulação baseada na ponta da ferramenta, mas sim no centro da torre. Contornar esse problema por meio da adoção do modelo sim11 _turn_2ax permitiu utilizar uma estrutura de controle já funcional e compatível com a arquitetura da máquina estudada. Além disso, essa experiência evidenciou que, em etapas futuras do projeto, o desenvolvimento de um controlador virtual específico para o torno Mazak Quick Turn Nexus 100-II poderá proporcionar maior flexibilidade e independência em relação aos modelos disponibilizados pela plataforma.

Para integrar esse controlador ao modelo virtual desenvolvido neste trabalho, foi necessário compatibilizar a lógica de comando com a geometria, a torre de ferramentas e os parâmetros cinemáticos do torno Mazak Quick Turn Nexus 100-II. Para que o equipamento fosse reconhecido pelo sistema, realizou-se o seu registro manual na biblioteca do software por meio da edição do arquivo machine_database.dat. Em paralelo, a adequação lógica do controlador exigiu adaptações na macro de troca de ferramenta (ToolChange.SPF). Como resultado, foram eliminadas incompatibilidades provenientes da configuração inicial do ambiente de simulação, incluindo referências a funcionalidades não aplicáveis ao torno CNC modelado e falhas durante o carregamento do controlador virtual. Esses ajustes possibilitaram a execução consistente da Simulação Baseada no Código de Máquina (*Machine Code Based Simulation*), constituindo um passo importante para a validação do modelo virtual desenvolvido.

Após as adaptações realizadas no controlador virtual, o modelo passou a interpretar o código G diretamente no ambiente de simulação, executando corretamente as rotinas de

usinagem, as indexações da torre e os referenciais definidos para a máquina. A Figura 9 ilustra esse processo, validando visualmente a resposta dinâmica do modelo ao código G e evidenciando a correta interação entre a ferramenta de corte, a peça e a placa de fixação. Essa etapa também possibilitou a obtenção das estimativas dos tempos de usinagem disponibilizadas pelo Siemens NX®, permitindo avaliar a duração das operações a partir da simulação baseada no código G. Esses resultados demonstram que o modelo virtual desenvolvido constitui uma base sólida para as próximas etapas do projeto, incluindo o aprimoramento do pós-processador e futuras análises relacionadas ao planejamento e à eficiência dos processos de usinagem.

Figura 9 – Ambiente virtual durante o exercício de simulação de uma rotina de usinagem controlada por código G.



Fonte: Autoria própria (2026).

Apesar da execução consistente das simulações, cabe ressaltar uma restrição imposta por essa abordagem. Atualmente, o código interpretado no ambiente virtual é específico para o comando Sinumerik 840D, inviabilizando sua execução direta no comando da máquina física. Para contornar essa limitação e integrar o modelo à linguagem nativa do torno Mazak Quick Turn Nexus 100-II, os resultados desta etapa permitiram

identificar as próximas frentes de desenvolvimento do projeto. Entre elas, destaca-se o aprimoramento do pós-processamento, com o desenvolvimento de um pós-processador específico para a arquitetura cinemática do torno Mazak Quick Turn Nexus 100-II. Cabe destacar que o laboratório já dispõe de uma versão inicial de pós-processador, desenvolvida anteriormente por alunos, a qual servirá de ponto de partida para essa etapa. Paralelamente, o trabalho continuará voltado ao refinamento da detecção de colisões e à validação quantitativa do modelo virtual por meio da comparação entre os tempos de usinagem estimados no ambiente Siemens NX® e os tempos obtidos experimentalmente no Laboratório de Usinagem.

Essas atividades permitirão ampliar a confiabilidade do modelo desenvolvido e fornecer subsídios para futuras integrações com arquiteturas de Gêmeos Digitais de Processo (*Digital Process Twins*), mantendo como objetivo a construção de um ambiente virtual cada vez mais representativo do comportamento cinemático e operacional da máquina física.

Para complementar a apresentação desses resultados, foram produzidos registros em vídeo com foco na modelagem geométrica e na estruturação da cadeia cinemática do equipamento. Esse material está disponível para consulta pública no portal do Laboratório de Usinagem da UFPR, acessível em: https://labusig.ufpr.br/comando-numerico/

CONCLUSÃO

A pesquisa alcançou o objetivo proposto para esta etapa do projeto, resultando no desenvolvimento de um modelo virtual funcional do torno CNC Mazak Quick Turn Nexus 100-II no ambiente Siemens NX®. A consolidação das etapas de modelagem geométrica, estruturação da cadeia cinemática e adaptação do controlador virtual permitiu a execução consistente da Simulação Baseada no Código de Máquina (*Machine Code Based Simulation*), possibilitando a interpretação do código G e a obtenção das estimativas dos tempos de usinagem no ambiente de simulação.

Os resultados obtidos demonstram a viabilidade da utilização de um modelo virtual como ferramenta de apoio ao planejamento e à validação de processos de usinagem, estabelecendo uma base sólida para as próximas etapas do projeto. Entre elas, destacam-

se o desenvolvimento de um pós-processador específico para o equipamento, a validação experimental dos tempos de usinagem e o contínuo aperfeiçoamento do ambiente virtual, que poderá futuramente servir como fundamento para a implementação de um Gêmeo Digital de Processo (*Digital Process Twin*).

REFERÊNCIAS

ABIDIN, Z. F. Z.; ZAHID, M. N. O. Real time object customization in CAD system. **Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science**, v. 15, n. 2, p. 1066-1075, 2019. https://doi.org/10.11591/ijeecs.v15.i2.pp1066-1075

ANBALAGAN, A. et al. Lightweight CNC digital process twin framework: IIoT integration with open62541 OPC UA protocol. **Production & Manufacturing Research**, v. 13, n. 1, 2025. https://doi.org/10.1080/21693277.2025.2544981

LABUSIG. **Torno CNC - Características**. Laboratório de Usinagem da Universidade Federal do Paraná (UFPR). Curitiba, 2025. Disponível em: https://labusig.ufpr.br/wp-content/uploads/2025/09/t-cnccaracteristicas.jpg. Acesso em: 12 ago. 2026.

MAZAK. **Manual de programação e operação do torno Mazak**. 2006. Documento interno. Disponível para consulta no Laboratório de Usinagem da UFPR.

MOHAMAD, M. H.; ZAHID, M. N. O. Simulation program for 4th Axis CNC Machining in NX CAM system. **International Journal of Automotive and Mechanical Engineering**, v. 16, n. 3, p. 6971-6986, 2019. https://doi.org/10.15282/ijame.16.3.2019.11.0523

SANCHEZ GOMEZ, C. A.; GIL CASTIBLANCO, L. E.; ARROYO OSORIO, J. M. Building a virtual machine tool in a standard PLM platform. **International Journal on Interactive Design and Manufacturing** , v. 11, n. 2, p. 445–455, 2017. https://doi.org/10.1007/s12008-016-0312-9

SCHMID, J. et al. Validation of machining operations by a Virtual Numerical Controller Kernel based simulation. **Procedia CIRP.** Anais... v. 93, p. 1478-1483, 2020. Elsevier B.V. https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.03.094

SETIAWAN, H. et al. Post-Processor Development For 5 Axis DMG 50U Milling Machine Using Siemens NX 12 Software. Em: **Proceedings of the International Conference on Applied Science and Technology on Engineering Science 2023 (iCAST-ES 2023)**. Atlantis Press, p. 605-613, 2024. https://doi.org/10.2991/978-94-6463-364-1_109

SIEMENS DIGITAL INDUSTRIES SOFTWARE. **NX CAM User Guide**: versões NX 2506 e NX 2512. Siemens Digital Industries Software, 2025. Disponível em: https://www.siemens.com/en-us/support/documentation-downloads/. Acesso em: 10 jul. 2026.

VICHARE, P.; NASSEHI, A.; KUMAR, S.; NEWMAN, S. T. A Unified Manufacturing Resource Model for representing CNC machining systems. **Robotics and Computer-Integrated Manufacturing**, v. 25, n. 6, p. 999-1007, 2009a. https://doi.org/10.1016/j.rcim.2009.04.014

VICHARE, P.; NASSEHI, A.; NEWMAN, S. T. A Novel Information Modelling Approach for Representing Parallel Kinematic Machine Tools. **IFAC Proceedings Volumes**, v. 13, p. 1796-1801, 2009b. https://doi.org/10.3182/20090603-3-RU-2001.0211

VICHARE, P. et al. Computer numerical control machine tool information reusability within virtual machining systems. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture**, v. 232, n. 4, p. 593–604, 2017. https://doi.org/10.1177/0954405417708219

ŽIVKOVIĆ, S. NX CAM Post Processing Errors: Machine Data File Generator vs. Post Builder. **FME Transactions**, v. 44, n. 2, p. 191-197, 2016. https://doi.org/10.5937/fmet1602159Z