

Diagnóstico de falhas do processo de furação em uma máquina CNC^{*}

Marcos V. Moreira^{*} Anna C. Araujo^{**} Yann Landon^{**}

^{*} COPPE - Electrical Engineering Program, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 21.945-970, R.J, Brazil
(e-mail: moreira.mv@poli.ufrj.br)

^{**} Institut Clément Ader (ICA), Université de Toulouse, CNRS/INSA/ISAE/Mines Albi/UPS, Toulouse, France
(e-mail: araujo@insa-toulouse.fr, yann.landon@univ-tlse3.fr)

Abstract: In this paper, we propose a fault diagnoser for the drilling process on a CNC machine. The fault diagnoser uses only the spindle power and Z axis displacement read directly from the system controller, and does not need any additional sensors. The proposed diagnoser is capable of identifying the occurrence of a wrong sequence of events executed by the system and the use of a material different from the expected.

Resumo: Neste trabalho é apresentado um diagnosticador de falhas para o processo de furação em uma máquina CNC. Para tanto, autômatos temporizados são obtidos por identificação com os dados obtidos diretamente do controlador do processo. O diagnosticador utiliza somente a potência do fuso e o deslocamento no eixo Z, sem a necessidade de quaisquer sensores adicionais. O diagnosticador proposto é capaz de detectar falhas na sequência de eventos executada pelo sistema, bem como o uso de um material diferente do esperado para furação.

Keywords: Industry 4.0; Fault diagnosis; Discrete-event systems; CNC machine; Identification.

Palavras-chaves: Indústria 4.0; Diagnóstico de falhas; Sistemas a Eventos Discretos; Máquina CNC; Identificação.

1. INTRODUÇÃO

Com os avanços da Indústria 4.0, é esperada uma operação mais integrada entre humanos e máquinas. Para tanto, é necessário proporcionar um ambiente seguro onde o ser humano possa visualizar melhor as operações que as máquinas estão realizando, devendo o sistema reportar alarmes quando houver algum tipo de falha no sistema para que o operador possa atuar com o objetivo de mitigar possíveis danos. Assim, um sistema automático de diagnóstico de falhas é fundamental para garantir confiabilidade, reduzir perdas e reduzir o custo de produção na usinagem inteligente.

Máquinas controladas numericamente por computador (CNC) realizam os processos de usinagem na indústria devido à sua alta precisão, repetibilidade, flexibilidade e menores custos de produção. A máquina CNC pode ser programada através de um software CAM, que produz um programa ISO através de comandos simples para obter um produto desejado. Nesse processo é muito importante que qualquer condição anormal possa ser rapidamente identificada pelo operador para evitar desperdiçar a peça de trabalho ou causar desgaste excessivo da ferramenta

^{*} Este trabalho foi realizado em parte quando o primeiro autor estava atuando como pesquisador visitante no Instituto Clément Ader (ICA) de Toulouse com suporte financeiro da Universidade Paul Sabatier. Este trabalho foi financiado em parte pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001, FAPERJ and CNPq.

de corte. Assim, a implementação de um diagnosticador de falhas visa auxiliar o operador em sua decisão de recuperar o sistema da falha e é o primeiro nível para o desenvolvimento de sistemas de manufatura inteligentes (Chen et al., 2019). De fato, a usinagem inteligente refere-se ao diagnóstico em tempo real, alerta ao operador e adaptação dos parâmetros de corte para otimização do processo com base em um banco de dados (Araujo et al., 2021). Por exemplo, milhares de furos devem ser feitos para montar camadas na fuselagem em uma aeronave. Assim, a perfuração inteligente é um ponto chave para a maximização do desempenho porque cada camada deve ser usinada com parâmetros diferentes para garantir uma vida útil adequada da ferramenta (Rey et al., 2014; Geier et al., 2019). Nesse caso, a identificação do material em tempo real é necessária para adequação dos parâmetros de corte, como avanço e velocidade de corte, visando a otimização do processo (Gonçalves et al., 2021).

Diversos trabalhos na literatura abordam o problema de diagnóstico de falhas de máquinas CNC utilizando diferentes estratégias e objetivos. Em Drake and Pant (1996), é apresentado um método de diagnóstico de múltiplas falhas no sistema de refrigeração de uma fresadora vertical CNC. Em Hu et al. (2001), é proposto um sistema inteligente de diagnóstico integrado baseado em redes neurais e sistemas especialistas, e, em Lee and Yang (2001), é apresentado um método para diagnóstico de falhas de sensores de temperatura juntamente com a recuperação de dados defeituosos. O método é baseado nos coeficientes de

correlação entre os dados de temperatura produzidos pelos sensores. Em Wang et al. (2016), é apresentado um método para aquisição de dados de máquinas CNC baseado na especificação OPC, a estrutura de comunicação de dados de estado e aplicação de mineração de dados. Usando o método, o usuário é capaz de construir uma plataforma de monitoramento que pode fornecer avisos de falhas. Mais recentemente, em Colasante et al. (2019), é proposto o uso de sistemas especialistas para identificar falhas em ferramentas de máquinas causadas por eventos acidentais, como desconexão de cabos ou eventos de impacto, e em Zhang et al. (2019), é proposta uma estratégia de diagnóstico de falhas baseada em falhas em cascata. Um modelo de propagação de falhas é construído e pode ser usado para localizar a origem da falha.

Uma abordagem diferente para o diagnóstico de falhas é apresentada no trabalho seminal de Sampath et al. (1995) em que o sistema é abstraído como um Sistema a Eventos Discretos (SED), *i.e.*, um sistema com conjunto para diagnóstico de falhas de SED têm sido aprdiscreto de estados e cuja evolução do estado depende inteiramente da ocorrência de eventos discretos ao longo do tempo (Cassandras and Lafortune, 2008). Nesse contexto, uma falha é dita ser diagnosticável quando pode ser detectada e isolada após um número limitado de ocorrências de eventos. Assim, o diagnosticador de falhas deve observar a sequência de eventos gerada pelo sistema e compará-la com as sequências que possuem a mesma observação que pode ser gerada pelo modelo correspondente. Se a sequência observada corresponder apenas a sequências contendo um tipo de falha específico, essa falha será diagnosticada. Desde então várias estratégias foram propostas na literatura para modelos de sistemas não temporizados e temporizados (Santoro et al., 2017; Cabral and Moreira, 2020; Contant et al., 2006; Debouk et al., 2000; Tomola et al., 2017; Zad et al., 2005).

Em alguns casos, contudo, obter o modelo a eventos discretos do sistema pode ser uma tarefa difícil ou mesmo impossível, uma vez que o número de estados do sistema cresce com sua complexidade. Para contornar esse problema, diversos trabalhos na literatura apresentam métodos de identificação de SED com o objetivo de diagnóstico de falhas (Roth et al., 2011; Klein et al., 2005; Moreira and Lesage, 2019a,b). Além disso, algumas falhas não podem ser detectadas apenas observando a sequência de eventos executados pelo sistema, como falhas que levam o sistema a um deadlock. Esse problema é contornado em Schneider et al. (2011) e de Souza et al. (2020), adicionando-se ao modelo a informação de tempo de ocorrência dos eventos, aumentando assim o número de falhas que podem ser diagnosticadas. A principal vantagem da abordagem via SED para diagnóstico de falhas é que o diagnosticador pode ser facilmente implementado em um computador ou controlador lógico programável (CLP), e a falha pode ser detectada assim que um evento inesperado ocorrer no sistema ou se ocorrer em um instante de tempo diferente do esperado.

Neste artigo, autômatos temporizados adequados para o diagnóstico de falhas são propostos para modelar a operação de furação em uma máquina CNC. Os modelos são inspirados no modelo proposto em de Souza et al. (2020), com a diferença de que em de Souza et al. (2020)

todas as entradas e saídas do controlador do sistema são sinais binários, enquanto que neste trabalho os sinais utilizados para obtenção do modelo são analógicos, como a potência do fuso e o deslocamento Z, lidos diretamente do controlador do sistema. Os sinais do CNC são utilizados para obtenção dos eventos bem como do instante de tempo em que ocorrem no sistema, necessários para o diagnóstico de falhas. O diagnosticador obtido pelo método proposto pode ser facilmente implementado em um computador ou CLP, levando a uma rápida detecção de falhas. As falhas que podem ser detectadas pelo método proposto neste trabalho são um código de programação incorreto inserido na máquina pelo operador, uma velocidade de corte incorreta e uma peça com material incorreto.

Este trabalho está organizado da seguinte forma. Na seção 2, alguns conceitos preliminares são apresentados. Em seguida, na seção 3, a operação de furação em uma máquina CNC e a necessidade de diagnóstico de falhas no sistema são apresentadas. Na seção 4, são apresentados os modelos de autômatos temporizados da operação de furação em uma máquina CNC. Finalmente, as conclusões são apresentadas na seção 5.

2. PRELIMINARIES

Seja G um Autômato Temporizado com Intervalos de Tempo (ATIT) definido como (Cassandras and Lafortune, 2008; de Souza et al., 2020):

Definição 1. Um autômato temporizado com intervalos de tempo é uma sêxtupla

$$G = (X, \Sigma, f, c_g, guard, x_0),$$

em que X é o conjunto de estados, Σ é o conjunto finito de eventos, $f : X \times \Sigma \rightarrow X$ é a função de transição, c_g é um relógio global com valor $c_g(t) \in \mathbb{R}^+$, $t \in \mathbb{R}^+$, $guard : X \times \Sigma \rightarrow \mathcal{A}$ é a função de guarda, sendo \mathcal{A} o conjunto de intervalos de tempo admissíveis para o relógio global c_g , e $x_0 \in X$ é o estado inicial do sistema. \square

O domínio da função de transição f pode ser estendido para $X \times \Sigma^*$, em que Σ^* denota o fecho de Kleene de Σ , como: $f(x, \varepsilon) = x$, e $f(x, s\sigma) = f(f(x, s), \sigma)$, para $s \in \Sigma^*$, e $\sigma \in \Sigma$, em que ε denota a sequência vazia (Cassandras and Lafortune, 2008). A função de eventos ativos $\Gamma : X \rightarrow 2^\Sigma$ é definida como $\Gamma(x) = \{\sigma \in \Sigma : f(x, \sigma) \text{ é definido}\}$. Neste caso, $guard(x, \sigma)$ é definido se, e somente se, $f(x, \sigma)$ é definido.

A função $guard : X \times \Sigma \rightarrow \mathcal{A}$ especifica as condições de tempo que necessitam ser satisfeitas pelo relógio global para que uma transição ocorra, e \mathcal{A} são as restrições admissíveis do relógio definidas como intervalos de tempo. No ATIT, o relógio global é resetado para zero a cada instante de tempo em que um evento ocorre. Seja t' o tempo que um estado $x \in X$ é alcançado no autômato temporizado, e seja τ o tempo transcorrido após alcançar o estado x . Então, a transição (x, σ, x') , em que $x' = f(x, \sigma)$, é executada no ATIT se o evento σ ocorre no tempo $t' + \tau$ e $\tau \in guard(x, \sigma)$.

Seja $\Sigma_t := \Sigma \times \mathbb{R}^+$. Então, o conjunto de todas as sequências formadas por elementos $\sigma_t \in \Sigma_t$, incluindo a sequência vazia ε , é denotado por Σ_t^* . Uma sequência temporizada é denotada por $s_t = (\sigma_1, \tau_1)(\sigma_2, \tau_2) \dots (\sigma_l, \tau_l) \in \Sigma_t^*$, em

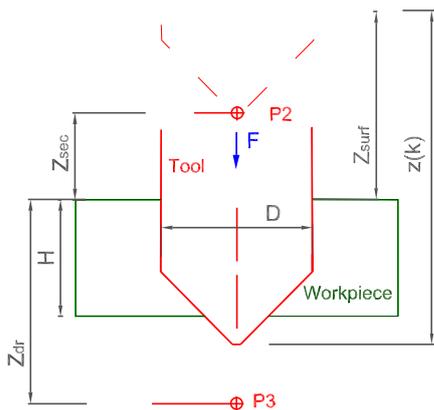


Figura 1. Drilling coordinates.

que τ_1 é o tempo transcorrido entre a inicialização do sistema e a ocorrência de σ_1 , e τ_j , $j \in \{2, \dots, l\}$, é o tempo transcorrido entre a ocorrência de σ_{j-1} e σ_j . Com um leve abuso de notação, considere que $(\sigma, \tau) \in s_t$ denota que (σ, τ) é um dos eventos temporizados que formam s_t .

O comprimento de uma sequência s , temporizada ou não, é denotado por $\|s\|$.

3. OPERAÇÃO DE PERFURAÇÃO EM UMA MÁQUINA CNC

Um programa CNC completo inclui várias etapas de usinagem para a produção de geometrias complexas. Para a fase de furação da peça (espessura H), o material da peça define uma faixa adequada dos dois parâmetros básicos de corte: velocidade de corte, denotada por V_c (m/min), e o avanço por rotação f (mm/rev). Com base nesses parâmetros e no diâmetro nominal da ferramenta D (mm), mostrado na Fig. 1, a velocidade do fuso S (rpm) e a velocidade de avanço F (mm/min) são calculadas como $S = \frac{1000}{\pi D} V_c$ e $F = f \cdot S$.

A parte de furação do programa da máquina CNC é composta por uma sequência de linhas, em que cada linha representa um evento descrito por códigos ISO: G0 representa movimento rápido; G1 representa avanço controlado; e M3 e M5 liga e desliga o fuso de rotação da ferramenta, respectivamente. A ferramenta de perfuração se move rapidamente para a posição de segurança Z_{sec} e então, com alimentação controlada F , de P2 para P3 ($Z_{sec} + Z_{surf} > H$). A coordenada absoluta Z da superfície Z_{surf} é identificada na máquina para codificação e a máquina controla a posição do eixo Z em tempo real.

O código a seguir representa os comandos usados no exemplo deste trabalho:

```
G0 Z200 (Z upper position for drilling operation)
G0 X_hole Y_hole (Tools move to XY hole position)
M3 S=S_drill (The spindle turns on with a peek on spindle power)
G0 Z=Z_surf+Z_sec (The tool moves fast to point P2)
G1 Z=Z_surf-Z_dr F=F_dr (The tool moves until point P3)
G1 Z=Z_sec F=5*F_dr (Back movement with controlled feed 5*F)
G0 Z200 (Returns upper position)
M5 (Stop spindle, peek of power identifies this event)
```

Os sensores da máquina medem a posição Z , $z(k)$, e a potência do fuso, $p(k)$. Um material diferente do esperado para uma determinada velocidade de corte é considerado

uma falha neste processo, pois impacta diretamente na vida útil da ferramenta e representa um consumo de energia diferente do esperado. Neste trabalho, consideramos a furação de alumínio e titânio, que são materiais comumente utilizados na indústria aeronáutica, com a velocidade de corte considerada para furação de alumínio $V_c = 100m/min$, e para furação de titânio $V_c = 50m/min$.

4. AUTÔMATO TEMPORIZADO PARA DIAGNÓSTICO DE FALHAS

Neste artigo, apresentamos um modelo de autômato temporizado inspirado no Autômato Temporizado com Saídas e Transições Condicionais (ATSTC) apresentado em de Souza et al. (2020). Assim como em de Souza et al. (2020), o modelo temporizado possui condições relacionadas ao instante de tempo em que os eventos devem ser observados para permitir que as transições ocorram. O conjunto de tempos possíveis é obtido por identificação após observar o sistema por um tempo suficientemente longo e em diferentes condições. Diferentemente do método apresentado em de Souza et al. (2020), as sequências de eventos já são conhecidas, pois é suposto que o código de programação que deve ser inserido na máquina é conhecido. Assim, o número de sequências r que são consideradas para a obtenção dos modelos depende do número de materiais das peças, e também da velocidade de corte definida V_c . Neste caso, as saídas associadas aos estados do modelo do autômato são utilizadas para indicar ao operador o último evento que o sistema executou. Assim, o operador pode verificar a qualquer momento se o sistema está executando o código de programação corretamente, pois o modelo do autômato é reproduzido em tempo real em paralelo com a execução da máquina. O autômato temporizado com saídas (ATS) é definido a seguir.

Definição 2. O Autômato Temporizado com Saídas é uma óctupla $ATS = (X, \Sigma, f, c_g, \lambda, R, g, x_0)$, em que X é o conjunto finito de estados, Σ é o conjunto finito de eventos, $f : X \times \Sigma \rightarrow X$ é a função de transição, c_g é o relógio global, com valor $c_g(t) \in \mathbb{R}^+$, $t \in \mathbb{R}^+$, $\lambda : X \rightarrow \Sigma$ é a função de saída do estado, $R = \{1, 2, \dots, r\}$ é o conjunto de índices associados às diferentes condições dos experimentos para identificação, $g : X \times \Sigma \times R \rightarrow \mathcal{C}$ é a função de guarda, e $x_0 \in X$ é o estado inicial. \square

O conjunto de restrições admissíveis \mathcal{C} é formado por todos os conjuntos $I \subset \mathbb{R}^+$, que representam intervalos de tempo. Assim como no ATIT, apresentado na Definição 1, no ATS é utilizado um único relógio global c_g , que é zerado toda vez que ocorre uma transição. A função $g(x, \sigma, k)$ especifica um subconjunto de \mathbb{R}^+ ao qual o valor do relógio $c_g(t)$ deve pertencer para que a transição do estado x rotulada por σ possa ocorrer. Diferentemente de de Souza et al. (2020), neste artigo, a função de saída λ associa o último evento ocorrido a um estado do modelo.

É importante ressaltar que, diferentemente do apresentado em de Souza et al. (2020), os sinais observados para identificação dos intervalos de tempo para a ocorrência dos eventos não são sinais binários. No caso da máquina CNC, são lidas a potência do fuso, $p(k)$, e o deslocamento Z , $z(k)$, da ferramenta da máquina. Assim, apenas variáveis contínuas são lidas do CLP e essas variáveis devem ser utilizadas para observar a ocorrência dos eventos do sistema.

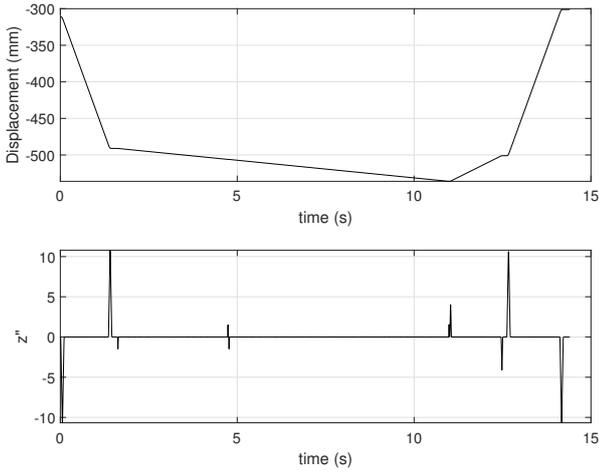


Figura 2. Curva de deslocamento Z e a segunda derivada aproximada de z , Z'' , para furação com velocidade de corte $V_c = 50 \text{ m/min}$ ($P2 \approx -480 \text{ mm}$).

A seguir é mostrado como os eventos podem ser obtidos a partir de $z(k)$.

No gráfico apresentado na parte superior da Figura 2, é apresentada a curva de deslocamento $z(k)$ obtida usando o software Siemens SinuCom NC para furação de uma peça de titânio com velocidade $V_c = 50 \text{ m/min}$. Note que cada mudança na inclinação da curva representa um comando para a máquina CNC. Assim, se a derivada de segunda ordem de $z(k)$ é calculada, obtém-se, aproximadamente, o instante de tempo em que o comando é enviado para a máquina. A curva da segunda derivada aproximada de $z(k)$, $z''(k)$, é mostrada na parte inferior da Figura 2. A aproximação de diferenças finitas usada para calcular $z''(k)$ é dada por:

$$z''(k) = \frac{z(k+1) - 2z(k) + z(k-1)}{h^2}, \quad (1)$$

em que $h = 4 \text{ ms}$ é o intervalo de amostragem dos dados armazenados pelo software SinuCom NC. Assim, medindo-se o instante de tempo em que existe um pico na curva de $z''(k)$, é possível definir aproximadamente o instante de tempo no qual cada comando do código para mover a ferramenta ocorre. Note que para cada velocidade de corte desejada, medindo $z(k)$, é possível identificar se a velocidade correta está sendo executada pela máquina, *i.e.*, podemos detectar um comando errado inserido pelo operador para furar um determinado material.

Para obter o ATS do deslocamento Z , foram feitos 16 testes com uma ferramenta de perfuração nova. Oito testes de furação foram realizados usando as velocidades de corte corretas: quatro experimentos em titânio usando $V_c = 50 \text{ m/min}$ e quatro em alumínio usando $V_c = 100 \text{ m/min}$. Outros oito testes foram realizados usando velocidades incorretas: quatro em titânio usando $V_c = 100 \text{ m/min}$ e quatro em alumínio usando $V_c = 50 \text{ m/min}$. Assim, foram obtidas oito sequências temporizadas $s_i^1 = (\sigma_1, \tau_{i,1}^1), (\sigma_2, \tau_{i,2}^1), \dots, (\sigma_l, \tau_{i,l}^1)$, $i = 1, \dots, 8$, associadas com a velocidade de corte 100 m/min , e oito sequências temporizadas $s_i^2 = (\sigma_1, \tau_{i,1}^2), (\sigma_2, \tau_{i,2}^2), \dots, (\sigma_l, \tau_{i,l}^2)$, $i = 1, \dots, 8$, associadas com velocidade de corte 50 m/min ,

com número de eventos igual a 10, *i.e.*, $l = 10$. É importante ressaltar que $\tau_{i,1}^1$ e $\tau_{i,1}^2$ são definidos como os tempos para a ocorrência do primeiro evento σ_1 após alcançar o estado inicial do sistema. Após a obtenção do tempo transcorrido entre eventos, $\tau_{i,j}^k$, os conjuntos $T_j^k = \{\tau_{i,j}^k \in \mathbb{R} : i \in \{1, 2, \dots, 8\} \wedge (\sigma_j, \tau_{i,j}^k) \in s_i^k\}$, para $j = 2, 3, \dots, 10$, são calculados. Assim, o intervalo no qual o evento σ_j pode ser observado é obtido como $I_j^k = [\min(T_j^k) - \delta, \max(T_j^k) + \delta]$, $j = 2, \dots, 10$, em que a incerteza $\delta \in \mathbb{R}^+$ é definida para levar em consideração possíveis erros na medição dos valores de tempo. Foi escolhido neste trabalho 10 intervalos de amostragem para definir δ , *i.e.*, $\delta = 40 \text{ ms}$. Uma vez que o primeiro evento pode ser observado a qualquer momento após o alcance do estado inicial, os intervalos de tempo para σ_1 são definidos como $I_1^1 = I_1^2 = [0, \infty)$.

A partir das sequências temporizadas s_i^k , $i = 1, 2, \dots, 8$, as sequências de intervalos de tempo $s^k = (\sigma_1, I_1^k), (\sigma_2, I_2^k), \dots, (\sigma_l, I_l^k)$, $k = 1, 2$ são calculadas. Após isso, o modelo ATS para o deslocamento Z , apresentado na Figura 3, é calculado, em que os eventos σ_j são apresentados acima das transições e as guardas são apresentadas abaixo das transições, na forma k, I_j^k . Note que ambas as sequências de intervalos de tempo são geradas pelo modelo ATS, e que somente essas duas sequências de comprimento 10 podem ser geradas. Além disso, note que a velocidade de corte leva a intervalos de tempo disjuntos no quarto evento executado pelo sistema. Assim, se uma ordem incorreta de eventos é executada, ou uma velocidade de corte diferente da esperada é usada, é possível identificar as falhas rodando-se o modelo em paralelo com a execução do sistema.

Para diagnosticar falhas associadas a um material diferente da peça de trabalho, a curva de potência é utilizada. No topo da Figura 4 apresentamos as curvas de potência para perfurar titânio (em preto) e alumínio (em cinza), com velocidade de corte $V_c = 50 \text{ m/min}$ em ambos os casos. Como pode ser visto nas curvas, a potência necessária para perfurar titânio é maior do que a potência necessária para perfurar alumínio. Esse fato fica mais evidente quando as duas curvas são integradas, obtendo-se as curvas na parte inferior da Figura 4. A curva em preto representa a energia consumida para furar a peça de titânio e a curva em cinza representa a energia para furar a peça de alumínio. Como se pode observar, os comportamentos de energia começam a se diferenciar quando atingem aproximadamente 3000 J , o que mostra que os materiais podem ser distinguidos pelas curvas de energia.

A partir dos experimentos de perfuração de titânio e alumínio com diferentes velocidades V_c , os modelos a eventos discretos da Figura 5(a), para $V_c = 50 \text{ m/min}$, e Figura 5(b), para $V_c = 100 \text{ m/min}$, são obtidos. Nesses modelos, a energia é discretizada em determinados níveis e é observado o tempo transcorrido entre dois níveis de energia para cada material para obter os autômatos temporizados. O autômato temporizado da Figura 5(a) gera as sequências de intervalo de tempo $s^3 = (s_{on}, I_1^3), (e_{3000}, I_2^3), (e_{4000}, I_3^3), (s_{off}, I_4^3)$ para alumínio com velocidade de corte $V_c = 50 \text{ m/min}$ e $s^4 = (s_{on}, I_1^4), (e_{3000}, I_2^4), (e_{4000}, I_3^4), (s_{off}, I_4^4)$ para titânio com velocidade de corte $V_c = 50 \text{ m/min}$, em que s_{on} representa o comando para ligar o fuso, e_{3000} e e_{4000} representam que

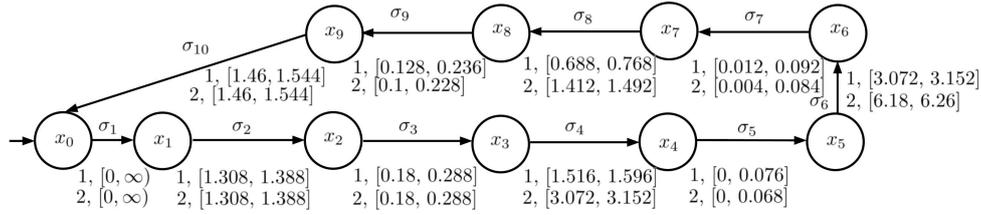


Figura 3. Modelo ATS para o deslocamento Z (as guardas 1, I_j^1 são associadas com as sequências de intervalo de tempo para $V_c = 100m/min$, e 2, I_j^2 são associadas com as sequências de intervalo de tempo para $V_c = 50m/min$).

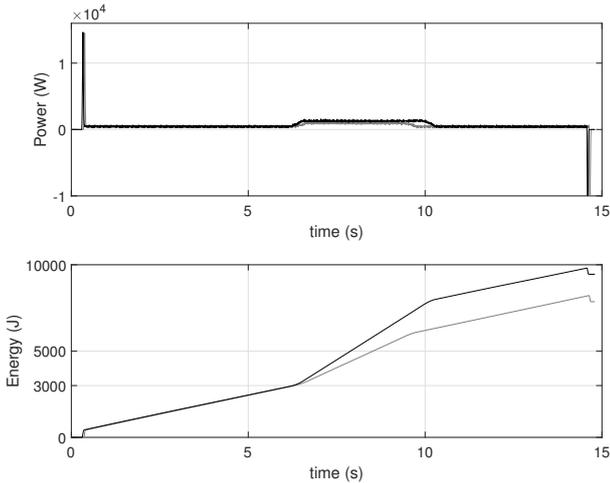


Figura 4. Potência $p(k)$ na parte superior e energia na parte inferior da figura para perfurar titânio (em preto) e alumínio (em cinza), ambos obtidos utilizando-se $V_c = 50 m/min$.

a energia atingiu 3000 J e 4000 J, respectivamente, e s_{off} representa o comando para desligar o fuso. Observe que o tempo transcorrido entre o alcance da energia 3000 J e 4000 J com velocidade $V_c = 50 m/min$ é diferente para furação de alumínio e titânio. Assim, o modelo ATS da Figura 5(a) pode ser usado para distinguir de forma rápida o material da peça.

O modelo ATS da Figura 5(b) é semelhante ao modelo ATS da Figura 5(a), com a diferença que as sequências de intervalo de tempo s^5 e s^6 representam o comportamento a eventos discretos de furação de alumínio e titânio, respectivamente, com velocidade de corte $V_c = 100 m/min$. Neste caso, os materiais da peça podem ser distinguidos medindo-se o tempo transcorrido entre o alcance das energias 5000 J e 6000 J, representadas pelos eventos e_{5000} e e_{6000} , respectivamente.

É importante observar que após observar uma queda brusca de energia, associada ao desligamento do fuso, representado pelo evento s_{off} , os modelos retornam ao estado inicial, e a energia acumulada é resetada. A potência é reintegrada somente após observar o aumento súbito da potência, o que indica que o fuso foi religado, representado pelo evento s_{on} .

5. CONCLUSÕES

Apresentamos neste trabalho modelos de autômatos temporizados para o deslocamento Z da ferramenta e energia

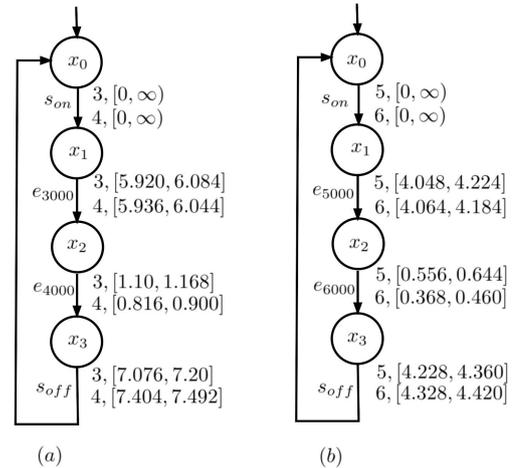


Figura 5. Modelos ATS para perfurar alumínio e titânio com velocidades de corte (a) $V_c = 50 m/min$ (as guardas 3, I_j^3 são associadas com a furação de titânio e 4, I_j^4 com a furação de alumínio) e (b) $V_c = 100 m/min$ (as guardas 5, I_j^5 são associadas com a furação de titânio e 6, I_j^6 com a furação de alumínio).

consumida de uma máquina CNC furando alumínio e titânio. Os modelos são adequados para detecção de falhas e podem ser implementados de forma simples, e executados em paralelo com o sistema, para identificar as falhas de forma rápida. Os resultados mostram que o método proposto é capaz de identificar se é utilizada uma velocidade de corte incorreta para um determinado material, o que aumenta a vida útil da ferramenta de furação. Atualmente, está sendo investigado se o método também pode ser aplicado para determinar automaticamente o desgaste da ferramenta e identificar quando a vida útil da ferramenta é alcançada.

REFERÊNCIAS

- Araujo, A.C., Landon, Y., and Lagarrigue, P. (2021). Smart drilling for aerospace industry: state of art in research and education. *Procedia CIRP*, 99, 387–391. doi:https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.03.105. 14th CIRP Conference on Intelligent Computation in Manufacturing Engineering, 15-17 July 2020.
- Cabral, F.G. and Moreira, M.V. (2020). Synchronous diagnosis of discrete-event systems. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 17(2), 921–932.
- Cassandras, C.G. and Lafortune, S. (2008). *Introduction to Discrete Event System*. Springer-Verlag New York, Inc., Secaucus, NJ.

- Chen, J., Hu, P., Zhou, H., Yang, J., Xie, J., Jiang, Y., Gao, Z., and Zhang, C. (2019). Toward intelligent machine tool. *Engineering*, 5(4), 679–690.
- Colasante, A., Seccacci, S., Talipu, A., and Mengoni, M. (2019). A fuzzy knowledge-based system for diagnosing unpredictable failures in cnc machine tools. *Procedia Manufacturing*, 38, 1634–1641.
- Contant, O., Lafortune, S., and Teneketzis, D. (2006). Diagnosability of discrete event systems with modular structure. *Discrete Event Dynamic Systems: Theory And Applications*, 16(1), 9–37.
- de Souza, R.P., Moreira, M.V., and Lesage, J.J. (2020). Fault detection of discrete-event systems based on an identified timed model. *Control Engineering Practice*, 105, 104638.
- Debouk, R., Lafortune, S., and Teneketzis, D. (2000). Coordinated decentralized protocols for failure diagnosis of discrete event systems. *Discrete Event Dynamic Systems: Theory and Applications*, 10(1), 33–86.
- Drake, P.F. and Pant, D. (1996). Multiple fault diagnosis for a machine tool's flood coolant system using a neural network. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 10, 1247–1251.
- Geier, N., Davim, P., and Szalay, T. (2019). Advanced cutting tools and technologies for drilling carbon fibre reinforced polymer (cfrp) composites: A review. *Applied Science and Manufacturing*.
- Gonçalves, M.C.C., Ferreira Batalha, G., Landon, Y., and Araujo, A.C. (2021). Smart drilling: material identification using specific force map. In 11^o Congresso Brasileiro de Fabricacao - COBEF, 1–7. Curitiba, Brazil.
- Hu, W., Starr, A., and Leung, A. (2001). An intelligent integrated system scheme for machine tools diagnostics. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 18(11), 836–841.
- Klein, S., Litz, L., and Lesage, J.J. (2005). Fault detection of Discrete Event Systems using an identification approach. In 16th IFAC world Congress. Praha, Czech Republic.
- Lee, J.H. and Yang, S.H. (2001). Fault diagnosis and recovery for a cnc machine tool thermal error compensation system. *Journal of Manufacturing Systems*, 19(6), 428–434.
- Moreira, M.V. and Lesage, J.J. (2019a). Discrete event system identification with the aim of fault detection. *Discrete Event Dynamic Systems*, 29(2), 1–19.
- Moreira, M.V. and Lesage, J.J. (2019b). Fault diagnosis based on identified discrete-event models. *Control Engineering Practice*, 91, 104101.
- Rey, P.A., Senatore, J., and Landon, Y. (2014). Characterization of the cutting phenomenon in orbital drilling of titanium alloys (tia16v4). In 11th International Conference on High Speed Machining. Prague, Czech Republic. URL <https://hal.insa-toulouse.fr/hal-01997698>.
- Roth, M., Lesage, J.J., and Litz, L. (2011). The concept of residuals for fault localization in discrete event systems. *Control Engineering Practice*, 19(9), 978–988.
- Sampath, M., Sengupta, R., Lafortune, S., Sinnamohideen, K., and Teneketzis, D. (1995). Diagnosability of discrete-event systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 40(9), 1555–1575.
- Santoro, L.P., Moreira, M.V., and Basilio, J.C. (2017). Computation of minimal diagnosis bases of discrete-event systems using verifiers. *Automatica*, 77, 93–102.
- Schneider, S., Litz, L., and Danancher, M. (2011). Timed Residuals for Fault Detection and Isolation in Discrete Event Systems. In 3rd International Workshop on Dependable Control of Discrete Systems - DCDS 2011, 35–40. Saarbrücken, Germany.
- Tomola, J.H., Cabral, F.G., Carvalho, L.K., and Moreira, M.V. (2017). Robust disjunctive-codiagnosability of discrete-event systems against permanent loss of observations. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 62(11), 5808–5815.
- Wang, W., Zhanga, X., Li, Y., and Li, Y. (2016). Open cnc machine tool's state data acquisition and application based on opc specification. *Procedia CIRP*, 56, 384–388.
- Zad, S.H., Kwong, R., and Wonham, W. (2005). Fault diagnosis in discrete-event systems: Incorporating timing information. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 50(7), 1010–1015.
- Zhang, Y., Mu, L., Shen, G., Yu, Y., and Han, C. (2019). Fault diagnosis strategy of cnc machine tools based on cascading failure. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 30, 2193–2202.