

MONITORAMENTO DE PROCESSO DA INDÚSTRIA 4.0 ATRAVÉS DA PNRD INTEGRADA COM CPN TOOLS

JOSÉ, TAVARES, J.J.P.Z.S., CARLOS, DA SILVA, E.A., ALEXANDRE, DE SOUSA, R.

MAPL - Laboratório de Planejamento Automático da Manufatura, FEMEC, UFU
Av. João Naves de Ávila, 2121, Bloco 1M, sala 314, Campus Santa Mônica, Uberlândia - MG
E-mails: jean.tavares@ufu.br, dasilva.carloseduardo@hotmail.com,
alexanrsousa@gmail.com

JOÃO, FONSECA, P.S.

LabMEC - Laboratório de Mecânica Aplicada, EMC, UFG
Av. Universitária, 1488, Bloco E, sala 03, Setor Leste Universitário, Goiânia - GO
E-mail: jpsfonseca@ufg.br

Abstract— The advent of Industry 4.0, a term designated to identify the new industrial revolution, is based on an “intelligent” factory, an industry based on the integration of a set of technologies that allow ecosystems of autonomous and decentralized “intelligent” process, and integrated services of products. In this direction, the internet of things, “smart” products based on RFID technology, and device-device communication have been indicated as fundamental solutions to meet the requirements of synchronization, parallelism and simultaneity imposed by this solution. However, the continuous use of systems and methodologies focused on human-machine interaction where the participation of a human is presupposed and the visualization systems have to meet the requirements of this user, as the example of current automation solutions, are still a barrier to generate systems that more specifically meet the device-device communication. The need for a solution that meets these characteristics enables the use of Petri nets. There are researches on RFID and Petri net in several areas, such as quality management, monitoring, and system control. These applications connect the Petri network to RFID by creating markings based on RFID tag reading. The PNRD approach or Petri net inside RFID database makes use of the Petri net as a formal data structure to be stored and divided between tags and RFID readers, allowing each identified object to contain the process itself that is inserted and identifying the state, decentralizing this information and generating another means of device-device communication. The PNRD approach refers to a single tagged object and it is unable to manage a whole process. This paper presents the integration of the PNRD and CPN tools so that the entire process can be supervised, and the tagged object history can be recorded; monitoring and storing the process log in a Colored Petri net.

Keywords— RFID, PNRD, CPN tool, Industry 4.0

Resumo— O advento da Indústria 4.0, termo designado para identificar a nova revolução industrial, apoia-se no conceito de fábrica “inteligente”, ou seja, na integração de um conjunto de tecnologias que permitam ecossistemas de processos “inteligentes”, autônomos e descentralizados e serviços integrados de produtos. Nessa direção, internet das coisas, produtos “inteligentes” com base no RFID e comunicação dispositivo-dispositivo são indicados como soluções fundamentais para atender aos requisitos de sincronização, paralelismo e simultaneidade impostos por essa solução. No entanto, o uso contínuo de sistemas e metodologias focados na interação homem-máquina onde a participação de um humano é pressuposta e os sistemas de visualização tem que atender os requisitos desse usuário, como o exemplo das soluções atuais de automação, ainda são uma barreira para gerar sistemas que atendam mais especificamente a comunicação dispositivo-dispositivo. A necessidade de uma solução que atenda a essas características habilita o uso da rede Petri, uma técnica clássica de modelagem gráfica com fundamentação matemática, tradicionalmente aplicada à modelagem de software, modelos organizacionais e comerciais, cadeias de suprimento, sistemas de manufatura flexível e sistemas de controle discreto. Existem inúmeras pesquisas sobre RFID e rede de Petri em diversas áreas, como gerenciamento de qualidade, monitoramento e controle de sistemas. Essas aplicações conectam a rede Petri à RFID por meio da criação de marcas na rede com base na leitura das etiquetas RFID. A abordagem PNRD (*Petri Net inside RFID Database*) ou rede de Petri inserida em base de dados RFID, faz uso da rede de Petri como uma estrutura formal de dados a ser armazenada e dividida entre etiquetas e leitores RFID, permitindo que cada objeto identificado contenha informações sobre o próprio processo e identifique o estado, o que descentraliza as informações e gera um outro meio de comunicação dispositivo-dispositivo que não o baseado na centralização da lógica. A abordagem PNRD se refere a um único objeto etiquetado e não foi desenvolvida para gerenciar todo o processo, mas sim auxiliar e automatizar a operação. Este trabalho apresenta a integração entre a PNRD e a CPN tools, uma ferramenta para edição, simulação, verificação e análise de desempenho de modelos em redes de Petri coloridas, de modo que todo o processo possa ser supervisionado e o histórico dos objetos etiquetados possa ser gravado, monitorando e armazenando o log do processo por meio da rede de Petri colorida.

Palavras-chave— RFID, PNRD, CPN Tools, Indústria 4.0.

1 Introdução

De acordo com Santos *et al.* (2017) indústria “inteligente” ou *Indústria 4.0* refere-se à evolução tecnológica dos sistemas incorporados aos sistemas *cyber* físicos (CPS). A lógica e microprocessamento descentralizado ajuda a criar redes de objetos “inteligentes” com gerenciamento interdependente de processos, ampliando a interação dos mundos

real e virtual e representando uma quebra de paradigma com relação ao atual processo de fabricação e produção. A *Indústria 4.0* se baseia na mudança da produção centralizada para descentralizada, isso significa que a produção industrial não mais simplesmente processa o produto, mas que o produto se comunica com as máquinas-ferramentas para dizer exatamente o que fazer. A *Indústria 4.0* é um conceito abrangente baseado na internet das coisas (IoT), controle distribuído e descentralizado, sistemas embutidos, sistemas CPS e *big data* na

fabricação (GTAI 2016). Pode-se afirmar que o processo de fabricação autônomo e automatizado é o que norteia a *Indústria 4.0*. Todavia, os sistemas de manufatura atualmente existentes, o que inclui desde o controle do chão-de-fábrica até o nível supervisor, têm foco principal em variáveis de processo, ou seja, em verificar se o produto ou serviço realizado está de acordo com o que foi previamente especificado e não na interação entre produto e equipamento. Essa divergência ainda é ampliada pelo hiato que existe entre o processo de projeto do item com o processo de manufatura e produção do mesmo. Em cada fase de desenvolvimento, diversas e distintas equipes são envolvidas e a realimentação das atividades ainda é um desafio a ser solucionado. Hoje, utilizam-se equipes especializadas para definição de cada etapa do processo produtivo, sendo que as mesmas equipes sofrem com a falta de comunicação e diálogo. Neste sentido, surge o problema de como integrar adequadamente produto e processo de forma a se criar uma solução que atenda adequadamente o requisito da comunicação dispositivo-dispositivo.

Uma técnica amplamente difundida é a rede de Petri, tradicionalmente aplicada à modelagem de software, modelos organizacionais e comerciais, cadeias de suprimento, sistemas de manufatura flexível e sistemas de controle discreto (Jensen *et al.* 2009). Há diversas variantes da rede de Petri, tais como sistemas evento/condição, redes elementares, redes lugar/transição e rede de Petri colorida (CPN). Classificada como uma rede de Petri de alto nível, a rede de Petri colorida (CPN) consiste em uma linguagem gráfica para a construção de modelos de sistemas concorrentes e análise de suas propriedades (Jensen *et al.* 2009). O *CPN Tools* é uma ferramenta para edição, simulação, verificação e análise de desempenho de modelos CPN, em conformidade com o padrão ISO/IEC 15909 (ISO/IEC, 2004).

A identificação por rádio frequência (RFID), por outro lado, tem forte aplicação na rastreabilidade e controle de movimentação e é apontada como uma das tecnologias empregadas na revolução industrial atual (Zhang *et al.* 2014) (Qu *et al.* 2012) (Mengru Tu *et al.* 2018). Sistemas RFID são compostos, basicamente, por dois dispositivos: leitores e etiquetas eletrônicas, normalmente denominadas *tags*. Leitores contêm um número definido de antenas e as mesmas são parte responsável pela comunicação física, sendo conveniente apontar três componentes físicos para um sistema RFID. Por meio de leitores conectados a aplicações específicas, pode-se manipular um ambiente de informações fisicamente distribuídas.

Uma forma de integrar tecnologia RFID e redes de Petri é através da rede de Petri inserida em base de dados RFID, ou *Petri Nets inside Rfid Distributed database* (PNRD), uma estrutura formal de dados

que integra redes de Petri e os componentes RFID (Tavares *et al.* Saraiva, 2010). Esta abordagem permite que processos modelados em redes de Petri possam ter sua lógica de operação fisicamente distribuída. A PNRD foi concebida inicialmente para sistemas logísticos e de manufatura, onde o foco está na identificação e monitoramento de agentes passivos (itens comerciais, peças e produtos, por exemplo). Por abordar cada objeto individualmente, a PNRD trata de processos relativamente simples, o que justifica o uso de redes de Petri elementares como base desta abordagem. Para se criar um ambiente capaz de visualizar o processo de todos os itens identificados é necessário integrar a PNRD com uma rede de Petri de alto nível. Este trabalho apresenta como principal contribuição como a PNRD pode ser integrada ao *CPN Tools* de modo a propiciar o monitoramento de processos da *Indústria 4.0* acrescentando interação produto equipamento.

A seção 2 apresenta a fundamentação teórica contendo o RFID e rede de Petri, seguido pela seção 3 que trata da abordagem PNRD. A seção 4 mostra o modelo em *CPN Tools* que se integra com a PNRD. Um exemplo é apresentado na seção 5, seguido da conclusão, agradecimentos e bibliografia.

2 Fundamentação Teórica

2.1 RFID

Segundo Coskun, Ok e Ozdenizci (2011), RFID é uma tecnologia que utiliza comunicação via ondas de rádio para trocar dados entre um leitor e uma etiqueta eletrônica, tradicionalmente fixada em um objeto de interesse, principalmente para o propósito de identificação e rastreamento. Um sistema RFID contém três componentes físicos:

- *Tag* ou etiqueta eletrônica - associada a um objeto de interesse, conferindo-lhe uma identificação única e inequívoca;
- Antena - responsável por gerar um campo eletromagnético capaz de detectar *tags* ao seu alcance e fornecer um meio de comunicação para acesso aos dados armazenados na memória das etiquetas;
- Leitor - recebe os dados da etiqueta modulados através da antena, gerencia as antenas, número de leituras, potência de emissão e conexão com demais aplicativos. Pode controlar o acesso e modificar informações em *tags* de interesse.

Ahsan, Shah e Kingston (2010) citam outros dois componentes, responsáveis por permitir o acesso, controle e manipulação das informações contidas nas etiquetas: a infraestrutura de comunicação e o

software de aplicação. Uma representação esquemática dos componentes de um sistema RFID é apresentada na Fig. 1.

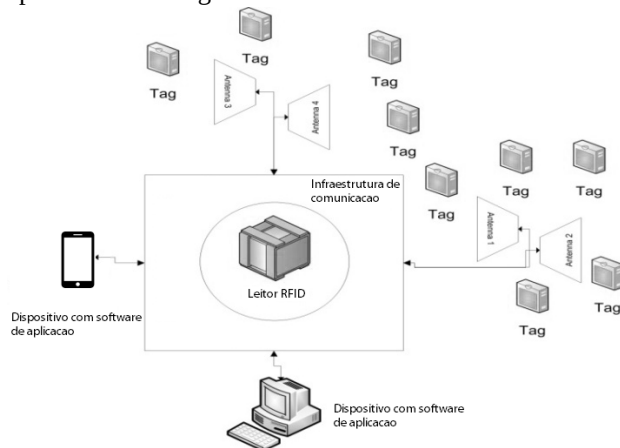


Figura 1. Componentes de um sistema RFID modificado de Ah-san, Shah e Kingston (2010)

A comunicação por campo próximo, ou *near-field communication* (NFC), é uma tecnologia reconhecida. Consiste em um conjunto de padrões para que *smartphones* e dispositivos semelhantes estabeleçam radiocomunicação pelo toque ou pela aproximação (alguns centímetros) entre os dispositivos.

De acordo com Finkenzeller (2010), à primeira vista, NFC não se trata de um sistema RFID, mas sim uma interface *wireless* para comunicação entre dispositivos, similar ao infravermelho e ao Bluetooth. Porém, a comunicação NFC utiliza-se de tags e leitores similarmente às soluções RFID.

A transmissão de dados entre duas interfaces NFC usa campos magnéticos de alta frequência na faixa de 13,56 MHz e a distância máxima de comunicação para a transmissão de dados NFC é de 20 cm. Essa frequência é comumente utilizada por leitores RFID de alta frequência (HF).

A aplicação de dispositivos NFC depende de plataformas de hardware específicas para os protocolos de comunicação padronizados. O PN532, por exemplo, é um módulo de transmissão integrado para comunicação sem contato a 13,56 MHz, incluindo funcionalidade de microcontrolador com 40 Kbytes de ROM e 1 Kbytes de RAM.

O módulo PN532 NFC RFID, por sua vez, é um módulo que simplifica as funcionalidades do PN532, tornando-o mais acessível e fácil de utilizar em plataformas de desenvolvimento, como o Arduino. Uma biblioteca de programação disponibilizada facilita a integração do módulo PN532 NFC RFID com plataformas Arduino. Essa biblioteca está apresentada na seção 3.1.

2.2 Rede de Petri

Segundo Murata (1989), redes de Petri consistem em um modelo conceitual gráfico e matemático

introduzido por Carl Adam Petri em 1962. Para Jensen e Kristensen (2009), as redes de Petri fornecem a base da notação gráfica e das primitivas básicas para modelagem de concorrência, comunicação e sincronização.

Outra definição (Petri Nets, 2011) destaca que as redes de Petri são definidas como uma técnica formal, gráfica e executável para a especificação e análise de sistemas a eventos discretos dinâmicos e concorrentes. A palavra “formal” significa que a técnica é matematicamente definida e pode ser usada para fornecer especificações e descrições inequívocas de aplicações. O uso da palavra “gráfica” quer dizer que a técnica pertence a um ramo da matemática denominado teoria dos gráficos. Ou seja, uma rede de Petri pode ser representada tanto graficamente quanto matematicamente. A capacidade de visualização da estrutura e do comportamento de uma rede de Petri confere maior compreensão do comportamento do sistema modelado. A palavra “executável” indica que uma rede de Petri pode ser executada e o seu comportamento observado graficamente. Com isso, protótipos desenvolvidos podem testar ideias de forma mais rápida e econômica.

O campo de aplicação abrange uma ampla gama de sistemas de sistemas técnicos, tais como manufatura, processos de negócios, software e hardware, redes de telecomunicações e sistemas de sinalização, sistemas de defesa, mecatrônica, serviços postais e aviação para sistemas biológicos e sociotécnicos. (ISO/IEC, 2004).

De acordo com Jensen e Kristensen (2009), o desenvolvimento de sistemas concorrentes é particularmente desafiador. Um dos principais motivos é que esses sistemas possuem simultaneidade e não determinismo.

Redes de Petri clássicas são compostas por basicamente quatro tipos de elementos: lugares, transições, arcos e fichas. Lugares são tipicamente representados por círculos e transições por traços ou retângulos. Arcos direcionados ligam lugares a transições ou transições a lugares. Um conjunto de fichas, ou *tokens*, representam a marcação da rede, ou seja, o estado em que o sistema modelado se encontra atualmente. Os *tokens* são representados por pequenos círculos preenchidos, e cada lugar pode conter um ou mais *tokens*. A Figura 3 apresenta um exemplo de rede de Petri com cinco lugares (E_0 - E_4), quatro transições (T_0 - T_3) e um *token* no lugar E_0 .

Formalmente, uma rede de Petri lugar / transição (Desel et Reisig, 1998) é definida como uma quintupla $R=(P,T,I,O,M)$, em que:

$P=\{P_1, P_2, \dots, P_n\}$ é um conjunto finito com n lugares, $m>0$,

$T=\{T_1, T_2, \dots, T_m\}$ é um conjunto finito com m transições, $n>0$,

O conjunto $P \cap T = \emptyset$,

$I: P \rightarrow T$ é a função de entrada e identifica o conjunto de lugares de entrada para uma transição,
 $O: T \rightarrow P$ é a função de saída e identifica o conjunto de lugares de saída para uma transição,
 $M: P \rightarrow N$, é a marcação ou estado da rede, onde N é um conjunto de inteiros incluindo o zero.

Através de notação matricial, as propriedades de uma rede de Petri podem ser algebricamente analisadas. As funções I e O são substituídas pelas matrizes apresentadas na Eq. 1 e na Eq. 2, ambas com n linhas e m colunas. A matriz de incidência da rede é dada pela Eq. 3. A marcação armazena o estado atual da rede de Petri. O próximo estado é dado pela Eq. 4.

$$E[i, j] = (P_i, I(T_j)), i = 1..n \wedge j = 1..m \quad (1)$$

$$S[i, j] = (P_i, O(T_j)), i = 1..n \wedge j = 1..m \quad (2)$$

$$A[i, j] = E[i, j] - S[i, j] \quad (3)$$

$$M_{k+1} = M_k + A^t \cdot u_k, \quad (4)$$

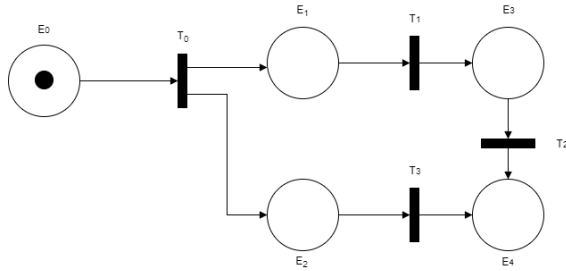


Figura 2. Exemplo de uma rede de Petri elementar com cinco lugares e quatro transições. (SILVA, 2017)

onde M_k é um vetor coluna ($n \times 1$) cujo elemento da n -ésima linha corresponde a quantidade de marcações no n -ésimo lugar, em determinado instante de tempo k ; M_{k+1} é o vetor de marcação resultante do disparo k ; A^t é a função transposta da matriz de incidência, que representa o conjunto de arcos da rede de Petri. A matriz de incidência possui n linhas e m colunas. O elemento a_{ij} terá valor -1 quando o lugar correspondente à linha i for uma entrada da transição correspondente à coluna j , e terá valor 1 quando for uma saída. Caso não exista arco ligando o lugar e a transição correspondentes, o elemento terá valor 0 . u_k é um vetor linha ($1 \times m$), ou vetor de disparo, cujo elemento da m -ésima coluna corresponde à quantidade vezes que a transição m foi realizada no disparo. Desse modo, a rede de Petri da Fig. 2 possui a matriz de incidência indicada na Eq. 5.

$$A = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

Redes de Petri elementares do tipo *safe* são caracterizadas por lugares que podem representar valores booleanos, isto é, um lugar é marcado por no máximo um *token* não estruturado, ou seja, onde existe apenas uma única marcação e ela se man-

tém ao longo dos disparos da rede como é o caso das máquinas de estado (Murata, 1989). Com a necessidade de representar mais que uma marcação, caso de processos mais complexos, diversas extensões de rede de Petri foram desenvolvidas, como por exemplo as redes de Petri de alto nível com tipos de dados abstratos, redes de Petri algébricas, redes de produto, redes hierárquicas, redes de Petri coloridas, Redes de Petri Generalizadas e Estocásticas GSPN (*Generalized Stochastic Petri Nets*), e redes de Petri orientadas a objeto. Cada uma aumenta o nível de abstração da modelagem. Uma dessas representações é a rede de Petri Colorida (Jensen et Kristensen, 2009).

3 PNRD

A PNRD (*Petri Net inside RFID Database* ou rede de Petri inserida em base de dados RFID) é apresentada por Tavares e Saraiva (2010) e trata-se de uma estrutura de dados formal para ampliar o poder do RFID no nível operacional. A PNRD propõe o uso de redes de Petri elementares do tipo *safe* como representação formal das informações a serem distribuídas nos componentes RFID. Essa identificação automática atrela o processo no nível de cada objeto individualmente. A PNRD foi concebida originalmente para processos logísticos e de manufatura e pressupõe que o comportamento típico de um objeto possa ser modelado por meio de redes de Petri. Desse modo, o fluxo de trabalho da etiqueta RFID associada ao objeto pode ser definido por uma matriz de incidência e o seu estado atual por um vetor de marcação. Essas duas informações, juntamente com a identificação do objeto (ID da etiqueta) e uma indicação de tempo, caracterizam a estrutura típica da PNRD. A indicação de tempo é incluída de forma a possibilitar o sistema a realizar análises quantitativas de performance. As antenas e leitores, por sua vez, estão vinculados ao vetor de disparos adequado a cada situação. Dessa forma, a PNRD é uma estrutura de dados formal cujas informações da rede de Petri estão separados e armazenados nos componentes do sistema RFID, conforme ilustra a Figura 3.

Nessa abordagem cada etiqueta tem gravado o vetor de estados do item que é uma marcação única e singular, além da matriz de incidência relativa a rede de Petri do item. Dessa maneira, o processo esperado pelo qual o objeto deve passar é armazenado internamente em cada item, ou seja, o próprio objeto conhece o processo ao qual está atrelado. Até mesmo processos flexíveis podem ser armazenados, propiciando ao objeto etiquetado diferentes caminhos durante a execução do processo. Resumidamente a abordagem PNRD separa os elementos da rede de Petri nos componentes RFID.

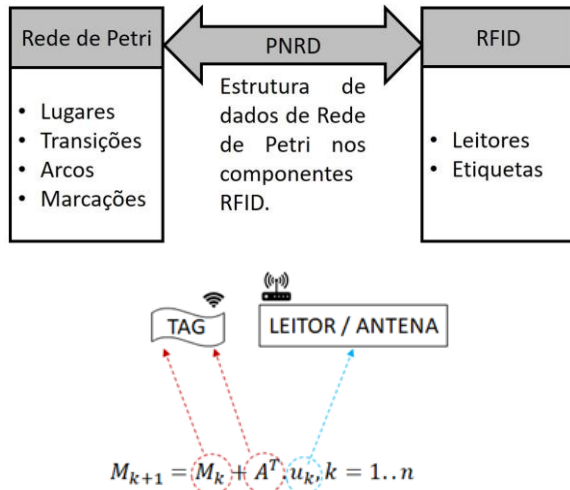


Figura 3. PNRD como ponte entre rede de Petri e RFID.

A matriz de incidência A e o estado atual do objeto M_k são armazenados na memória da etiqueta. O leitor recebe a lista de vetores de disparos u_k referente a cada antena, de forma a poder calcular o valor do próximo estado durante a captura dos dados da *tag*. Como conclusão, a PNRD distribui o modelo em rede de Petri entre os componentes RFID *tag* e leitor. Isso faz com que a lógica da rede de Petri esteja distribuída entre dois elementos físicos e quebra o paradigma da lógica centralizada comumente utilizada nos processos de automação industrial. O cálculo do próximo estado segue a Eq. 4. Se o resultado do cálculo for um vetor de estados unitário, isso significa que a rede de Petri se mantém *safe* e o valor do próximo estado é adequado para ser gravado como novo estado atual da etiqueta. Se o resultado for um vetor não unitário de estados, isso significa que a Rede de Petri deixou de ser elemental e se trata de uma exceção ao processo de trabalho.

Assim, é possível definir a percepção da PNRD como um conjunto da percepção do leitor, da etiqueta e do tempo da percepção. A percepção do leitor depende da lista de vetor de disparos u_k que varia com a identificação da etiqueta *tag_id*, o estado atual do objeto M_k e com a identificação da antena do leitor *antennaId*. A percepção da etiqueta é composta pela sua identificação *tag_id*, matriz de incidência A , estado atual M_k e dados adicionais opcionais. Um conflito na abordagem PNRD surge quando o mesmo leitor/ antena está relacionado a mais de uma transição para o mesmo *tag_id* e estado. Nesse caso, é necessário aplicar um algoritmo de decisão para definir qual transição deve ser escolhida. Um exemplo didático da PNRD pode ser visto em Tavares *et al.* (2017).

3.1 Implementação da PNRD em Arduino

Para que a PNRD possa ser aplicada num ambiente capaz de propiciar comunicação dispositivo-

dispositivo, foi desenvolvida uma biblioteca para Arduino denominada *PNRD.h*, dedicado a fazer uso de leitores NFC PN532. Essa biblioteca possui diversos exemplos que auxiliam sua utilização e está disponível em <ftp://ftp.mecanica.ufu.br/LIVRE/MAPL/Pnrd.zip>. Para utilizar essa biblioteca é necessário conectar fisicamente o leitor NFC532 a comunicação *serial 1* do Arduino. Nesse caso utiliza-se as portas SDA em RX1 (*slot 19*) e SCL em TX1 (*slot 18*) para conexão com o leitor NFC. Carrega-se a biblioteca *PNRD.zip* no IDE do Arduino. Todas as *tags* que serão utilizadas devem ser formatadas, de acordo com o exemplo “FormatTag” da biblioteca PNRD. Para obter o valor do UID de cada *tag* utilizada pode-se fazer uso do exemplo “ReadTag” da biblioteca. Após definir a(s) matriz(es) de incidência de cada *tag*, juntamente com o número de estados, número de transições e marcação inicial, com base no exemplo “GravaPNRD”, atualiza-se o(s) valor(es) da(s) variável(is) *Matriz[], num_transicoes, num_estados* e *Estado[]*. Utiliza-se o exemplo “ReadTag” da biblioteca PNRD para avaliar se os dados referentes à PNRD foram gravados em cada *tag* a ser utilizada. Há um exemplo denominado “Rede_N1” que, atualizando a lista de vetores de disparo determina-se as regras de disparo da rede para cada *tag*, e é capaz de executar o cálculo do próximo estado em concordância com a Eq. (4).

4 Modelo em CPN Tools

O método proposto se baseia em estabelecer comunicação do tipo TCP-IP entre o software da PNRD com a *CPN tools*, de forma a criar um sistema repositório das informações obtidas no chão-de-fábrica. Dessa forma foi acrescido ao Arduino Mega® um *shield ethernet* e foram estruturadas as comunicações entre dois Arduinos Mega® com um leitor RFID, que emulam dois pontos de visibilidade de um processo, e um computador contendo o software *CPN Tools*.

Foram programados os Arduinos para enviar duas mensagens ao *CPN Tools*. A primeira mensagem informa o tag ID e o estado da tag enquanto a segunda mensagem envia o status do cálculo do próximo estado e ou se ocorreu algum erro, seja de comunicação ou exceção ao processo.

O modelo em CPN Tools contém um ciclo inicial para estabelecer conexão TCP/IP com os dispositivos por meio das portas 9000 e 9001, respectivamente. Gera-se uma marcação no estado *connected*, que indica que a rede encontra-se conectada ao dispositivos de campo, e outra no estado *checkrcv*, responsável por iniciar o ciclo de avaliação das mensagens recebidas quando se dispara automaticamente a transição *canrcv*, que carrega as duas mensagens recebidas pelos dois canais de

comunicação, e se gera uma marcação no estado *vercheck*. Se houver uma mensagem do canal 1, que identifica o Arduino 1, a guarda *[b1]* se habilita e dispara a transição *New Msg 1*. Caso a mensagem advir do canal 2, que se refere ao Arduino 2, a guarda *[b2, not b1]* é validada e a transição *New Msg 2* dispara. Ambas as transições criam uma marcação no estado *New Tag*, que efetua o disparo da transição *Tag Reading*, responsável por receber todas informações recebidas, a saber, o *tagId* junto ao estado do objeto etiquetado e o *status* da PNRD que pode ser *Ok*, quando se seguiu o processo armazenado na etiqueta; *Exception*, quando se gerou como resultado do próximo estado um vetor não unitário; e *ComError*, quando um erro de comunicação entre leitor e *tag* ocorreu. Dessa forma, o *color set con1* (que advém do canal 1) e *con2* (que advém do canal 2) são transformados em *conn* após o estado *New Tag*. A transição *Tag Reading* recebe todas as informações de *conn* e as decodifica em *tagId (x1)* e resultado do novo estado (*x2*). Em função do resultado do novo estado, as guardas das transições *CommError*, *OK* e *Exception* retransmitem uma mensagem devidamente traduzida (*s,st*), referente ao *tagId* e *status*. O resultado é armazenado no estado *Process Trace* enquanto nova marcação é enviada ao estado *checkrcv* habilitando nova comunicação. A Figura 4 mostra o modelo implementado em *CPN Tools*. Para se criar um *log* em arquivo texto foi criado um *Monitor* no *CPN Tools*.

5 Estudo de Caso

O estudo de caso fez uso de três *tags* gravadas com o formato PNRD contendo a mesma matriz de incidência, apresentada na Eq. (6). A Figura 5 apresenta graficamente a rede de Petri e a marcação inicial em P_0 . Esse processo será monitorado pela *CPN Tools* de forma a avaliar o status da *tag*. As *tags* foram identificadas com os seguintes *tag_Ids*: 1A, 2A e 3A. A transição *T0* foi atribuída ao módulo leitor embarcado no Arduino 1 (porta 9000) e a transição *T1* ao módulo leitor embarcado no Arduino 2 (porta 9001). A Figura 6 apresenta um diagrama esquemático dos dispositivos.

$$A = \begin{bmatrix} -1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

O caso dessa PNRD (Fig. 5) com dois estados e duas transições se assemelha a processos de empréstimo e devolução de itens como ferramentas, documentos e equipamentos específicos. Nesse caso se acontecer erro de comunicação durante o processo de gravação em algum dos leitores, o modelo da *CPN Tools*, durante o disparo da transição *ComError*, envia mensagem ao outro Arduino

para que não seja gerada exceção caso aquela *tag_Id* seja lida.

A Figura 6 apresenta um PC contendo os softwares *CPN Tools* para alterar as configurações do modelo e visualizar as *tags* processadas, bem como o Arduino IDE capaz de alterar as configurações dos equipamentos está conectado num *hub* ethernet. Dois Arduinos estão conectados à rede e possuem módulos leitores RFID para trocar dados com as *tags*.

5.1 Resultados

A Figura 7 apresenta um resumo dos dados obtidos pelo *monitor serial* do Arduino atribuído à porta 9001. Há de se destacar a obtenção dinâmica do endereço IP do dispositivo, a conexão com o *CPN Tools* se estabelecendo e a leitura da *tag 1A* com seu subsequente processamento de estado. A Figura 8 ilustra a lista de *tag_Id* no estado *Process Trace* do modelo no *CPN Tools*. É possível reparar que inicialmente foi lida a *tag_Id* 3A que foi atualizada no estado P_1 (3A1). A seguir ocorreu uma exceção nessa mesma *tag_Id*, o que significa que a mesma passou pelo mesmo leitor duas vezes seguidas. Posteriormente ocorreu a alteração dos estados das *tag_Ids* 2A e 1A, respectivamente.

6 Conclusões

A integração de dispositivos capazes de armazenar o processo ao qual o objeto está inserido, conforme a abordagem PNRD com o software *CPN Tools* potencializou os resultados da comunicação entre dispositivos, propiciando que seja possível monitorar a mudança de estados, bem como qualquer exceção ao processo, remotamente e em tempo real. Erros de comunicação podem ser tratados diretamente pelo modelo em rede de alto nível.

Apesar de o exemplo apresentado ser simples, fica evidente que processos mais complexos podem ser implementados. A limitação se dá pelo espaço de dados das *tags*.

A proposta apresenta uma forma de estruturar o log/histórico dos comportamento envolvidos com o processo de manufatura. Tal estrutura poderá ser utilizada para prover uma massa de dados estruturadas em análise de big data em futuras aplicações. A abordagem apresentada é descentralizada, consegue lidar com sincronismo, concorrência e paralelismo de atividades. Os dispositivos envolvidos são capazes de se comunicar e trocar informação sobre o processo, complementando as informações dos sistemas RFID típicos. A *CPN Tools* pode operar como um agente do sistema (e não apenas para monitoramento), agindo ativamente em ocasiões de falha na comunicação, como exemplificado na seção 5.

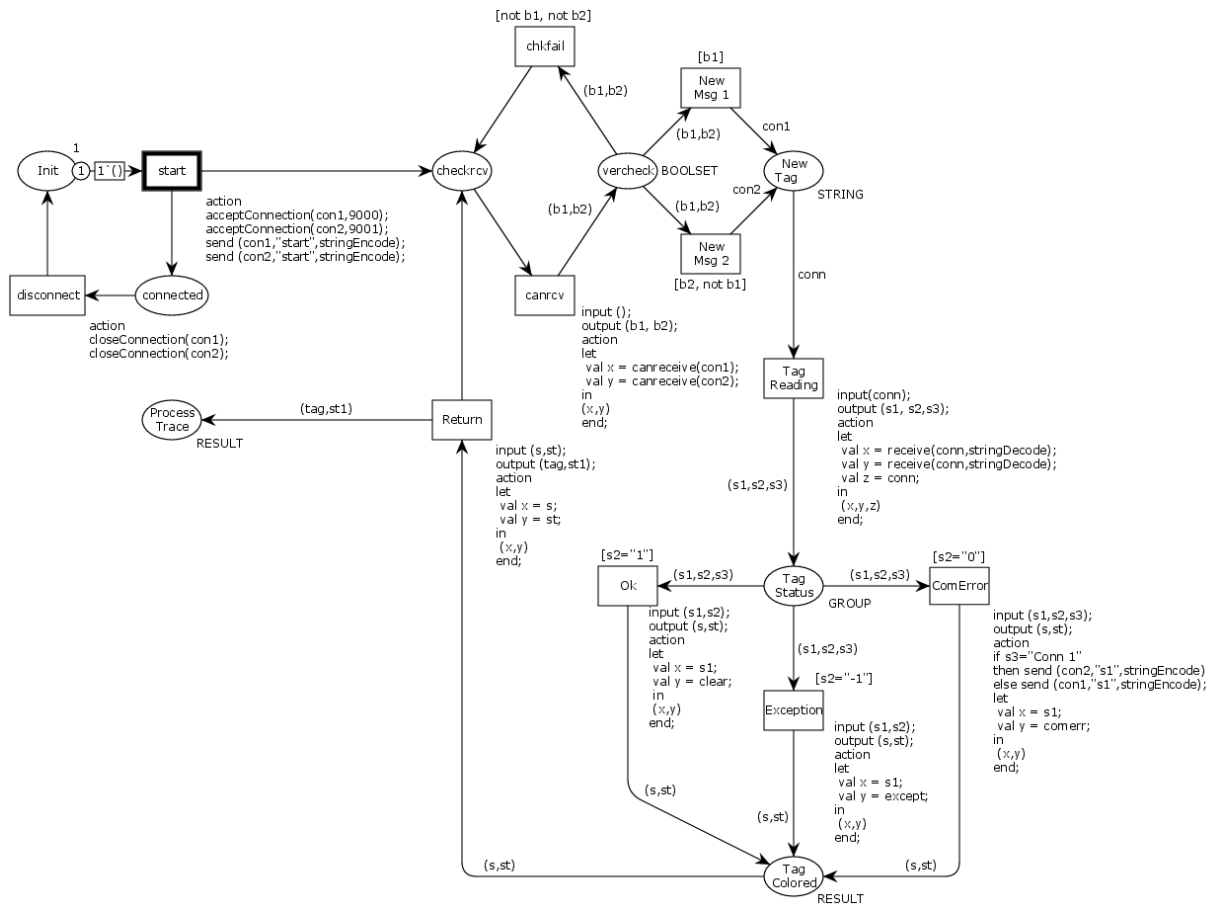


Figura 4. Modelo em CPN Tools para integração com PNRD.

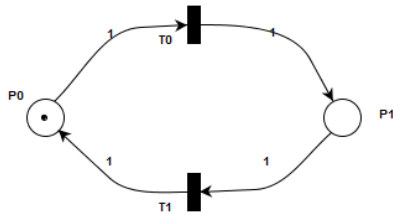


Figura 5. Rede de Petri correspondente à Matriz de incidência armazenada na tag em formato PNRD.

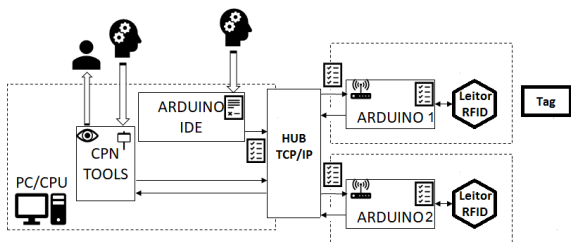


Figura 6. Representação esquemática do estudo de caso proposto.

É necessário desenvolver um sistema que integre essa solução com as etapas de modelagem da rede de Petri, reduzindo o tempo para gravação das informações da rede nos elementos RFID.

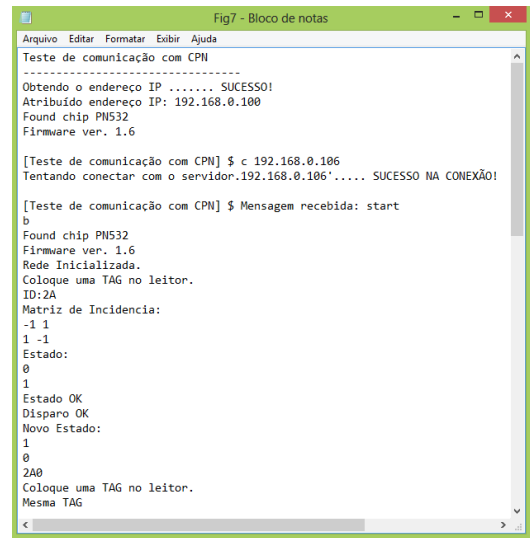


Figura 7. Monitor serial relativo ao Arduino 2.

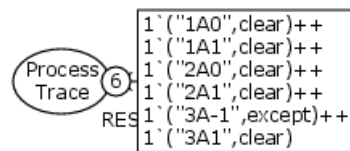


Figura 8. Lista de Tag_Ids armazenadas no CPN Tools após o estudo de caso.

Novas metodologias de desenvolvimento com ênfase na comunicação dispositivo-dispositivo podem ser desenvolvidas baseando-se nessa abordagem.

Agradecimentos

CNPQ, CAPES, FAPEMIG, UFU, FEMEC e programa de pós graduação em Engenharia Mecânica.

Referências Bibliográficas

- Ahsab, K.; Shah, H.; Kingston, P. (2010). RFID Applications: An Introductory and Exploratory Study. *International Journal of Computer Science Issues*. Mahébourg, v. 7, i.1, n.3, p. 1-7, jan. 2010. Disponível em: <<http://www.ijcsi.org/papers/7-1-3-1-7.pdf>>. Acesso em: 23 dez. 2017.
- Coskun, V.; Ok, K.; Ozdenizci, B. (2011). Near Field Communication (NFC): From Theory to Practice. Chichester: John Wiley & Sons, 632 p.
- Desel, J.; Reisig, W. (1998) Place/transition Petri Nets. In: Reisig W., Rozenberg G. (eds) Lectures on Petri Nets I: Basic Models. ACPN 1996. Lecture Notes in Computer Science, v. 1491. Berlin, Heidelberg: Springer, pp. 122-173.
- Finkenzeller, K. (2010). RFID Handbook: Fundamentals and Applications in Contactless Smart Cards, Radio Frequency Identification and Near-Field Communication. 3.ed. Chichester: John Wiley & Sons, 478 p.
- GTAI German and Trade Investment. (2016). Industrie 4.0. Smart Manufacturing for the Future, Online. Available at <https://www.gtai.de/GTAI/Content/EN/Invest/SharedDocs/Downloads/GTAI/Brochures/Industries/industrie4.0-smart-manufacturing-for-the-future-enpdf?v=8>.
- ISO/IEC. ISO/IEC 15909-1:2004 (2004). Systems and software engineering -- High-level Petri nets -- Part 1: Concepts, definitions and graphical notation. Disponível em: <<https://www.iso.org/standard/38225.html>>. Acesso em: 3 jan. 2017.
- Jensen, K.; Kristensen, L.M. (2009). Coloured Petri Nets. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 381p.
- Mengru Tu, Ming K. Lim, Ming-Fang Yang. (2018) IoT-based production logistics and supply chain system – Part 1: Modeling IoT-based manufacturing supply chain, *Industrial Management & Data Systems*, Vol. 118 Issue: 1, pp.65-95, <https://doi.org/10.1108/IMDS-11-2016-0503>.
- Murata, T. (1989). Petri Nets: Properties, analysis and applications. *Proceedings of the IEEE*. Piscataway Township, v. 77, n.4, p. 541-580.
- Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/24143/>>. Acesso em: 23 fev. 2018.
- Petri Nets. (2017). Petri Nets Standard - ISO/IEC 15909. Disponível em: <<http://www.petrinets.info/>>. Acesso em: 3 jan. 2017.
- Qu, T., Yang, H. D., Huang, G. Q., Zhang, Y. F., Luo, H., Qin, W. (2012). A case of implementing RFID-based real-time shop-floor material management for household electrical appliance manufacturers. *J. Intell. Manuf.* Vol. 23, pp. 2343–2356.
- Santos, C., Mehraia, A, Barros, A. C., Araújo, M., and Aresc, E. (2017). Towards Industry 4.0: an overview of European strategic roadmaps. *Procedia Manufacturing*, Vol. 13, pp. 972-979.
- Silva, C. E. A. (2017). Desenvolvimento de biblioteca para aplicações de PNRD E PNRD invertida embarcadas em Arduino. 102 f. Monografia de Conclusão de Graduação, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.
- Tavares, J. J. P. Z. S., Murofushi, R. H., Silva, L. H., Silva, G. R. (2017) Petri Net Inside RFID Database Integrated with RFID Indoor Positioning System for Mobile Robots Position Control. In: Proceedings of the International Workshop on Petri Nets and Software Engineering (PNSE'17), pp 157-176, CEUR-WS.org, Zaragoza.
- Tavares, J. J. P. Z. S.; Saraiva, T. A. (2010). Elementary Petri net inside RFID distributed database (PNRD). *International Journal of Production Research*. London, v. 48, n. 9, p. 2563-2582.
- Zhang, Y., Zhang, G., Wang, J., Sun, S., Si, S., and Yang, T. (2014). Real-time information capturing and integration framework of the internet of manufacturing things. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, DOI: 10.1080/0951192X.2014.900874