

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

Frederico Sisconetto Noce

**Uma abordagem para a Modelagem, Análise e
Simulação de processos de negócios
interorganizacionais baseada nas Workflow nets
e na ferramenta CPN Tools**

Uberlândia, Brasil

2017

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

Frederico Sisconetto Noce

**Uma abordagem para a Modelagem, Análise e Simulação
de processos de negócios interorganizacionais baseada
nas Workflow nets e na ferramenta CPN Tools**

Trabalho de conclusão de curso apresentado
à Faculdade de Computação da Universidade
Federal de Uberlândia, Minas Gerais, como
requisito exigido parcial à obtenção do grau
de Bacharel em Ciência da Computação.

Orientador: Stéphane Julia

Universidade Federal de Uberlândia – UFU

Faculdade de Computação

Bacharelado em Ciência da Computação

Uberlândia, Brasil

2017

Aos meus pais
Marcio Antônio Noce e
Célia Ferreira de Assis Sisonetto

Agradecimentos

Agradeço primeiramente aos meus pais pelo apoio e amor que sempre me deram nesta jornada. Por sempre colocarem minha educação em primeiro lugar, e mesmo com tantas dificuldades sempre pensaram na minha formação, tanto pessoal quanto acadêmica.

À minhas irmãs, Déborah e Cristiane, pelo carinho e por sempre me apoiarem, mesmo eu estando tão longe.

À minha namorada Letícia, que sempre está do meu lado e me faz sentir como uma pessoa muito especial.

À um grande amigo, Luan Oliveira, que conheci nesta jornada e a certeza de que sempre poderei contar com ele.

Aos professores que tanto me ensinaram, não apenas nas disciplinas da universidade, mas nos conselhos e conversas pelos corredores.

Ao meu orientador, Prof^o. Dr^o. Stéphane, que me instruiu na execução do projeto. Agradeço por sua paciência, prontidão e por seus conselhos, que eu sei que sempre foram pensando o melhor para mim.

E, finalmente, a Deus, razão de todas as coisas. Aquele na qual eu sei que sempre está do meu lado para me ajudar e me guiar.

Resumo

Este trabalho descreve um estudo sobre modelagem e simulação de parcerias em processos de negócios utilizando tipos de redes de Petri não cíclicos, também chamadas de *Workflow net Interorganizacionais*, e o Simulador de redes de Petri Coloridas CPN Tools. A ideia de se modelar tais parcerias em processos de negócios tem alcançado grande importância nos últimos anos já que, atualmente, formar uma aliança com parceiros de negócios adequados se tornou uma estratégia comum para as empresas se manterem competitivas. A abordagem apresentada neste trabalho também impacta no aproveitamento de recursos humanos e computacionais, na redução de gastos administrativos e na redução dos tempos de processamentos dos pedidos de clientes. Em particular, tratando-se de processos de negócios extensos e complexos, as técnicas apresentadas impactarão diretamente na produtividade e na lucratividade de empresas, e permitirão eventualmente a conquista de novos mercados e/ou parceiros de negócios.

Muitos autores concordam em utilizar as redes de Petri para se produzir modelos de processos de negócios. Tais modelos são então chamados de *Workflow Nets*. No caso de vários parceiros de negócios envolvidos num mesmo objetivo comum, o modelo de processo será uma *Workflow net interorganizational* (várias *Workflow nets* interagindo através de mecanismos de comunicação).

O objetivo do trabalho é modelar, analisar (qualitativamente e quantitativamente) e simular parcerias baseadas em processos de negócios usando o software de simulação CPN Tools. Em particular, os resultados de simulação serão comparados com os resultados produzidos por um método analítico de análise qualitativo e quantitativo de *Workflow net Interorganizacionais* baseado no cálculo dos sequentes da Lógica Linear apresentado em [Passos e Julia \(2016\)](#). Um estudo comparativo entre os resultados derivados do estudo analítico e os resultados de simulação mostrará as vantagens e limitações da abordagem proposta neste trabalho.

Palavras-chave: Redes de Petri, *Workflow Net*, CPN Tools, *Processo de negócio Interorganizational*.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Elementos de uma Rede de Petri	17
Figura 2 – Exemplo de Rede de Petri com Marcação	17
Figura 3 – Exemplo de Sensibilização e Disparos em uma Rede de Petri	18
Figura 4 – Exemplo do Hospital - <i>Workflow net</i>	20
Figura 5 – Workflow net que não é sound	21
Figura 6 – Workflow net para o processo de tratamento de reclamações (AALST; HEE, 2004)	21
Figura 7 – Um exemplo de uma Workflow net Interorganizacional (AALST, 1998a)	23
Figura 8 – Um exemplo de uma Unfolded Workflow net Interorganizacional (AALST, 1998b)	24
Figura 9 – Situação de deadlock para o processo de workflow interorganizacional modelado pela IOWF-net da Figura 8	25
Figura 10 – Disparo em uma Rede de Petri colorida	27
Figura 11 – Interface CPN Tools	28
Figura 12 – Multisets	30
Figura 13 – Função Acumulada da distribuição Uniforme	31
Figura 14 – Gráfico da função densidade para distribuição Exponencial	32
Figura 15 – Criando uma nova rede	36
Figura 16 – Adicionando uma nova página	36
Figura 17 – Modelagem da Workflow Author	37
Figura 18 – Modelagem da Workflow PC	38
Figura 19 – Modelagem da Workflow Author com os lugares de Fusão	39
Figura 20 – Modelagem da Workflow PC com os lugares de Fusão	40
Figura 21 – Modelagem da Workflow Author - Unfolded	42
Figura 22 – Modelagem da Workflow PC - Unfolded	43
Figura 23 – A sound interorganizational workflow	45
Figura 24 – Modelagem no CPN Tools da <i>Workflow interorganizational sound</i> . . .	46
Figura 25 – Paleta de Simulação	47
Figura 26 – Estado de uma simulação do modelo Author	47
Figura 27 – Modelagem da Workflow Author - Uniforme - Não Sound	49
Figura 28 – Modelagem da Workflow PC - Uniforme - Não Sound	50
Figura 29 – Monitor coletor de dados no lugar Final	51
Figura 30 – Modelagem da Workflow Author - Exponencial - Não Sound	54
Figura 31 – Modelagem da Workflow PC - Exponencial - Não Sound	55
Figura 32 – Modelagem da Workflow PC - Exponencial - Sound	67
Figura 33 – Modelagem da Workflow Author - Exponencial - Sound	68

Figura 34 – Relatório da simulação replicada - Não Sound - Uniforme	69
Figura 35 – Relatório da simulação replicada - Não Sound - Exponencial	69
Figura 36 – Relatório da simulação replicada - Sound - Uniforme	70
Figura 37 – Relatório da simulação replicada - Sound - Exponencial	70

Lista de tabelas

Tabela 1 – Operadores Básicos Standard ML	29
Tabela 2 – Resultados	55

Lista de abreviaturas e siglas

TI	Tecnologia da Informação
CPN	Colored Petri Nets
IOWF-net	WorkFlow net Interorganizacional
LWF-net	Local WorkFlow Net
ICP	Input Communication Place
OCP	Output Communication Place
U(IOWF-net)	Unfolded WorkFlow Net Interorganizacional
RPC	Rede de Petri Colorida

Sumário

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	Objetivos	12
1.1.1	Objetivos Específicos	12
1.2	Justificativa	13
2	METODOLOGIA	14
3	REFERENCIAL TEÓRICO	16
3.1	Redes de Petri	16
3.1.1	Definição Formal	16
3.1.2	Elementos gráficos de uma Rede de Petri	16
3.1.3	Disparo de uma Transição	17
3.2	Workflow nets	18
3.2.1	Definição	18
3.2.2	Modelagem de um Processo	19
3.2.3	Soundness	20
3.2.4	Relaxed Soundness	20
3.3	Workflow nets Interorganizacionais	21
3.3.1	Definição de uma <i>IOWF-net</i>	22
3.3.2	<i>Soundness</i> para IOWF-nets	24
3.4	Redes de Petri Coloridas	25
3.4.1	Definição Formal	26
3.4.2	Disparo de uma Transição	26
3.5	CPN Tools	27
3.5.1	Linguagem CPN	28
3.5.2	Tipos e Operadores	28
3.5.3	Conjunto de Cores	29
3.5.4	Marcações	29
3.6	Distribuição de probabilidade	30
3.6.1	Distribuição uniforme	30
3.6.2	Distribuição Exponencial	31
3.7	Trabalhos Relacionados	32
4	MODELAGEM DE UM PROCESSO DE NEGÓCIO INTERORGANIZACIONAL	35
4.1	Edição dos processos no CPN Tools	35

4.2	Adicionando marcações e Definindo Tipos	39
5	ANÁLISE QUALITATIVA : VERIFICAÇÃO DA PROPRIEDADE SOUNDNESS	41
5.1	Implementação do modelo de análise	41
5.2	Metodologia para análise da propriedade Soundness	41
5.3	Relatório State Space	42
6	SIMULAÇÃO: ANÁLISE QUANTITATIVA	47
6.1	Implementação do modelo temporizado no CPN Tools	48
6.2	Metodologia para Análise Quantitativa	48
6.3	Tempo de execução	52
7	CONSIDERAÇÕES FINAIS	56
	REFERÊNCIAS	58
	ANEXOS	60
	ANEXO A – RELATÓRIO STATE SPACE MODELO NÃO SOUND	61
	ANEXO B – RELATÓRIO STATE SPACE MODELO SOUND	64
	ANEXO C – MODELAGEM - EXPONENCIAL - SOUND NO CPN TOOLS	67
	ANEXO D – RELATÓRIO SIMULAÇÃO - NÃO SOUND	69
	ANEXO E – RELATÓRIO SIMULAÇÃO - SOUND	70

1 Introdução

Nos tempos atuais, a área de Tecnologia da Informação (TI), principalmente no setor da indústria de desenvolvimento de Software, tem crescido bastante. Como resposta a isso, uma melhor qualificação das empresas tem sido um ponto muito relevante a ser discutido. Uma melhor organização empresarial em relação a seu processo de negócio pode ser a chave para se obter tal qualificação empresarial.

Um processo corresponde a uma série de passos que são executados para entregar um produto ou serviço. Pode ser visto também como um conjunto de ações coerentes realizadas por papéis colaborativos, para atingir uma meta. Ou seja, é um conjunto completo e dinamicamente coordenado de atividades colaborativas e transacionais que entrega um valor ao cliente (SANTOS, 2014). Em particular, é o processo de negócio que especifica o curso das ações e representa como a empresa funciona (como ela produz seus produtos e serviços). De acordo com Aalst e Hee (2004), um processo de *Workflow* corresponde à automação total ou parcial de um processo de negócio. Os processos de *Workflow* representam então as sequências de atividades que devem ser executadas em uma organização para tratar casos específicos e alcançar uma meta bem definida.

Com a tecnologia em constante crescimento, cada vez mais as empresas estão adotando métodos ou sistemas para gerenciar seus processos de negócios, a fim de tornar os sistemas administrativos cada vez mais competitivos no mercado. As ferramentas e tecnologias utilizadas atualmente, principalmente as que são implementadas em na forma de *Software*, estão gradativamente se destacando em relação às funcionalidades e praticidades que proporcionam melhorias às organizações. De acordo com Aalst (2010), a área de Gerenciamento de Processos de Negócio, do inglês *Business Process Management* (BPM), tem recebido atenção considerável nos últimos anos em razão de seu potencial em aumentar significativamente a produtividade das organizações e a economia de gastos.

De acordo com Lomazova (2010), *workflow* é a automação de um processo de negócio, onde a noção de negócio é entendida de forma ampla, incluindo tanto o ambiente organizacional quanto os sistemas computacionais. A modelagem de processos de *workflow* é em particular a primeira e mais importante fase no ciclo de vida do gerenciamento de processos de negócios.

O gerenciamento de processos de negócios constitui uma atividade na qual uma organização empresarial pode se beneficiar. Através de uma modelagem dos fluxos de atividades, uma empresa pode aumentar a produtividade e reduzir custos, o que contribui para que uma empresa se mantenha firme na disputa do mercado de trabalho. Quando se depara com alguns processos com altos níveis de complexidade e tamanho, tal geren-

ciamento se torna essencial para uma melhor obtenção de resultados e uma minimização de erros de gestão.

De todas as notações usadas para a modelagem de processos de *Workflow*, as redes de Petri são particularmente bem adaptadas, já que conseguem representar naturalmente os roteiros básicos presentes em processos de *Workflow* (AALST; HEE, 2004). Além disso, as redes de Petri podem ser usadas para especificar características de tempo real em sistemas de gerenciamento de *Workflow* assim como mecanismos de alocação de recursos, além de serem construídas a partir de uma notação formal que permite a elaboração de algoritmos usados para a verificação de certas boas propriedades dos sistemas modelados.

1.1 Objetivos

O objetivo deste trabalho é propor um estudo sobre a modelagem e a simulação de processos de *Workflow Interorganizacionais* utilizando as redes de Petri e a ferramenta de simulação profissional chamada *CPN Tools*. A princípio, vários processos serão modelados em tal ferramenta para representar a coordenação das ações de diversos processos de negócio pertencentes a diversas instituições ou organizações a fim de atingir um objetivo em comum. Tal representação esquematizará as tarefas e etapas que compõem os processos, além especificar os mecanismos de comunicação utilizados para coordenar as atividades distribuídas entre diversos processos. Também, a partir dos modelos produzidos, e utilizando as ferramentas disponíveis no *CPN Tools*, diversos tipos de análises (qualitativas e quantitativas) serão produzidos para avaliar a corretude dos processos desenhados, bem como estabelecer certos índices de desempenho do sistema modelado como um todo.

Em se tratando de *Workflows interorganizacionais*, como mencionado acima, é essencial em particular a verificação da propriedade *Soundness* de processos de *Workflow*, pois como disse Aalst (1998a), tal propriedade garante que caso uma instância de um processo comece a ser tratada, o tratamento desta deverá ser finalizado corretamente; quando este tratamento for finalizado, não poderá haver nenhuma pendência não tratada no processo para tal instância, e não devem haver também tarefas a serem executadas para nenhuma instância/caso do processo de *Workflow*, ou seja, não existirão tarefas “mortas” no processo verificado.

1.1.1 Objetivos Específicos

Entre os objetivo específicos que este estudo visa alcançar, estão:

1. Introdução do software *CPN Tools* ao leitor e apresentação de como são produzidos os modelos e as simulações através do mesmo;

2. Modelagem de uma *Workflow net interorganizational sound* que corresponde a um exemplo de submissão de um artigo científico a um comitê de programa;
3. Análise qualitativa para a verificação da propriedade *sound* que vai usar a ferramenta *State Space* (geração automática do grafo de estados do modelo), e análise quantitativa para avaliação do desempenho dos casos a serem executadas neste processo baseada em simulação (replicação de cenários aleatório e avaliação dos valores médios) da *Workflow net interorganizational sound* modelada;
4. Estudo comparativo entre os resultados produzidos por um método analítico baseado no cálculo dos sequentes da Lógica Linear e os resultados experimentais produzidos pelas simulações executadas na ferramenta *CPN Tools*;

1.2 Justificativa

É indiscutível o fato de que hoje a tecnologia influencia muito o mercado de trabalho como um todo. E tal influência pode ser o diferencial para que uma determinada empresa possa atingir sucesso ou não. Pensando nisso, uma empresa que tenha os seus processos de negócios definidos bem definidos, parcialmente automatizados e corretamente gerenciados, com certeza possui maiores chances de se destacar no mercado.

Além disso, para [Aalst \(2010\)](#), os sistemas de *Workflow interorganizacionais* desempenham um papel fundamental em parcerias de negócio, trazendo assim em discussão o uso de processos distintos que colaboram com a realização de uma meta comum. O autor também destaca que, atualmente, formar uma aliança com parceiros de negócios adequados é uma estratégia comum para as empresas se manterem competitivas, oferecendo uma gama mais ampla de produtos e serviços aos seus clientes.

O objetivo essencial deste trabalho corresponde então em analisar através de modelos que irão representar processos de negócios distribuídos entre diversas organizações, informações relacionadas com a corretude e o desempenho de processos de *Workflow Interorganizacionais* já existentes ou que serão implantados futuramente em sistemas administrativos de empresas.

2 Metodologia

A etapa inicial do trabalho constituirá na realização de um estudo da literatura, através da leitura de artigos sobre o assunto em questão. Incluindo uma dissertação de pós-graduação de [Passos e Julia \(2016\)](#) que descreve uma metodologia baseada em lógica linear para verificação de processos de *Workflow Interorganizacionais*, na qual a autora descreve quatro métodos baseados na Lógica Linear para verificação de processos de *Workflow Interorganizacionais* e avalia várias propriedades, como a correção *Soundness*, *Relaxed Soundness* e *Weak Soundness*. Dominando os fundamentos sobre redes de Petri, *Workflow Interorganizacionais* e o funcionamento do software *CPN Tools*, necessários para o desenvolvimento do projeto, torna-se então possível a realização de um trabalho coerente e com resultados objetivos em função do estado atual do conhecimento na área.

Logo em seguida, o método para a análise das *Workflow Interorganizacionais* consistirá na criação de modelos baseados em Redes de Petri Coloridas no *CPN Tools* e na utilização das ferramentas disponibilizadas pelo *Software* para o levantamento de resultados estatísticos das redes para a verificação de certas propriedades. Com tais resultados, faremos a comparação dos resultados obtidos para os mesmos tipos de modelos usando uma abordagem puramente analítica.

Para alcançar tais objetivos, dois tipos de análise serão realizadas:

1. Análise qualitativa, usando as funcionalidades do *CPN Tools* de tipo State Space (geração de grafos de marcações), na qual o *software* analisará as eventuais partes mortas dos processos;
2. Análise quantitativa baseada em simulações repetidas, baseada num modelo temporizado estocástico que mostrará o desempenho global do sistema assim como a existência de possíveis gargalhos nos fluxos de casos a serem tratados;

As etapas para a execução do trabalho estão descritas a seguir:

1. Criação de modelos de *Workflow Interorganizacionais* no *CPN Tools*;
2. Verificação da propriedade *Soundness* considerando a construção e análise de grafos das marcações acessíveis correspondentes aos modelos produzidos;
3. Criação de modelos temporizados e simulações repetidas para uma avaliação de desempenho dos casos executadas nos processo;

4. Estudos comparativos entre os resultados produzidos pelas simulações e os resultados obtidos por um método analítico baseado no cálculo dos sequentes da Lógica Linear.

3 Referencial Teórico

3.1 Redes de Petri

A teoria das Redes de Petri foi proposta por Carl Adam Petri em sua tese de doutorado (PETRI, 1962). Desde então, o estudo e uso das Redes de Petri tem crescido consideravelmente. Murata (1989) apresenta uma revisão histórica e bibliográfica extensa das Redes de Petri.

De acordo com Murata (1989), as Redes de Petri clássicas são um grafo bipartido direcionado com dois tipos de nós denominados lugares e transições, conectados via arcos direcionados. As conexões entre dois nós do mesmo tipo não é permitida (MURATA, 1989). Os lugares são representados por círculos e as transições por retângulos ou barras.

Uma Rede de Petri é um modelo matemático utilizado para representar sistemas constituídos por eventos discretos. Em particular, é possível, com uma Rede de Petri, especificar e visualizar o comportamento de um sistema com características de paralelismo, concorrência, sincronismo e compartilhamento de recursos (DAVID; ALLA, 2005).

3.1.1 Definição Formal

Uma Rede de Petri (RP), com marcação inicial, é formalmente definida como uma quintupla $= (P, T, I, O, M_0)$, onde:

1. $P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$ é um conjunto finito de lugares;
2. $T = \{t_1, t_2, \dots, t_n\}$ é um conjunto finito de transições;
3. $I : P \times T \rightarrow N$ é uma relação de entrada que define arcos que ligam os lugares as transições;
4. $O : T \times P \rightarrow N$ é uma relação de saída que define arcos que ligam as transições aos lugares;
5. $M_0 : P \rightarrow N$ é a marcação inicial.

3.1.2 Elementos gráficos de uma Rede de Petri

Um lugar p_i é representado por um círculo, uma transição t_j é representada por uma barra ou retângulo e uma marcação, ficha ou *token* é representada por um ponto preto. Os arcos são direcionados e podem ligar tanto lugares a transições quanto o contrário. A Figura 1 apresenta os elementos gráficos de uma Rede de Petri.



Figura 1 – Elementos de uma Rede de Petri

A Figura 2 representa uma Rede de Petri com 4 lugares, 4 transições e 8 arcos. O lugar p_3 é chamado lugar de entrada para a transição t_4 pois existe um arco saindo de p_3 e chegando a t_4 . O lugar p_2 é chamado lugar de saída da transição t_1 pois existe um arco saindo de t_1 e chegando a p_2 . Os lugares p_1 e p_3 contêm fichas.

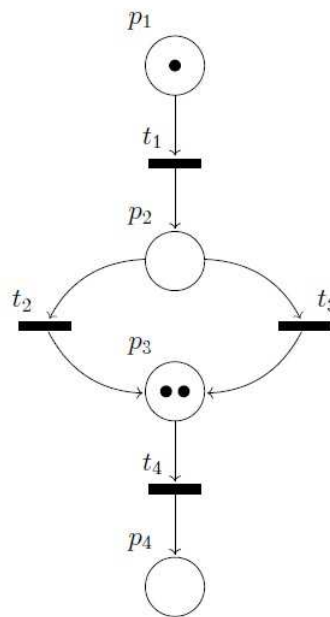


Figura 2 – Exemplo de Rede de Petri com Marcação

A marcação em uma Rede de Petri está relacionada com a quantidade de fichas que um lugar possui que será sempre zero ou um valor estritamente positivo. O número de fichas pode variar de acordo com a ocorrência de certos eventos durante a execução da rede.

3.1.3 Disparo de uma Transição

A transição é um componente ativo na rede e é onde ocorre o chamado **disparo**. Uma transição pode ser disparada se cada um dos seus lugares de entrada conter pelo menos uma ficha (*token*). A transição é, então, dita **sensibilizada**.

Disparar uma transição t_j significa consumir uma ficha de cada lugar de entrada de t_j e então produzir uma ficha em cada lugar de saída da transição. A Figura 3 mostra o disparo da transição t_1 quando sensibilizada. Pode-se observar que na Figura 3a o lugar p_2 não contém nenhuma ficha; assim a transição t_1 não pode ser disparada.

Na Figura 3b a transição t_1 está sensibilizada já que todos os lugares de entrada contêm pelo menos uma ficha; dessa forma, após o disparo de t_1 a Figura 3c é gerada, ou seja, é consumida uma ficha de cada lugar de entrada e gerada uma ficha em cada lugar de saída. Pode-se notar que o lugar p_5 contém duas fichas; isso ocorre porque antes do disparo o mesmo já continha uma ficha.

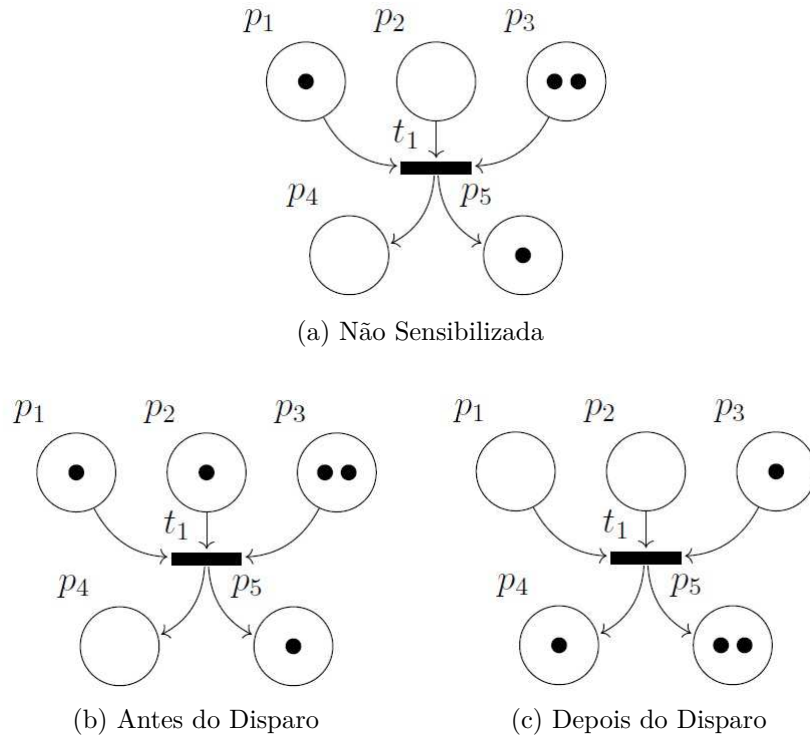


Figura 3 – Exemplo de Sensibilização e Disparos em uma Rede de Petri

3.2 Workflow nets

3.2.1 Definição

Workflow é um termo que em português significa fluxo de trabalho. Contextualizando para a área tecnológica, *workflow* consiste na utilização de ferramentas computacionais para auxiliar nos passos necessários para a execução de um processo de negócio (REZENDE, 2013).

Um processo de *workflow* define quais tarefas de um processo de negócio precisam ser executadas e em qual ordem a execução deve ocorrer. Além disso, de acordo com Aalst (1998a), processos de *workflow* são baseados em casos, isto é, cada parte do trabalho é executada para um caso específico. Modelar um processo de *workflow* em termos de uma Rede de Petri é bem direto: transições são componentes ativos e modelam as tarefas, lugares são componentes passivos e modelam as condições (pré e pós), e as fichas modelam

os casos (AALST, 1998a; AALST; HEE, 2004). Assim, uma Rede de Petri que modela um processo de *workflow* é denominada *Workflow net* (AALST, 1998a).

Quando as Redes de Petri são utilizadas para modelar um *workflow*, obtém-se então as *workflow nets*. Entretanto, de acordo com Aalst e Hee (2004), uma Rede de Petri RN é uma *workflow net* se, e somente se:

1. RN contém dois lugares especiais: *Início* e *Fim*, onde *Início* é o lugar de entrada, ou seja, não há arcos chegando nele, e *Fim* é o lugar de saída, ou seja não há arcos saindo dele.
2. Se RN contém uma transição t_j que liga o lugar *Fim* ao lugar *Início* então a Rede de Petri é fortemente conexa, ou seja, para quaisquer par de nós x e y existe um caminho de x até y Aalst (1998a).

Os elementos de uma *workflow net* são os mesmos elementos da Rede de Petri, apresentados na Figura 1. Porém, neste contexto, cada elemento possui um significado que corresponde aos elementos de um processo de negócio.

Com os lugares estão relacionadas as condições encontradas no processo e com as transições estão relacionadas as tarefas; além disso, uma ficha no lugar *Início* representa um caso a ser tratado pelo processo e uma ficha no lugar *Fim* representa um caso já tratado.

3.2.2 Modelagem de um Processo

Para exemplificar a modelagem de um processo em *workflow net*, será considerado um exemplo simplificado apresentado em AALST W. van der; STAHL (2011). A Figura 4 mostra a *workflow net* que modela esse processo que representa a automação da estrutura administrativa de um hospital. Para este processo, foram definidas cinco tarefas a serem executadas.

1. *det_{req}*: determinar os requisitos funcionais que serão utilizados;
2. *comp_{hw}*: fazer a compra dos equipamentos (*hardware*) a serem utilizados;
3. *comp_{sw}*: fazer a compra do programa (*software*) a ser utilizado;
4. *integr*: realizar a instalação e integração do hardware com o *software*;
5. *testes*: realizar os testes para verificar o sistema implantado.

A primeira fase do processo consiste em estabelecer os requisitos funcionais que serão utilizados durante a implantação do sistema. Em seguida as duas tarefas de compras podem ser realizadas simultaneamente. A próxima tarefa, a integração, só pode ser realizada quando as tarefas de compras forem concluídas. E por fim, os testes devem ser realizados, para então, finalizar o processo.

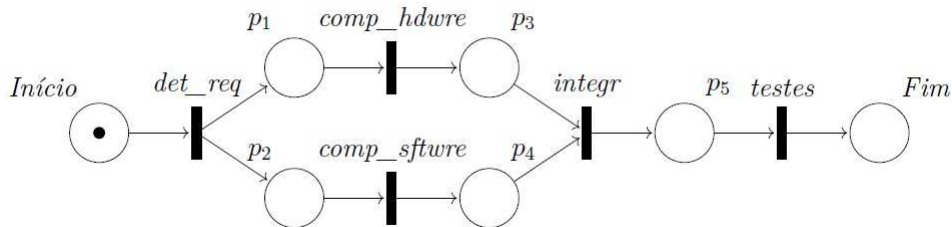


Figura 4 – Exemplo do Hospital - *Workflow net*

3.2.3 Soundness

Soundness é um importante critério de corretude, um critério de verificação de correção definido para uma *workflow net*. Uma *workflow net* é dita *sound* se, e somente se, ela satisfaça as três proposições a seguir:

1. para cada ficha contida no lugar *Início* apenas uma ficha deve aparecer no lugar *Fim*;
2. se uma ficha aparecer no lugar *Fim* então, considerando esse caso, todos os outros lugares devem estar vazios;
3. não existe nenhuma transição "morta" na *workflow net*, ou seja, todas as transições em determinado momento devem ser sensibilizadas.

A Rede de Petri da Figura 4 é um exemplo de *workflow net sound*. A Figura 5 mostra uma *workflow net* que não é *sound*. Observe que o lugar 5 irá conter uma ficha ao final da execução do processo, contrariando o item 2 das condições para a propriedade *soundness*.

3.2.4 Relaxed Soundness

Um processo de *workflow* modelado por uma *Workflow net* $RN = (P, T, F)$ é *Relaxed Sound* se, e somente se, cada transição está em uma sequência de disparo que inicia na marcação i e finaliza na marcação o .

Para ilustrar o mapeamento de processos de workflow em Workflow nets, considere-se o processo de tratamento de reclamações apresentado em Aalst e Hee (2004):

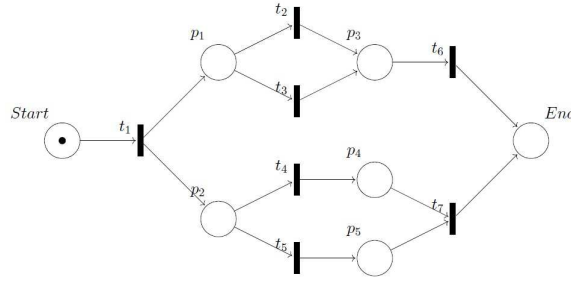


Figura 5 – Workflow net que não é sound

"An incoming complaint first is recorded. Then the client who has complained and the department affected by the complaint are contacted. The client is approached for more information. The department is informed of the complaint and may be asked for its initial reaction. These two tasks may be performed in parallel – that is, simultaneously or in any order. After this, the data are gathered and a decision is taken. Depending upon the decision, either a compensation payment is made or a letter is sent. Finally, the complaint is filed (AALST; HEE, 2004)."

A *Workflow net* mostrada na Figura 6 não é *Relaxed Sound*, pois o fato de haver fichas remanescentes na rede quando uma ficha atinge o lugar de término é levado em consideração. Por exemplo, considerando as sequências de disparo $\sigma_1 = \text{record, contact_client, contact_department, collect, assess, pay, file}$ e $\sigma_2 = \text{record, contact_client, contact_department, collect, assess, send_letter, file}$ tem-se que cada transição $t \in T$ está em uma sequência de disparo. No entanto, quando estas sequências de disparo finalizam, ou sejam, o lugar 0 é atingido, há uma ficha no lugar c_3 , para ambas as sequências.

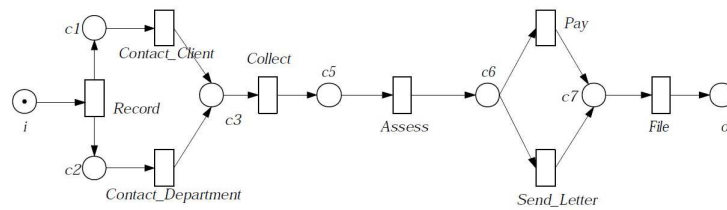


Figura 6 – Workflow net para o processo de tratamento de reclamações (AALST; HEE, 2004)

3.3 Workflow nets Interorganizacionais

Uma *Workflow net Interorganizacional*, do inglês *IOWF-net* (Interorganizacional Workflow net), é uma Rede de Petri que modela um processo de *workflow interorganizacional*. Um processo de *workflow interorganizacional* é um processo de *workflow* global que tem parceiros de negócio envolvidos (AALST, 1998a). Cada parceiro tem seu pró-

prio processo de *workflow* local. Assim, um processo de *workflow interorganizacional* é composto por pelo menos dois processos de *workflow* locais.

Desta forma, de acordo com Aalst (1998a), uma *IOWF-net* é composta por, pelo menos, duas *WorkFlow nets* locais, do inglês *Local WorkFlow net (LWF-net)*. O processo de *workflow* global consiste de processos de *workflow* locais e de uma estrutura de comunicação síncrona (fusão de transições) e assíncrona (lugares de comunicações).

Na presente pesquisa, o mecanismos de comunicação síncronos não serão considerados, uma vez que considera-se que cada parceiro envolvido controla seu próprio processo. Assim, somente as comunicações assíncronas, que correspondem a troca de mensagens entre os processos de *workflow* locais, serão consideradas. Na sequência, as *WorkFlow nets interorganizacionais* consideradas neste trabalho são definidas. É relevante destacar que esta é uma adaptação da definição apresentada por Aalst (1998a).

3.3.1 Definição de uma *IOWF-net*

Uma *WorkFlow net Interorganizacional (IOWF-net)* é uma tupla $IOWF - net = \{PN_1, PN_2, \dots, PN_n, P_{AC}, AC\}$, onde:

1. $n \in \mathbb{N}$ é o número de LWF-nets;
2. para cada $k \in \{1, \dots, n\}$: PN_K é uma *WorkFlow net* com lugar de início i_k e lugar de término o_k ;
3. para cada $k, l \in \{1, \dots, n\}$: se $k \neq l$, então $(P_k \cup T_k) \cap (P_l \cup T_l) \neq \emptyset$;
4. $T^* = U_{k \in \{1, \dots, n\}} T_k$, $P^* = U_{k \in \{1, \dots, n\}} P_k$, $F^* = U_{k \in \{1, \dots, n\}} F_k$ (relações entre os elementos das LWF-nets)
5. P_{AC} é o conjunto de elementos de comunicação assíncrona (lugares de comunicação);
6. $AC \subseteq P_{AC} \times P(T^*) \times P(T^*)$ é a relação de comunicação assíncrona.

Cada elemento de comunicação assíncrona corresponde a um lugar em P_{AC} e a relação especifica um conjunto de transições de entrada e um conjunto de transições de saída para cada elemento de comunicação assíncrona (AALST, 1998a). Assim, considerando uma transição t , um lugar de comunicação assíncrona p pode ser visto como um lugar de comunicação de entrada (do inglês ICP, *Input Communication Place*) ou um lugar de comunicação de saída (do inglês OCP, *Output Communication Place*) da transição t .

Para ilustrar os conceitos definidos acima, considere o processo de *workflow interorganizacional* apresentado em Aalst (1998a), que modela um processo que precede a apresentação de um artigo em uma conferência.

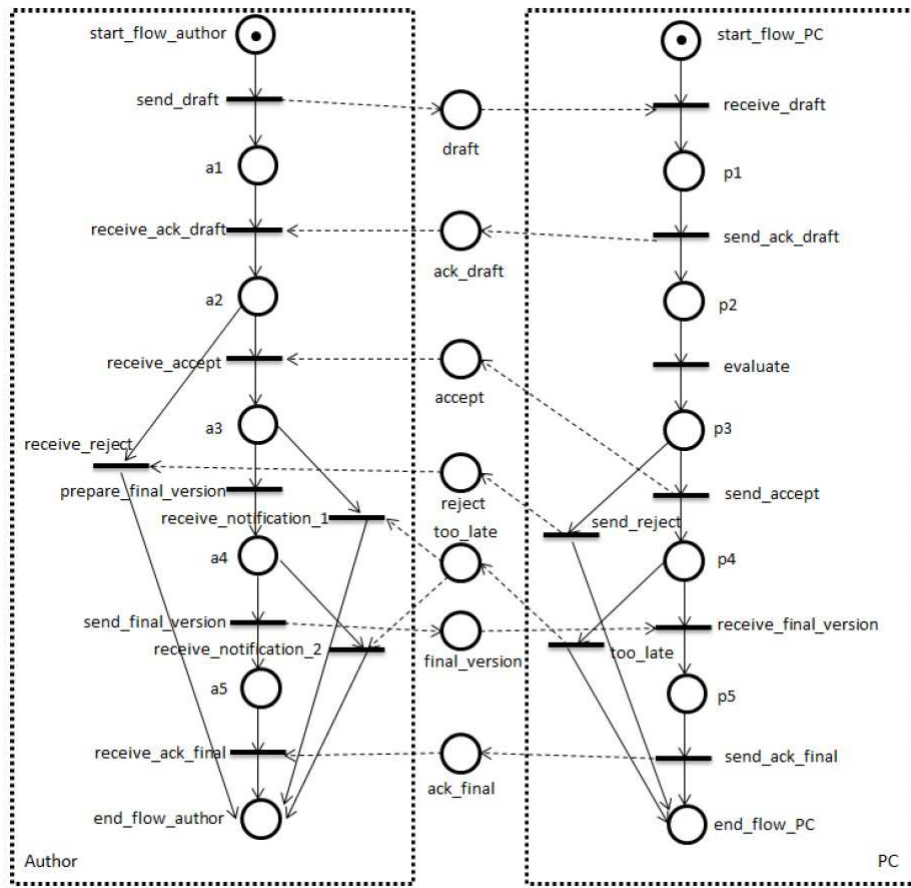


Figura 7 – Um exemplo de uma WorkFlow net Interorganizacional (AALST, 1998a)

A Figura 7 mostra a IOWF-net que modela este processo. Esta IOWF-net possui duas LWF-nets *Author* e *PC*. Cada uma destas LWF-nets possui um lugar de início e um lugar de término. No caso da LWF-net *Author*, o lugar de início é *start_flow_author* e o lugar de término é *end_flow_author*. Na LWF-net *PC*, o lugar de início e término são *start_flow_PC* e *end_flow_PC*, respectivamente. Os lugares *draft*, *ack_draft*, *accept*, *reject*, *too_late*, *final_version* e *ack_final* são os lugares de comunicação.

No contexto dos processos de *workflow interorganizacionais*, também é desejável que o critério de correção *Soundness* seja verificado. Conforme mostra Aalst (1998a), o fato de cada LWF-net ser *Sound* não garante que o modelo global será *Sound*. Também é possível ter um processo de *workflow interorganizacional* globalmente *Sound* mas não localmente *Sound*. Com o objetivo de solucionar estes problemas, Aalst (1998a) define que a noção global do critério de correção *Soundness* é baseada na representação de uma IOWF-net através de uma *WorkFlow net*. Assim, Aalst (1998a) define a *unfolded net*, isto é, a *Unfolded Interorganizational WorkFlow Net* ($U(IOWF-net)$). Em uma $U(IOWF-net)$, todas as LWF-nets são inseridas em um processo de *workflow* simples, considerando uma transição de início t_i e uma transição de término t_o . Um lugar de início global i e um lugar de término global o precisam ser adicionados para respeitar a estrutura básica de

uma *WorkFlow net* simples e os elementos de comunicação assíncrona são mapeados em lugares ordinários. A $U(\text{IOWF-net})$ da Figura 7 é mostrada na Figura 8.

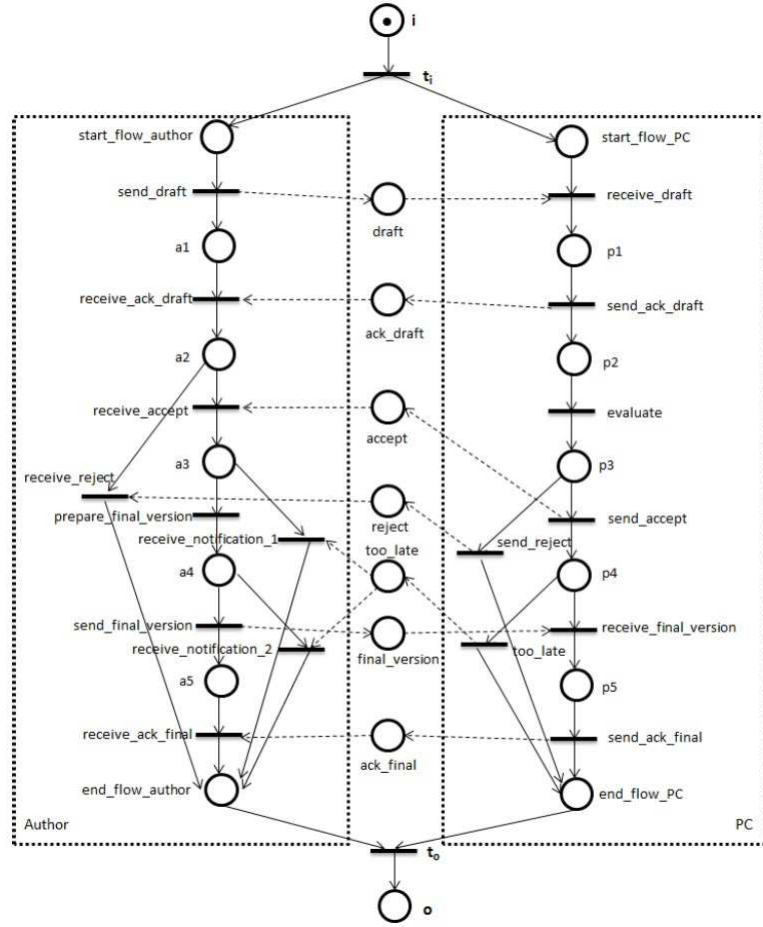


Figura 8 – Um exemplo de uma Unfolded WorkFlow net Interorganizacional (AALST, 1998b)

3.3.2 Soundness para IOWF-nets

Uma *WorkFlow net Interorganizacional* (IOWF-net) é *Sound* se, e somente se, for localmente *Sound* e globalmente *Sound*. Uma IOWF-net é localmente *Sound* se, e somente se, cada uma das suas *WorkFlow nets* locais (LWF-nets) PN_k é *Sound*. Uma IOWF-net é globalmente *Sound* se, e somente se, a $U(\text{IOWF-net})$ é *Sound*.

Considerando a IOWF-net mostrada na Figura 7, as LWF-nets *Author* e *PC* são ambas *Sound*. Entretanto a $U(\text{IOWF-net})$ não é *Sound*. Portanto, a IOWF-net não satisfaz o critério de correção *Soundness*. É fácil observar que se a transição *too_late* da LWF-net *PC* é disparada e as transições *prepare_final_version* e *send_final_version* da LWF-net *Author* são disparadas, as mensagens *too_late* e *final_version* se entrelaçam, levando a um estado de *deadlock* com uma ficha no lugar *a5* e as duas mensagens que nunca serão recebidas (uma ficha no lugar *too_late* e uma ficha no lugar *final_version*), conforme ilustrado na Figura 9.

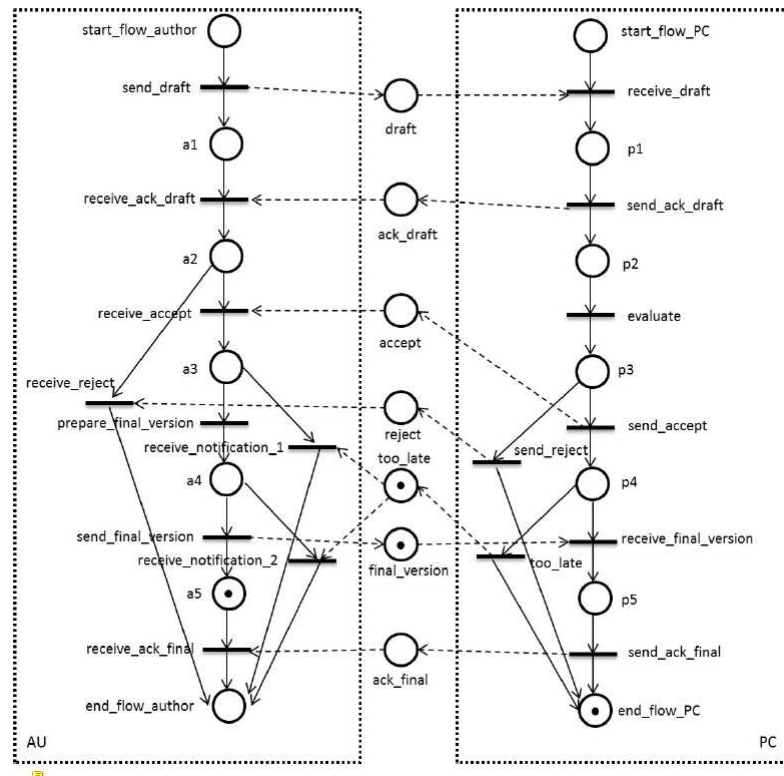


Figura 9 – Situação de deadlock para o processo de workflow interorganizacional modelado pela IOWF-net da Figura 8

3.4 Redes de Petri Coloridas

Embora as Redes de Petri sejam suficientes para modelar o comportamento de um sistema, elas apresentam três limitações significativas:

1. *Tamanho excessivo*: as Redes de Petri apresentam uma tendência a se tornar excessivamente grandes para determinados sistemas, dificultando a interpretação e entendimento da rede e também aumentando o tempo da modelagem.
2. *Poder expressivo limitado*: existem situações relacionadas a processos de negócios que Redes de Petri comuns não conseguem modelar, como por exemplo, gerenciar recursos de diferentes tipos.
3. *Modelagem de tempo não explícita*: apesar das Redes de Petri ilustrarem a dependência, paralelismo e simultaneidade de eventos, não se sabe ao certo a duração de uma operação ou exatamente quando um evento ocorre.

Devido às limitações encontradas nas Redes de Petri ordinárias, com o passar do tempo foram estudadas algumas extensões que quando aplicadas as redes de Petri procuram solucionar as deficiências apresentadas.

A Rede de Petri colorida é uma Rede de Petri estendida na qual existe distinção entre as fichas, permitindo que elas sejam individualizadas. Isso é feito através da atribuição de cores às fichas. As cores podem representar padrões, números inteiros, conjuntos de etiquetas ou tipos de dados complexos.

Para cada lugar são atribuídos tipos correspondentes ao conjunto de cores das fichas que podem pertencer ao mesmo. Os arcos possuem funções, pois para cada maneira de se disparar uma transição é necessário mostrar quais cores de *tokens* serão retirados e quais serão colocados no lugar de saída da transição.

As transições de uma Rede de Petri colorida podem conter uma expressão do tipo *booleano*, que "protege" a transição e decide se ela será ou não disparada em função do valor dos atributos contidos nas cores das fichas.

A finalidade principal de uma Rede de Petri colorida é a redução do modelo. Já que marcas distintas podem representar diferentes processos ou recursos numa mesma sub-rede (BORGES, 2008).

O CPN Tools é, então, um software que oferece as funcionalidades de edição, simulação, análise de espaço dos estados e análise de performance de um modelo CPN JENSEN, KRISTENSEN e WELLS (2007a).

3.4.1 Definição Formal

Uma Rede de Petri colorida (RPC), em CARDOSO J.; VALETTE (1997), é formalmente definida como uma sêxtupla $RPC = (P, T, C_{or}, C_{sc}, W, M_0)$, onde:

1. $P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$ é um conjunto finito de lugares;
2. $T = \{t_1, t_2, \dots, t_n\}$ é um conjunto finito de transições;
3. C_{or} é um conjunto finito de cores;
4. $C_{sc} : P \cup T \rightarrow \wp(C_{or})$ é a função subconjunto de cores que a cada lugar e a cada transição associa um subconjunto de Cor;
5. $W(p, t) : C_{sc}(t) \times C_{sc}(p) \rightarrow N$ é uma função de incidência (equivalente a $C = O - I$);
6. $M_0(p) : C_{sc}(p) \rightarrow N$ é a marcação inicial, que associa para cada lugar e para cada cor possível neste lugar, um número de fichas.

3.4.2 Disparo de uma Transição

Considerando as extensões adicionadas, a Rede de Petri colorida possui algumas diferenças quanto à sensibilização e ao disparo de uma transição de uma rede de Petri clássica.

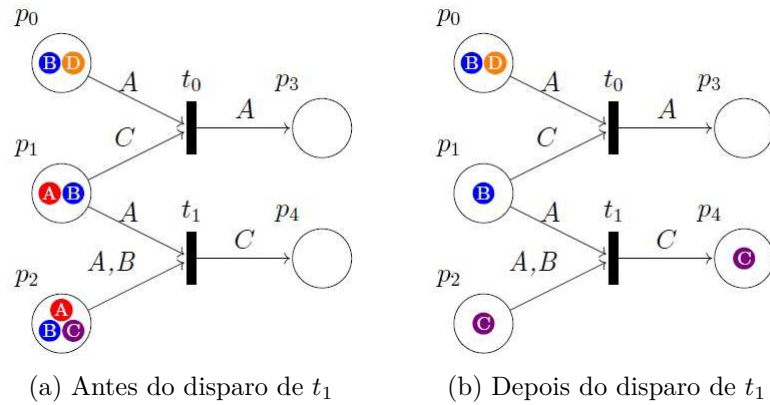


Figura 10 – Disparo em uma Rede de Petri colorida

A Figura 10 ilustra uma Rede de Petri colorida antes e depois do disparo de uma de suas transições. Nessa rede, a transição t_0 não está sensibilizada. Embora os lugares de entrada da transição t_0 contenham fichas do mesmo tipo (cor), os arcos que ligam os lugares à transição exigem fichas de outro tipo. Observe que os arcos exigem fichas do tipo A e C mas os lugares de entrada não contêm essas fichas. Dessa forma, para a transição t_0 ser habilitada seria necessário ter no lugar p_0 pelo menos uma ficha do tipo A e pelo menos uma ficha do tipo C .

A transição t_1 , por outro lado, está sensibilizada porque os lugares de entrada satisfazem as condições exigidas pelos arcos, já que o lugar p_1 contém pelo menos uma ficha tipo A e o lugar p_2 contém pelo menos uma ficha dos tipos A e B .

Portanto, a Figura 10b mostra a Rede de Petri depois do disparo da transição t_1 . Os *tokens* (tipo A e tipo B) exigidos pelas condições dos arcos de entrada são consumidos e um *token* (tipo C) determinado pelo arco de saída é produzido no lugar de saída.

3.5 CPN Tools

O *CPN Tools*, (TOOLS, 2015), é uma ferramenta de força industrial para a construção e análise de modelos CPN (Coloured Petri Nets) (FERNANDES; TJELL; JORGENSEN, ; MORTENSEN, 2000). Utilizando o *CPN Tools* é possível investigar o comportamento de um sistema modelado utilizando algoritmos para verificar propriedades e simulações de tipo Monte Carlo, para conduzir a análise de desempenho. A simulação Monte Carlo consiste na replicação de um mesmo cenário com tempo de serviços aleatórios e estudo estatístico dos valores médios obtidos com cálculo dos intervalos de confiança. O *CPN Tools* é, então, um software que oferece as funcionalidades de edição, simulação, análise de espaço dos estados e análise de performance de um modelo CPN (JENSEN; KRISTENSEN; WELLS, 2007b).

Ao abrir o software, apenas a barra esquerda está visível. Clicando com o botão direito do *mouse* é possível criar uma nova rede; dessa forma a aba (janela) *New Page* é criada.

Para utilizar as paletas com as ferramentas, é necessário escolhê-las na barra lateral esquerda e arrastá-las para o centro da janela principal do programa. A Figura 11 mostra a interface gráfica do programa com uma nova janela de criação e com as paletas *Create*, *Simulation* e *Style* arrastadas para o centro da tela.

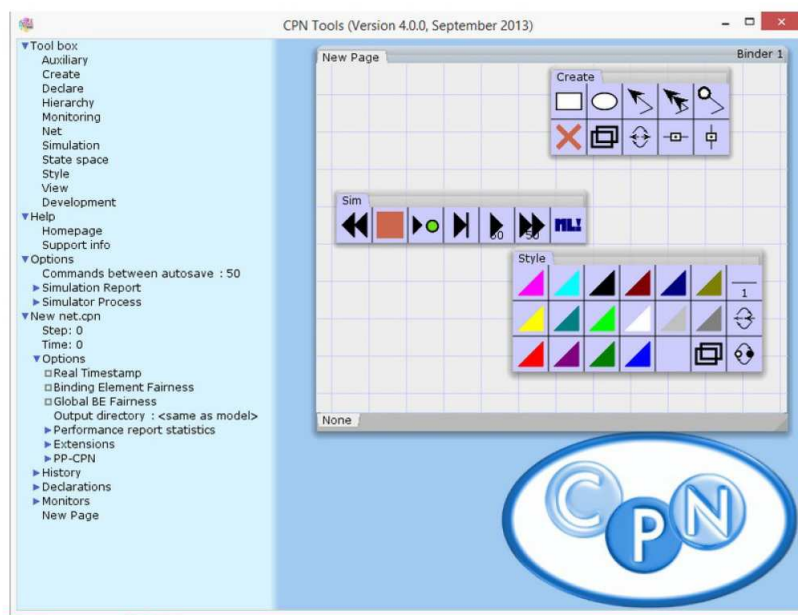


Figura 11 – Interface CPN Tools

3.5.1 Linguagem CPN

A linguagem CPN é a linguagem aceita pelo *CPN Tools*. Essa linguagem tem sua base na linguagem funcional *Standard ML*. Ela contém os construtores, tipos, funções, operadores, e expressões básicas da linguagem *Standard ML*, mas contém construtores adicionais específicos dos modelos baseados nas Redes de Petri coloridas (AALST W. VAN DER; STAHL, 2011).

3.5.2 Tipos e Operadores

A linguagem apresenta os mesmos tipos básicos presentes na linguagem *Standard ML*: *int*, *real*, *string*, *bool*, *unit*. O tipo *unit* contém apenas um valor chamado de valor vazio e é representado por `()`, sendo o tipo usado para representar uma ficha de uma rede de Petri clássica (sem cor).

Os operadores básicos estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Operadores Básicos Standard ML

Operadores Básicos	Descrição
$\sim$	Operador unário de negação, para os tipos int e real
$+, -$	Soma e subtração, para os tipos int e real
$*$	Multiplicação, para os tipos int e real
div, mod	Divisão e Módulo para o tipo int
$\wedge$	Concatenação de strings
$=, <>, <, >, <=, >=$	Comparação para a maioria dos tipos
not	Negação Lógica
andalso	AND Lógico
orelse	OR Lógico
is then else	Operador condicional

3.5.3 Conjunto de Cores

Nas Redes de Petri coloridas, cada lugar contém um tipo, o que significa que cada ficha presente neste lugar contém um determinado valor desse tipo. Para determinar esse conjunto de cores (tipo) de um determinado lugar é usada a sintaxe a seguir:

color INT = int; color abc = string with "a" . . "z";

color STR = string; color YN = with Y | N;

color B = bool; color gen = with femin | mascul;

color U = unit; color boolean = bool with (no , yes);

color Idade = int with 0 . . 130; color fichaPreta = unit with null;

Alguns dos conjuntos acima são os próprios tipos definidos, aceitando qualquer valor daquele tipo; outros são subconjuntos dos tipos. Os dois últimos exemplos redefinem o tipo em questão. O conjunto de cor *boolean* substitui os valores *false* e *true* por *no* e *yes* respectivamente. Já o conjunto *fichaPreta* renomea o valor vazio () para *null*. A linguagem também suporta conjuntos de cores compostos utilizando os construtores *product*, *record* e *list*.

3.5.4 Marcações

Um lugar em uma CPN pode conter diversas fichas; então, para representar todas as fichas de um lugar são utilizados os chamados *multisets*. Um *multiset* na linguagem CPN é denotado como:

$$x_1'v_1 + x_2'v_2 + \dots + x_n'v_n$$

Ou seja, existem x_1 fichas de valor v_1 no lugar em questão, x_2 fichas de valor x_2 e assim sucessivamente.

A Figura 12 mostra três situações diferentes. Na primeira os lugares p_1 e p_2 têm

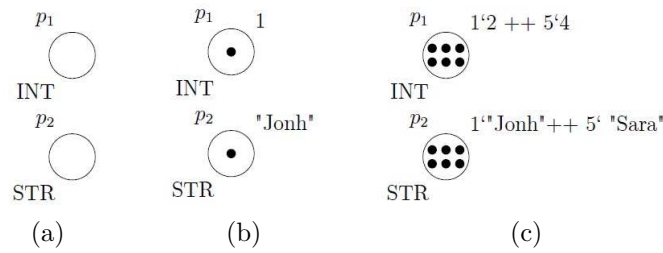


Figura 12 – Multisets

conjuntos de cores INT e STR, respectivamente, mas não contém *tokens*. A Figura 12b mostra os mesmos lugares, porém com um *token* e consequentemente multisets definidos. A Figura 12c mostra os lugares com seis *tokens* e de acordo com a expressão definida o lugar p_1 contém um *token* de valor 2 e cinco *tokens* de valor 4. O mesmo acontece com p_2 que contém um token de valor "Jonh" e cinco tokens de valor "Sara".

3.6 Distribuição de probabilidade

Em teoria da probabilidade e em estatística, uma distribuição de probabilidade descreve o comportamento aleatório de um fenômeno dependente do acaso. O estudo dos fenômenos aleatórios começou com o estudo dos jogos de azar – jogos de dados, sorteios de bolas de urna e cara ou coroa eram motivações para compreender e prever os experimentos aleatórios. Essas abordagens iniciais são fenômenos discretos, o que significa que o número de resultados possíveis é finito ou contável. Entretanto, certas questões revelam distribuições de probabilidade com suporte infinito não contável.

3.6.1 Distribuição uniforme

Em estatística e probabilidade, a distribuição uniforme é a distribuição de probabilidades contínua mais simples de se conceituar: a probabilidade de se gerar qualquer ponto em um intervalo contido no espaço amostral é proporcional ao tamanho do intervalo. Outra maneira de se dizer "distribuição uniforme" seria "um número finito de resultados com chances iguais de acontecer".

Um simples exemplo de distribuição uniforme é lançar um dado não viciado. Os possíveis valores são 1,2,3,4,5,6, e a cada turno que o dado é jogado a probabilidade de cada valor é $1/6$. Se dois dados são lançados e seus valores adicionados, a distribuição resultante não é mais uniforme pois as somas não são uma variável equiprovável.

A distribuição discreta uniforme em si não possui parâmetros. No entanto, é conveniente representar seus possíveis resultados com um intervalo fechado $[a,b]$, sendo 'a' e 'b' considerados os principais parâmetros da distribuição. Com isso a função acumulada

dessa distribuição é representada como a Figura 13.

$$F(k; a, b) = \frac{[k] - a + 1}{b - a + 1}$$

Figura 13 – Função Acumulada da distribuição Uniforme

Esta distribuição tem média $\frac{a+b}{2}$ e variância $\frac{(b-a)^2}{12}$.

3.6.2 Distribuição Exponencial

Esta é uma distribuição que se caracteriza por ter uma função de taxa de falha constante. A distribuição exponencial é a única com esta propriedade. Ela é considerada uma das mais simples em termos matemáticos. Esta distribuição tem sido usada extensivamente como um modelo para o tempo de vida de certos produtos e materiais. Ela descreve adequadamente o tempo de vida de óleos isolantes e dielétricos, entre outros. A distribuição exponencial é um tipo de distribuição contínua de probabilidade, representada por um parâmetro λ .

A variável aleatória X tem distribuição Exponencial com parâmetro λ , $\lambda > 0$, se tiver função densidade de probabilidade dada por:

$$f(x) = \begin{cases} \lambda e^{-\lambda x} & \text{se } x \geq 0 \\ 0 & \text{se } x < 0 \end{cases}$$

em que λ é o parâmetro de taxa da distribuição e deve satisfazer $\lambda > 0$. Neste caso, λ é o tempo médio de vida e x é um tempo de falha. O parâmetro deve ter a mesma unidade do tempo da falha x . Isto é, se x é medido em horas, λ também será medido em horas.

A função de distribuição acumulada $F(x)$ é dada por

$$F(x) = \int_0^x f(s)ds = \begin{cases} 1 - e^{-\lambda x} & \text{se } x \geq 0 \\ 0 & \text{se } x < 0 \end{cases}$$

Utilizamos a notação $X \sim Exp(\lambda)$.

Tal distribuição tem média $\frac{1}{\lambda}$ e variância $\frac{1}{\lambda^2}$. A Figura 14 mostra o gráfico da função densidade que representa esta distribuição.

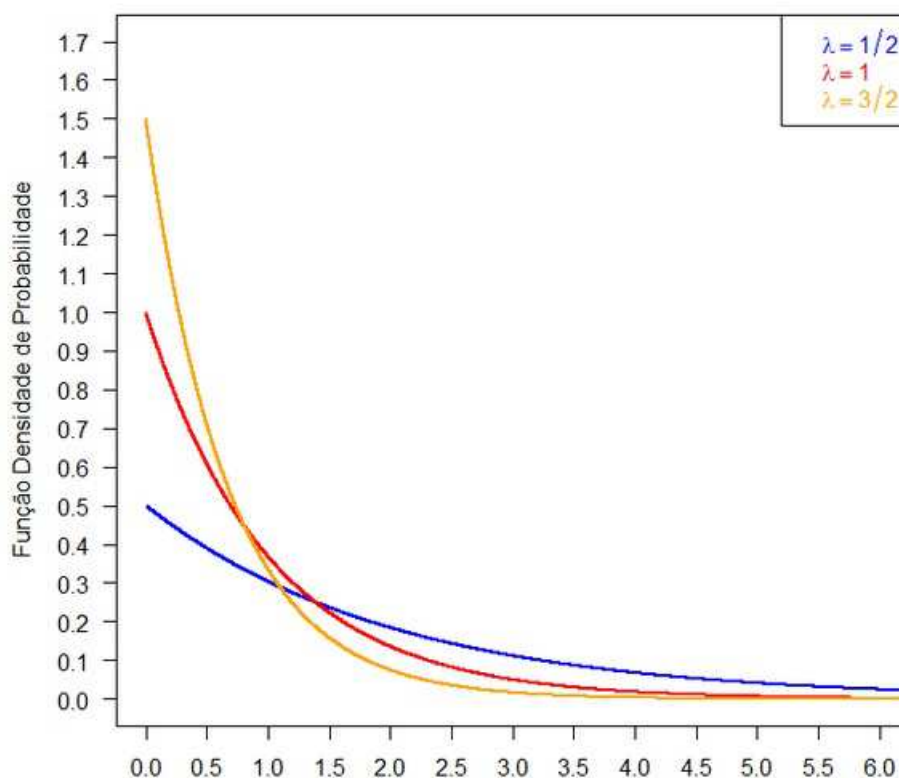


Figura 14 – Gráfico da função densidade para distribuição Exponencial

3.7 Trabalhos Relacionados

Um dos principais trabalhos correlatos a esta pesquisa é apresentado por [Aalst \(1998a\)](#). Isso porque o autor define a *WorkFlow net Interorganizacional* que são usadas para modelar os processos de *Workflow interorganizacionais* considerados nesta pesquisa. Além disso, o autor define o critério de correção *Soundness* no contexto dos processos de *Workflow interorganizacionais*. Este trabalho também apresenta a primeira abordagem para verificação de processos de *Workflow interorganizacionais*. O método proposto para verificação do critério de correção *Soundness* considera a prova de limitabilidade e vivacidade para várias *WorkFlow nets*. Ou seja, as *WorkFlow nets* locais (LWF-net) mais a *WorkFlow net Interorganizacional* (IOWF-net). As abordagens apresentadas em [Aalst \(1998a\)](#), [Aalst \(2000\)](#), [YAMAGUCHI \(2007\)](#) e [SUN H. C.; DU \(2008\)](#) para verificação do critério de correção *Soundness* para processos de *workflow interorganizacionais* também são baseadas na prova de vivacidade e limitabilidade para a Rede de Petri considerada. O problema é que, para decidir *Soundness* considerando a prova de vivacidade e limitabilidade, é necessário construir um grafo das marcações acessíveis que pode apresentar uma explosão no espaço de estados. Como citado anteriormente e mostrado por [Aalst \(1996\)](#), decidir *Soundness* considerando a verificação da limitabilidade e vivacidade é EXPSPACE-difícil.

[Passos e Julia \(2009\)](#) apresentam uma abordagem baseada na Lógica Linear para

verificação do critério de correção *Soundness* no contexto das *WorkFlow nets*, ou seja, dos processos de *workflow* que consideram apenas uma organização envolvida. Logo, a abordagem apresentada não considera a comunicação entre processos (ou organizações). E, por consequência, a verificação de *Soundness* para os processos de *workflow interorganizacionais* não é atingida. O método proposto por [Passos e Julia \(2009\)](#) é baseado na construção e análise de árvores de prova da Lógica Linear construídas para os cenários de uma *WorkFlow net*. É importante destacar a natureza de um cenário: um cenário é um conjunto de disparo de transições, provido de uma ordem parcial, que passa de uma marcação inicial a uma marcação final. No caso de um grafo das marcações acessíveis, um cenário será um conjunto de transições completamente ordenadas. Consequentemente, quando há paralelismos em uma *WorkFlow net*, um cenário dado por um sequente da Lógica Linear corresponde a um conjunto de cenários em um grafo das marcações acessíveis, uma vez que o paralelismo em tais grafos é representado por intercalação de cenários. A complexidade adicional que uma estrutura paralela em uma rede de Petri produz no grafo das marcações acessíveis desaparecerá nas árvores de prova do cálculo de sequentes da Lógica Linear e a formalização do método proposto pelo cálculo dos sequentes da Lógica Linear considera a estrutura real de um processo de *workflow*. Além disso, [Passos e Julia \(2009\)](#) mostram que o tempo de construção de uma árvore da Lógica Linear que representa um cenário de uma *WorkFlow net* é linear em relação ao número de transições da *WorkFlow net* analisada.

Ainda no contexto da análise de processos de *workflow* utilizando Lógica Linear, o artigo intitulado “Linear Logic as a Tool for Qualitative and Quantitative Analysis of Workflow Processes” ([PASSOS; JULIA, 2015](#)) apresenta dois métodos: um para análise qualitativa e outro para análise quantitativa de modelos em *WorkFlow nets*. Estes métodos são baseados na construção e análise de árvores de prova da Lógica Linear. A análise qualitativa está relacionada com a prova de *Soundness* para a *WorkFlow net*. A análise quantitativa está relacionada com o planejamento de recursos para cada tarefa do processo de *workflow* analisado, isto é, para as atividades que possuem acionamentos (recursos) do tipo usuário. A análise quantitativa é baseada na computação de intervalos de datas simbólicas para a execução das tarefas, de forma que um planejamento dos recursos envolvidos possa ser realizado. Em particular, tais intervalos de datas simbólicas são computados reutilizando os resultados da análise qualitativa, ou seja, das árvores de prova da Lógica Linear utilizadas para a prova do critério de correção *Soundness*. Esta é uma das vantagens encontradas ao se utilizar a Lógica Linear para a verificação de processos de *workflow*, uma vez que, quando considera-se abordagens tradicionais baseadas na construção e análise de grafos das marcações acessíveis, tal planejamento de recursos não é diretamente obtido. Além disso, este trabalho apresenta também resultados de simulação que confirmam os dados obtidos com o cálculo de datas simbólicas. Os métodos para análise qualitativa e quantitativa apresentadas neste artigo são fruto dos trabalhos

desenvolvidos anteriormente pelos autores.

No livro ([AALST W. VAN DER; STAHL, 2011](#)), o autor usa o CPN Tools para modelagem, análise e simulação das *Workflow nets* no caso mono-processo, sendo que após uma visão geral dos sistemas de informação empresarial, o livro apresenta a modelagem de processos em termos de redes de Petri clássicas. Isso é prolongado com dados, tempo e hierarquia para modelar todos os aspectos de um processo. O livro também explora a análise de modelos de rede de Petri para detectar defeitos de projeto e erros no processo de design.

Seguindo o mesmo princípio de modelagem e simulação afim de obter resultados no CPN Tools para comparação em relação aos resultados obtidos pela lógica linear o artigo "Modelagem e Simulação de Processos de Negócios utilizando *Workflow Nets* e o Simulador CPN Tools", ([ROCHA; JULIA, 2015](#)), foi desenvolvido baseado em Redes de Petri simples, que diferencia deste pelo número de processos envolvidos, sendo que no artigo em questão existe somente uma entidade no processo, já neste projeto tem-se várias entidades envolvidas e comunicando entre si.

4 Modelagem de um processo de negócio interorganizacional

Nesta seção é mostrado como foi realizada a modelagem das *workflow interorganizacionais* no *CPN Tools*. O processo de negócio modelado foi o processo proposto pelo Aalst (1998a), que descreve um processo de apresentação de um artigo em uma conferência. A descrição do processo é dada a seguir:

“This workflow can be considered to be an interorganizational workflow with two loosely coupled workflow processes: (1) the process of an author preparing, submitting and revising a paper, and (2) the process of evaluating and monitoring submissions by the program committee. In this case there are two ‘organizations’ involved in the interorganizational workflow: the author (AU) and the program committee (PC). The author sends a draft version of the paper to the program committee. The program committee acknowledges the receipt and evaluates the submission. The paper is accepted or rejected by the program committee. In both cases the author is notified. If the paper is rejected, the work ow terminates, otherwise the author can start preparing the nal version. After completing the final version, a copy is sent to the program committee and the program committee acknowledges the receipt of the final version. If the final version is not received by the program committee before a specific due date, the author is notified that the paper is too late. A paper which is too late will not be published in the proceedings.”

De acordo com a descrição do processo, existem duas *workflow net* locais a serem modeladas; a *Workflow net Author (AU)* que descreve o sequenciamento das principais atividades a serem realizadas pelo autor do artigo científico, e a *Workflow net* que corresponde ao programa de comitê organizador da conferência (PC) que descreve o sequenciamento das principais atividades a serem realizadas pela comissão organizadora responsável pela conferência. A comunicação entre as duas *Workflow net* será realizada através de lugares de comunicação assíncrona que servirão para especificar as trocas de mensagens entre os processos.

4.1 Edição dos processos no CPN Tools

Inicialmente, para criar um modelo, é necessário criar uma nova rede no *CPN Tools*. Isso é possível clicando com o botão direito do *mouse* em qualquer lugar da área de trabalho do software e selecionando *New Net*, como é mostrado na Figura 15. Caso já exista um modelo criado e salvo, utiliza-se a opção *Load Net*.

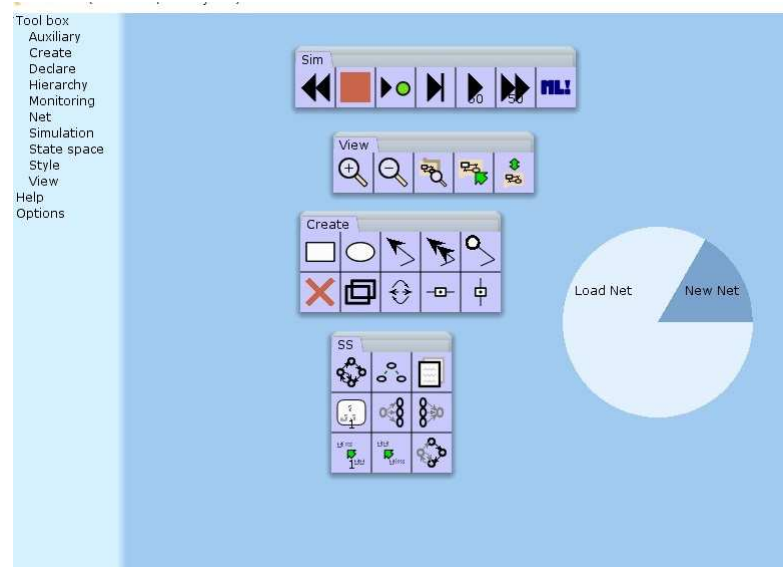


Figura 15 – Criando uma nova rede

Buscando manter o caráter distribuído de um modelo de processo interorganizacional, foi criada uma página para cada *Workflow* local, sendo uma para o processo *Author* e outra para o *Program Committee*. Para isso acontecer, basta clicar com o botão direito do mouse no nome do arquivo *.cpn* na barra lateral e selecionar *New Page*, conforme a Figura 16.

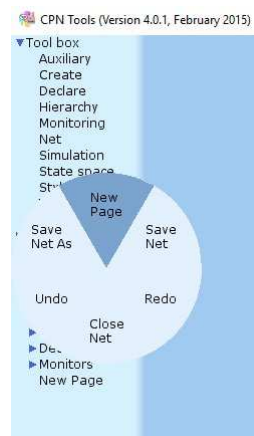


Figura 16 – Adicionando uma nova página

Utilizou-se a paleta de ferramentas *Create* para criar os modelos das *workflow nets*. Como mostrado na Figura 11 e apresentado na Seção 3.5, para acessar essa paleta basta clicar com o botão esquerdo do mouse na palavra *Create* na barra à esquerda e arrastar o objeto criado para a área de trabalho do CPN Tools.

As três primeiras ferramentas da esquerda para a direita da paleta indicam respectivamente a criação de uma transição, de um lugar e de um arco. Para excluir um elemento utiliza-se a sexta ferramenta representada por um x, ou é também possível clicar com o botão direito do mouse sobre o elemento em questão e selecionar a opção *Delete*.

A tecla *ESC* do teclado pode ser utilizada a qualquer momento para tirar de foco alguma ferramenta selecionada.

O *software* permite inserir e alterar etiquetas (nomes) nos elementos da rede, bem como alterar seus tamanhos, clicando e redimensionando o elemento desejado.

Utilizando apenas a paleta Create, pode-se criar cada um dos elementos necessários à edição do modelo. A Figura 17 apresenta a *Workflow net* que corresponde ao processo Autor, e a Figura 18 representa a *Workflow net* PC.

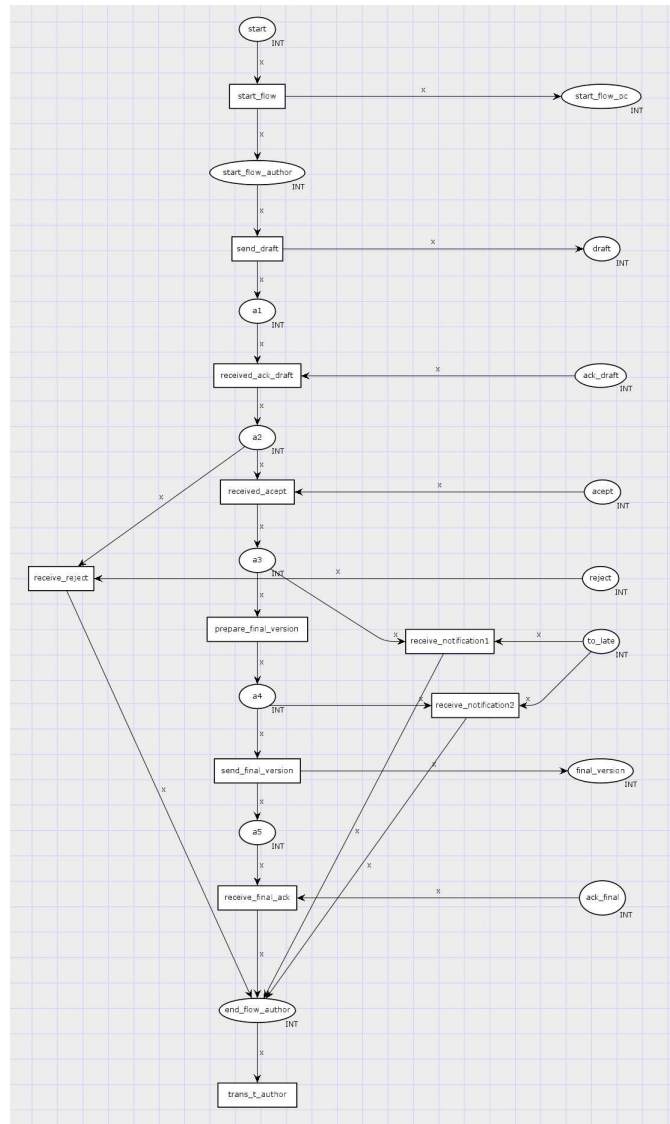


Figura 17 – Modelagem da Workflow Author

As Figuras 17 e 18 apresentam cada processo de forma independente, sem que exista um tipo de interação entre os processos Autor e PC. Entretanto para o caso de *workflow interorganizacional*, mecanismos de comunicação assíncronos (lugares de comunicação) precisam ser especificadas para mostrar as interações existentes entre os diversos processos. Isso pode ser implementado no CPN Tools através da noção de lugares de

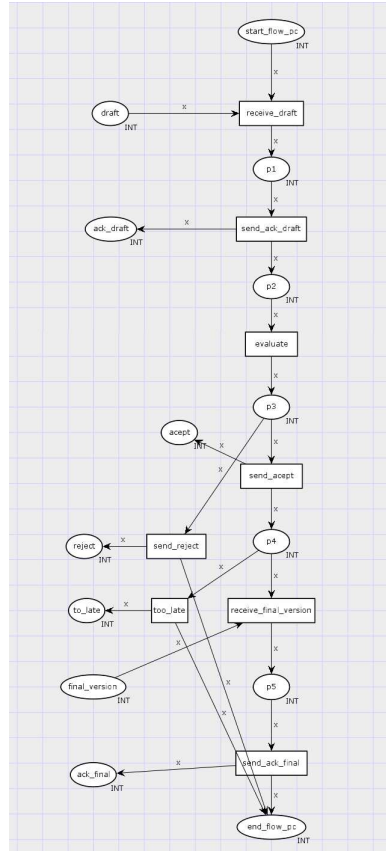


Figura 18 – Modelagem da Workflow PC

fusão (fusion places). Esses lugares possuem em particular a função de replicar um lugar mantendo seu comportamento e estado em ambos os lugares.

Para criar um lugar de fusão, primeiramente cria-se lugares distintos em cada uma das *Workflow nets*. Logo em seguida, utilizando as funcionalidades da paleta *Hierarchy*, coloca-se para cada lugar de fusão um rótulo (tag) idêntico que estabelece a ligação entre os lugares de fusão. Assim cria-se um *Fusion place* na qual ambos os lugares possuem o mesmo comportamento e estado. Ao criar o *fusion place*, ele recebe uma tag, na qual pode-se alterar o nome da mesma para uma melhor compreensão. Para a modelagem em questão, foi necessário alterar o tipo dos arcos, na qual anteriormente eles possuíam o tipo unit, passando para o tipo INT.

Com isso, é possível modelar as *workflow* de Author e PC comunicando entre si através dos *Fusion Place*, como mostra as Figuras 19 e 20. Pode-se ver um exemplo de *Fusion Place* no lugar *draft*, sendo que ele aparece tanto na Figura 19 quanto na Figura 20, com a tag *draft*.

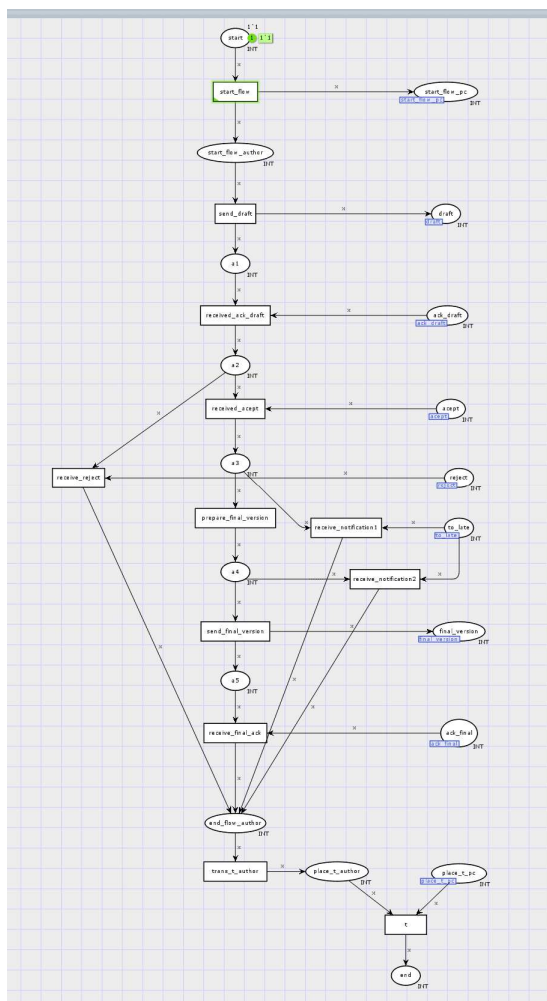


Figura 19 – Modelagem da Workflow Author com os lugares de Fusão

4.2 Adicionando marcações e Definindo Tipos

Com a modelagem dos processos finalizada, é necessário determinar os tipos das fichas (marcações) que serão utilizadas. Utilizamos o tipo INT: () contendo a informação de que uma ficha no lugar de *Start* representa uma nova submissão de artigo sendo enviada para o commit e uma ficha no lugar *Final* representará um artigo publicado ou rejeitado.

Para definir o tipo de fichas que um lugar irá receber, deve-se clicar no lugar, apertar a tecla TAB do teclado uma única vez e digitar o tipo escolhido. O tipo UNIT fica definido como padrão caso nenhum outro tipo seja escolhido, mas como no modelo foi utilizado o tipo INT, deve-se escrever INT para que o lugar receba fichas do mesmo tipo definido.

De modo semelhante, para adicionar uma ficha num lugar, deve-se clicar no mesmo, mas dessa vez, apertar a tecla TAB duas vezes e digitar a expressão correspondente à marcação que foi apresentada na Seção 3.5.4. Para análise do processo interorganizacional, será utilizada apenas uma ficha no lugar *Start*, na qual ao ser disparado gera uma ficha em cada *Start* das *workflow's*. Dessa forma basta adicionar a expressão: 1'1 no lugar

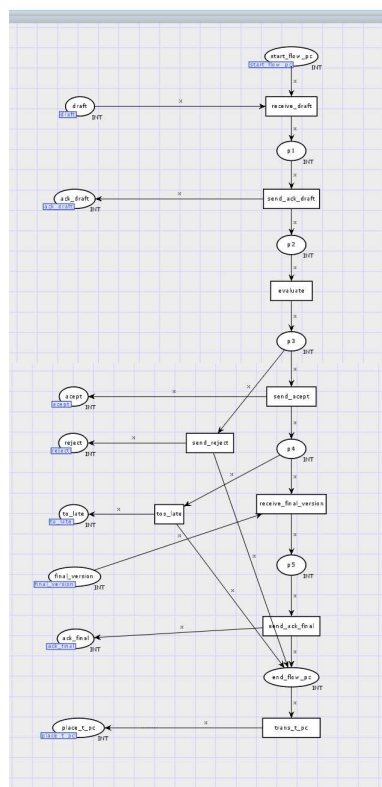


Figura 20 – Modelagem da Workflow PC com os lugares de Fusão

Start.

Após adicionar as fichas nos lugares de início de cada processo, gera-se um erro de compilação, sendo que o motivo do erro é que o lugar no qual alterna-se gera uma ficha do tipo INT, mas que para os arcos que ligam os lugares as transações passarem tal valor INT é necessária a criação de uma variável x do tipo INT para conter o valor temporariamente até ser passada para o outro lugar. Sendo assim, todas os arcos modelados possuem a variável x por esse motivo.

5 Análise Qualitativa : verificação da propriedade Soundness

5.1 Implementação do modelo de análise

No contexto das *WorkFlow nets*, o objetivo principal da análise qualitativa é provar o critério de corretude definido para as *WorkFlow nets* que é denominado *Soundness*.

Para realizar tal análise, foi considerado o processo de apresentação de um artigo em uma conferência descrito no Capítulo 4. Conforme foi descrito na Seção 3.3.2, para que uma *workflow net interorganizacional* seja *sound*, precisamos modelar a U(IOWF-net) na qual todas as LWF-nets são inseridas em um processo de *workflow* simples, considerando uma transição de início e uma transição de término (AALST, 1998a), conforme as Figuras 21 e 22 . E também a *workflow* ajustada para contemplar o modelo *sound* proposto por Aalst (1998a) que corresponde a Figura 23.

5.2 Metodologia para análise da propriedade Soundness

A metodologia adotada para a análise da propriedade sound de uma *workflow net* é a proposta por Aalst e Hee (2004), conforme descrito no Capítulo 3.3.2. Nesse método para analisar o processo é adicionada à *workflow net interorganizacional* uma nova transição t^* na qual tem como entrada o lugar *End* e como saída o lugar *Start*. Com tal transição ela é denominada *short-circuited*, como mostra a Figura ??.

A propriedade *Soundness* corresponde a duas propriedades clássicas das rede de Petri: *Liveness* e *Boundedness*, logo um processo é considerado *Sound* se a *workflow net* com a adição da transição t^* tem ambas a propriedades.

O simulador *CPN Tools* oferece uma ferramenta que verifica automaticamente as boas propriedades de uma rede de Petri. Tal ferramenta se chama de State Space e tem como função principal a geração de um grafo das marcações acessíveis de uma rede de Petri colorida que depende de uma marcação inicial.

Ao selecionar a paleta da funcionalidade State Space do CPN Tools, indica-se o caminho e o nome do arquivo de relatório.

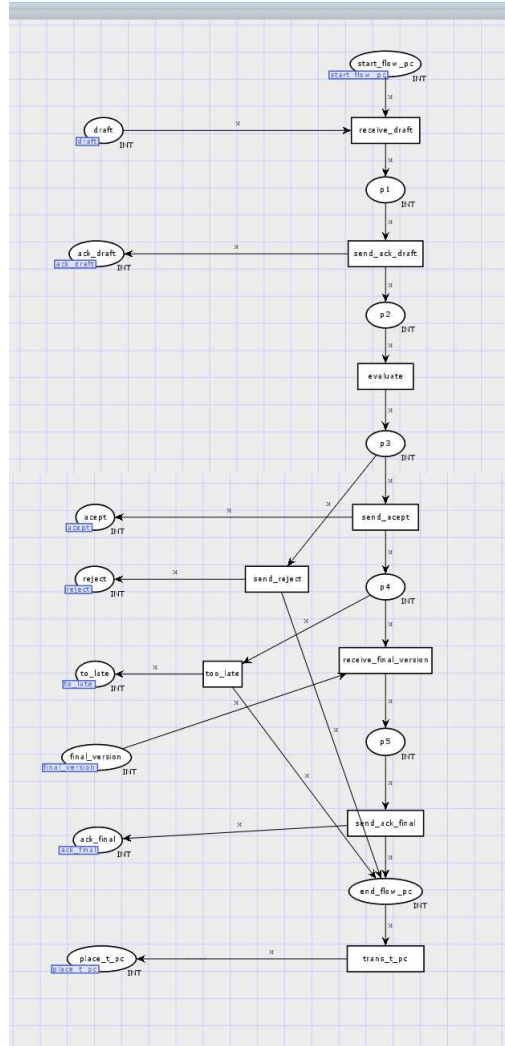


Figura 22 – Modelagem da Workflow PC - Unfolded

Nodes: 1

Arcs: 0

Secs: 0

O resultado da análise de limitabilidade dos elementos (os lugares) do modelo é dado na forma de um arquivo texto apresentado no trecho abaixo. Neste arquivo, o valor máximo que cada lugar vai receber durante a evolução das marcações da rede é indicado pela coluna Upper, e como mostrado no exemplo, temos uma workflow (1-bounded), na qual o valor máximo para cada lugar é 1.

Boundedness Properties

Best Integer Bounds

	Upper	Lower
Author'a1 1	1	0
Author'a2 1	1	0
Author'a3 1	1	0
Author'a4 1	1	0
Author'a5 1	1	0
Author'accept 1	1	0
Author'ack_draft 1	1	0
Author'ack_final 1	1	0
Author'draft 1	1	0
Author'end_flow_author 1		
	1	0
Author'final_version 1 1	1	0
Author'place_t_author 1 1	1	0
Author'place_t_pc 1	1	0
Author'reject 1	1	0
Author'start 1	1	0
Author'start_flow_author 1		
	1	0
Author'start_flow_pc 1 1	1	0
Author'to_late 1	1	0
PC'accept 1	1	0
PC'ack_draft 1	1	0
PC'ack_final 1	1	0
PC'draft 1	1	0
PC'end_flow_pc 1	1	0
PC'final_version 1	1	0
PC'p1 1	1	0
PC'p2 1	1	0
PC'p3 1	1	0
PC'p4 1	1	0
PC'p5 1	1	0
PC'place_t_pc 1	1	0
PC'reject 1	1	0
PC'start_flow_pc 1	1	0
PC'to_late 1	1	0

O resultado da análise de vivacidade dos elementos (as transições) do modelo é dado na forma de um arquivo texto apresentado no trecho a seguir. Neste trecho, existe

uma marcação morta, o que de acordo com a definição, faz com que tal workflow não seja sound.

Liveness Properties

Dead Markings

[32]

Dead Transition Instances

None

Live Transition Instances

None

Como é mostrado acima, tal modelo não é *sound* pois ela satisfaz a propriedade *bounded* na qual todos os seus lugares são *1-Bounded*, entretanto ela não satisfaz a propriedade *liveness*, sendo que ela possui uma marcação morta, comprovando assim o resultado obtido em [Passos e Julia \(2016\)](#) no qual através da lógica linear ela mostrou que existe uma situação de *deadlock* no processo da *workflow net* modelada, mostrada na Figura 9.

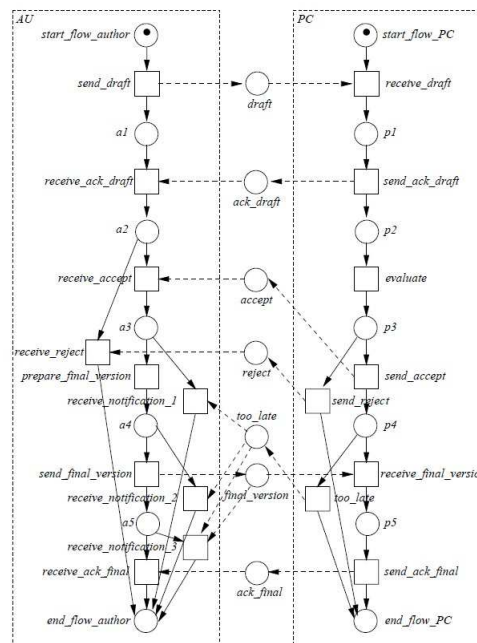


Figura 23 – A sound interorganizational workflow

No artigo [Aalst \(1998b\)](#), o autor propõe uma alteração na *Workflow interorganizational* para que ela se torne *sound*. A solução consiste em uma notificação de recebimento de transição adicional 3 é adicionada para evitar o impasse na qual o *deadlock* ocorre.

Observe que esta solução assume a possibilidade de retirar a versão final do documento. Esta não é uma hipótese realista. Para uma solução adequada do problema, é necessário apresentar uma confirmação adicional. Segue tal proposta na Figura 23, e a modelagem do mesmo na Figura 24.

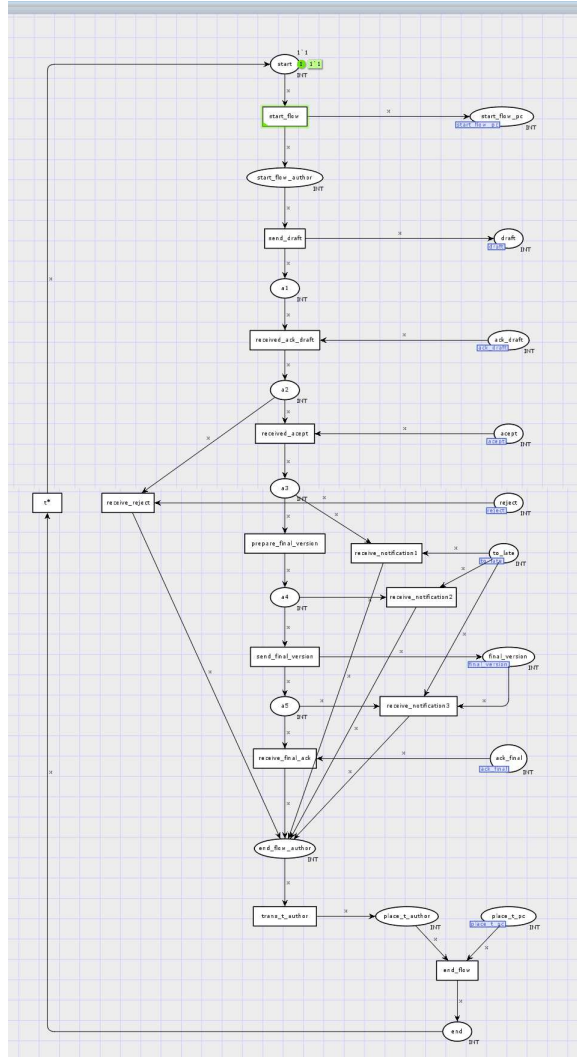


Figura 24 – Modelagem no CPN Tools da *Workflow interorganizational sound*

6 Simulação: Análise Quantitativa

O objetivo da análise quantitativa está relacionado com o tempo de execução dos casos e planejamento de recursos. O planejamento de atividades busca calcular janelas de datas onde poderão ocorrer a utilização de um recurso (pessoa, equipe, empresa terceirizada, entre outras) para o tratamento de atividades. Desta forma será possível prever a necessidade de disponibilidade de um recurso envolvido na execução de uma atividade do do processo. Além disso, será interessante avaliar o valor médio de tempo de execução de um caso no processo.

No CPN Tools a funcionalidade de simulação é acessada através da paleta *Simulation*, conforme a Figura 25. A primeira ferramenta da paleta especifica a marcação inicial da rede a partir da qual a simulação será iniciada. A segunda ferramenta fixa um horizonte de simulação (duração máxima de simulação permitida ou geração máxima de uma quantidade de eventos). A quarta ferramenta da paleta de simulação mostra a execução da simulação passo a passo diretamente no modelo gráfico, permitindo assim a visualização de ocorrência de eventos e mudanças de estados (marcação) do sistema modelado. Para executar um determinado número de vezes utiliza-se as duas últimas paletas.

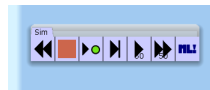


Figura 25 – Paleta de Simulação

A Figura 26 representa um determinado estado da rede durante a simulação na qual existe uma ficha nos lugares *start_flow_pc* e *start_flow_author*. A transição *send_draft* está na cor verde pois está sensibilizada, ou seja no próximo estado ela pode ser disparada.

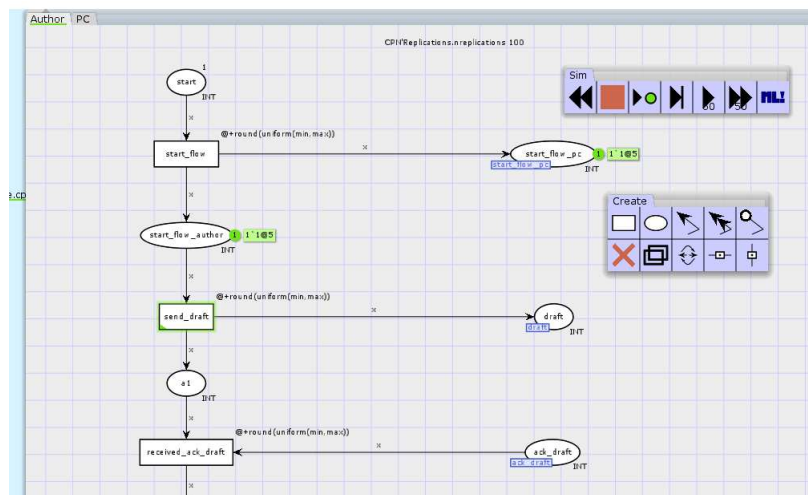


Figura 26 – Estado de uma simulação do modelo Author

6.1 Implementação do modelo temporizado no CPN Tools

Para adicionar tempo ao modelo, é preciso especificar um tipo temporizado associado aos tipos de cores (color sets) já existentes no modelo. O tipo INT, utilizado anteriormente não é suficiente pois não é um tipo temporizado. Para convertê-lo em um tipo temporizado, basta apenas adicionar a palavra *timed* na sua declaração. A declaração de tipos se encontra na barra esquerda da janela no *link Declarations > Standard Declarations*. Com dois cliques sobre o tipo desejado, é possível fazer a alteração do mesmo. Caso seja necessário uma nova declaração, deve-se usar o botão direito e selecionar a opção *New Dcl*.

Cada transição da Figura 26 contém um intervalo de tempo, e entre o valor mínimo e o valor máximo um tempo específico e aleatório será considerado. Por isso, essa simulação pode ser feita tanto utilizando a distribuição estatística uniforme na qual a probabilidade de cada tempo ocorrer é a mesma, quanto a distribuição exponencial na qual a função recebe um parâmetro e o tempo é na grandeza exponencial.

O CPN Tools oferece diversas funções de distribuições estatísticas já definidas. A distribuição uniforme, por exemplo, está definida como *uniform(a:real, b:real):real*, sendo que os parâmetros 'a' e 'b' representam os valores mínimos e máximos da função respectivamente. Já a exponencial é definida como *exponential(a:real)*, sendo 'a' o limiar da função.

Para adicionar o intervalo de tempo escolhido à transição, deve-se clicar na transição escolhida e apertar a tecla TAB duas vezes. Quando isso for feito, irá aparecer no lado superior direito da transição os símbolos @+ que indica que tudo que for escrito depois dele está relacionado com o *delay*, ou atraso de tempo da transição.

A função *round()*, também fornecida pelo software, foi usada para converter o resultado da distribuição uniforme ou exponencial para um valor inteiro aproximado. O modelo completo do processo interorganizacional temporizado com distribuições uniforme é dado nas Figuras 27 e 28.

6.2 Metodologia para Análise Quantitativa

Para obter valores médios de tempo de execução de atividades gerados na simulação, é preciso de uma ferramenta que monitore as transições e lugares. A ferramenta oferecida pelo CPN Tools para realizar tais medidas são os chamados **MONITORES**. Eles servem em particular para especificar quais elementos do modelos (lugares e/ou transições) aparecerão nos relatórios de dados finais de simulação.

As informações obtidas serão utilizadas para diversos propósitos como, por exemplo, interromper uma simulação quando um lugar tiver um determinado número de fichas,

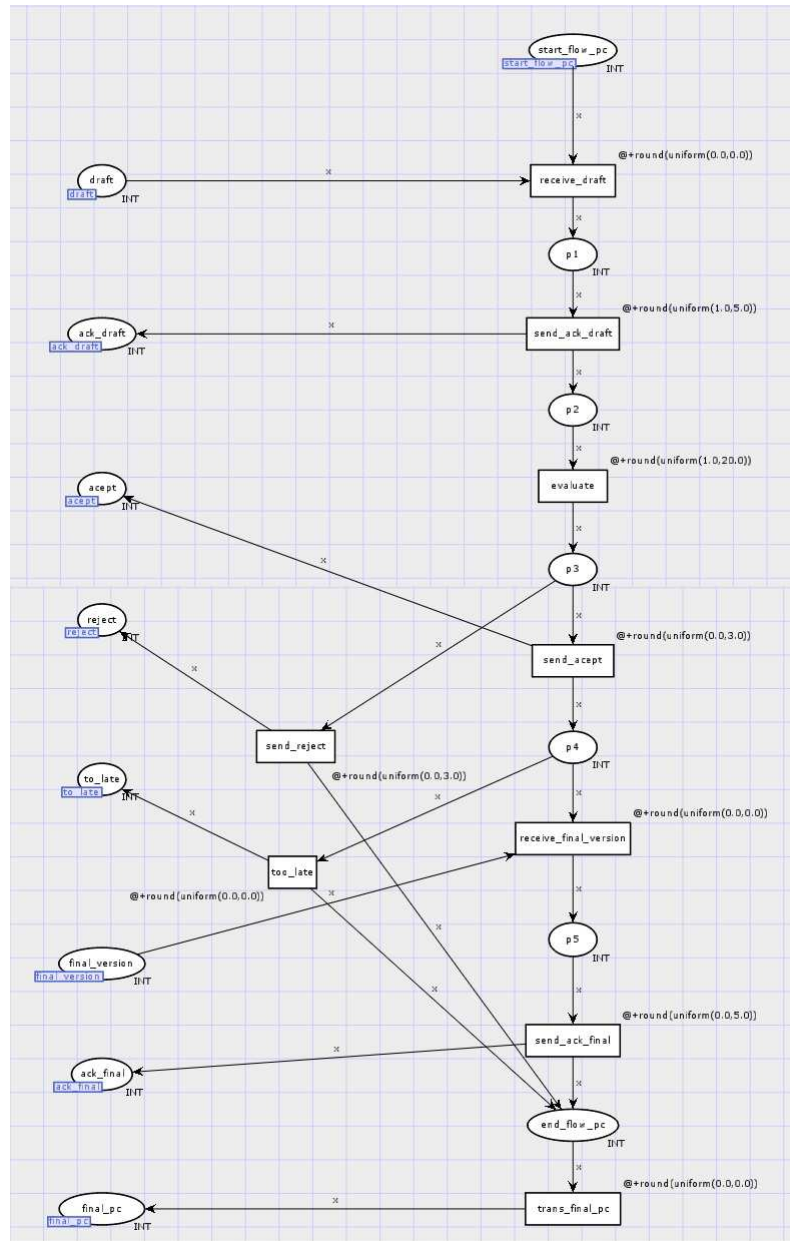


Figura 28 – Modelagem da Workflow PC - Uniforme - Não Sound

O CPN tools oferece suporte para quatro tipos de monitores, sendo eles, monitores:

- que definem condições de paradas da simulação;
- que são definidos pelo usuário;
- que geram relatórios de dados/eventos em arquivos;
- que coletam dados associados às transições ou aos lugares para a análise quantitativa.

O primeiro monitor adicionado ao modelo foi associado ao lugar *End*, a fim de analisar o tempo total de execução do processo. A paleta *Monitoring* possui os monitores

para serem adicionados ao modelo. A primeira ferramenta da paleta, *Data Coll*, representa o tipo de monitor desejado. Assim, basta clicar na ferramenta e depois clicar no lugar escolhido, nesse caso o lugar *End*. Na barra lateral esquerda abaixo do item *Monitors*, irá aparecer o novo monitor com o nome de *New Monitor* que pode ser alterado clicando no nome e substituindo pelo nome desejado.

A Figura 29 mostra o monitor *EndPlace* criado no lugar *Final*. Este tipo de monitor apresenta cinco funções que podem ser modificadas pelo usuário, e cada uma delas tem um papel específico na simulação. Sendo elas:

- *predicate function*: confere se uma condição relevante é satisfeita e determina quando o arquivo de *log* deve ser atualizado durante a simulação;
- *observation function*: extrai informações da rede;
- *action function*: faz alguma operação com o dado anteriormente extraído;
- *initialization function*: inicializa o monitor antes da simulação começar;
- *stop function*: finaliza o monitor, similar à função de inicialização, porém ocorre quando a simulação é finalizada.

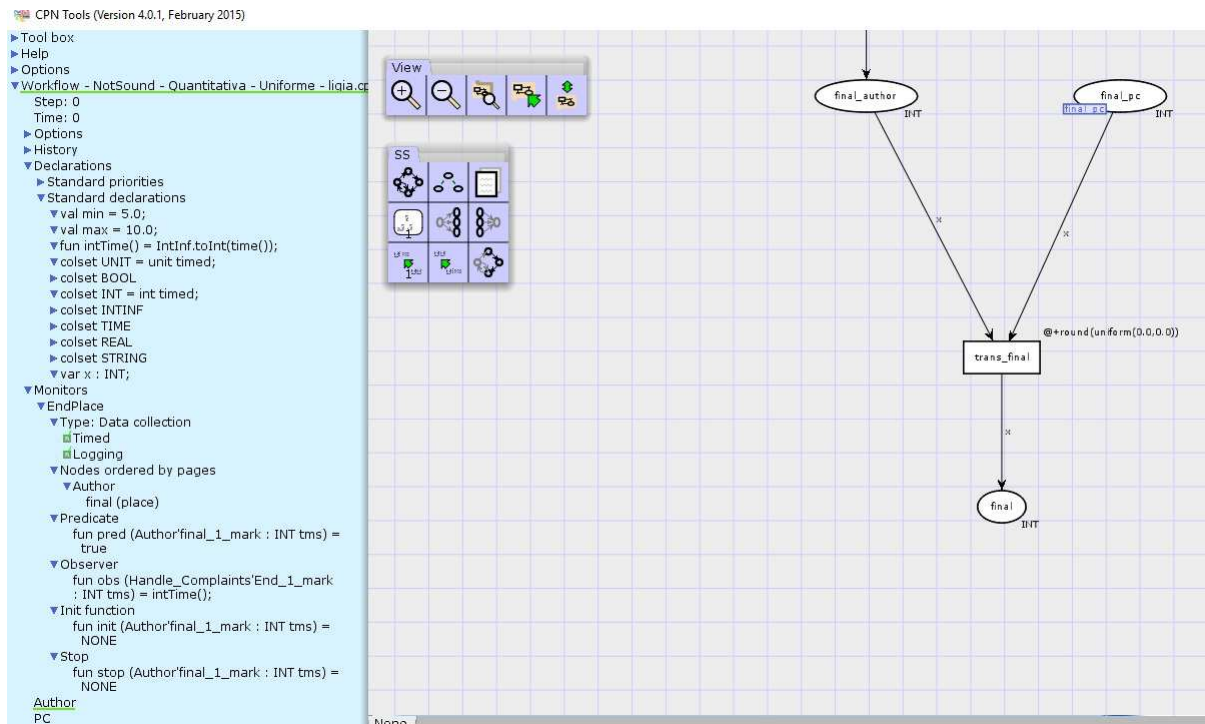


Figura 29 – Monitor coletor de dados no lugar Final

Para o tipo de análise proposta nesse trabalho, é preciso alterar apenas a função *observer* que extrai informações da rede. No lugar do zero é necessário colocar uma função

que indica o tempo global de simulação do processo. No CPN Tools, essa função é *time()*. Para utilizá-la considerando somente valores inteiro (que corresponde ao tipo requisitado pela função *observer*), é criada uma função na barra lateral chamada *intTime()* que converte o *time()* para inteiro e é definida como: *fun int-Time() = IntInf.toInt (time())*. Portanto, pode-se utilizar a função *intTime()* no monitor, que terá sua função *observer* da seguinte forma: *fun obs(Handle-Complaints'End-1-mark : UNIT tms) = intTime()*. Além dessa alteração, é necessário marcar a opção *Timed* localizada acima da opção *Logging* já marcada.

A replicação da simulação (do tipo Monte Carlo) é feita utilizando a função do CPN Tools, *CPN'Replications.nreplications n* onde *n* é o número de simulações que serão realizadas pelo *software*. Essa função deve ser adicionada ao ambiente de trabalho clicando com o botão direito na janela e posteriormente em *Create aux text*. Assim, basta editar o texto com o nome da função e o número de replicações desejado.

Para obter informações sobre as janelas de tempo das transições seria necessário ainda adicionar monitores para cada transição. Seria assim possível obter informações mais detalhadas e localizadas sobre os tempos de execução de tarefas específicas do processo. O monitor no lugar *End* é suficiente para calcular o tempo médio de execução do modelo.

6.3 Tempo de execução

A simulação utilizando a função de replicação é feita clicando com o botão direito sobre o texto criado para a função de replicação da simulação e selecionando *Evaluate ML*. Após concluída a simulação, no diretório em que a rede está salva, uma pasta será gerada com o nome de *output* e dentro dela, para cada simulação feita será gerada uma nova pasta com os arquivos de *log*, com o nome *sim_* e o seu índice de repetição por exemplo, *sim_5* corresponde à simulação número 5.

Dentro da pasta *reps-i*, geradas dentro da pasta *output*, após a avaliação da replicação existe, além das estatísticas gerais, uma pasta para as estatísticas de cada simulação. Para fins deste trabalho, foram utilizadas apenas as estatísticas gerais. O arquivo *replications-report.txt* apresenta um resumo de cada simulação, incluindo o tempo de execução, o número de passos para atingir o fim da simulação, e o tempo gasto pelo software para executar a simulação. Este arquivo mostra o tempo de execução do modelo para cada simulação. Já o arquivo *PerfReportIID* mostra em particular dados médios de monitores.

Os Anexos D e E mostram os dados completos das simulações. A linha *max-iid* tem o valor máximo e mínimo que a ficha no lugar *end* obteve, a média desse valor e os intervalos de confiança para essa média. Portanto, o resultado da simulação não sound com distribuição uniforme mostra que a média de tempo de execução do modelo é de

15.94. Considerando o intervalo de confiança 95%, os dados de simulação mostraram em particular que o valor médio de execução do processo interorganizacional não sound tem 95% de chance de se encontrar no intervalo $(15.94 - 2.067009, 15.94 + 2.067009)$. Enquanto que no modelo *sound* para esta mesma distribuição o valor médio de execução obtido foi de 18.46, com o intervalo $(18.46 - 1.909194, 18.46 + 1.909194)$.

Considerando a informação sobre a finalização do processo global, os resultados da simulação mostram, que o processo modelado finaliza ao mais cedo na data 4 e ao mais tarde na data 34. Já o método analítico, isto é, o método proposto na pesquisa [Passos e Julia \(2016\)](#), que considera o cálculo das datas simbólicas e posteriormente a substituição destas pelas datas numéricas, produziu a data 2 de término ao mais cedo e a data 45 de término ao mais tarde. É fácil notar que os valores obtidos na simulação pertencem ao intervalo numérico definido pelo método analítico. Conforme vemos na Tabela 2.

Já para o modelo proposto por Aaslt, é possível perceber que a correção do modelo não sound produziu uma melhoria no desempenho global. Isso vem do fato de a situação de deadlock que eventualmente pode acontecer no modelo não sound, considerando um grande número de replicações, pode alterar significativamente o desempenho global do processo, o que não acontece no caso sound. Como mostrado no Anexo D, pois neste modelo apenas adicionamos uma nova transição *notification_3* com um intervalo $[0,2]$. Como no artigo [Passos e Julia \(2016\)](#) não foi analisado este modelo, não foi possível a comparação deste resultado com os resultados da lógica linear.

Uma nova proposta foi a alteração da utilização da distribuição uniforme pela distribuição exponencial. Tal alteração reflete que a função exponencial representa melhor a realidade, pois a distribuição uniforme garante que o valor estaria no intervalo definido. Porém na distribuição exponencial, temos somente um parâmetro λ na qual ele é a média do intervalo da uniforme, não possuindo assim um intervalo fixo. Nos anexos C e D foi realizada a simulação utilizando a função exponencial, e percebemos que os intervalos correspondem a natureza desta distribuição. As Figuras 30 e 31 representam a modelagem do processo interorganizacional com a distribuição exponencial.

Já na simulação utilizando a distribuição exponencial os tempos médios de execução dos modelos não *sound* e o modelo *sound* são de 16.76 e 19.18, respectivamente. E seus intervalos, considerando o mesmo intervalo de confiança de 95%, são $(16.76 - 1.922604, 16.76 + 1.922604)$ e $(19.18 - 2.253225, 19.18 + 2.253225)$, respectivamente. Realizando a mesma comparação com o método analítico proposto pela Lógica Linear vemos que há uma diferença principalmente no o valor máximo obtido pela simulação, isso por causa da natureza da função exponencial. Ele não está fixada em um intervalo, podendo assim ser mais realista pelo fato de que as vezes uma tarefa, por n motivos, pode levar tanto mais tempo do que o esperado, quanto menos.

Logo, pode-se perceber que os intervalos definidos na simulação proposto neste

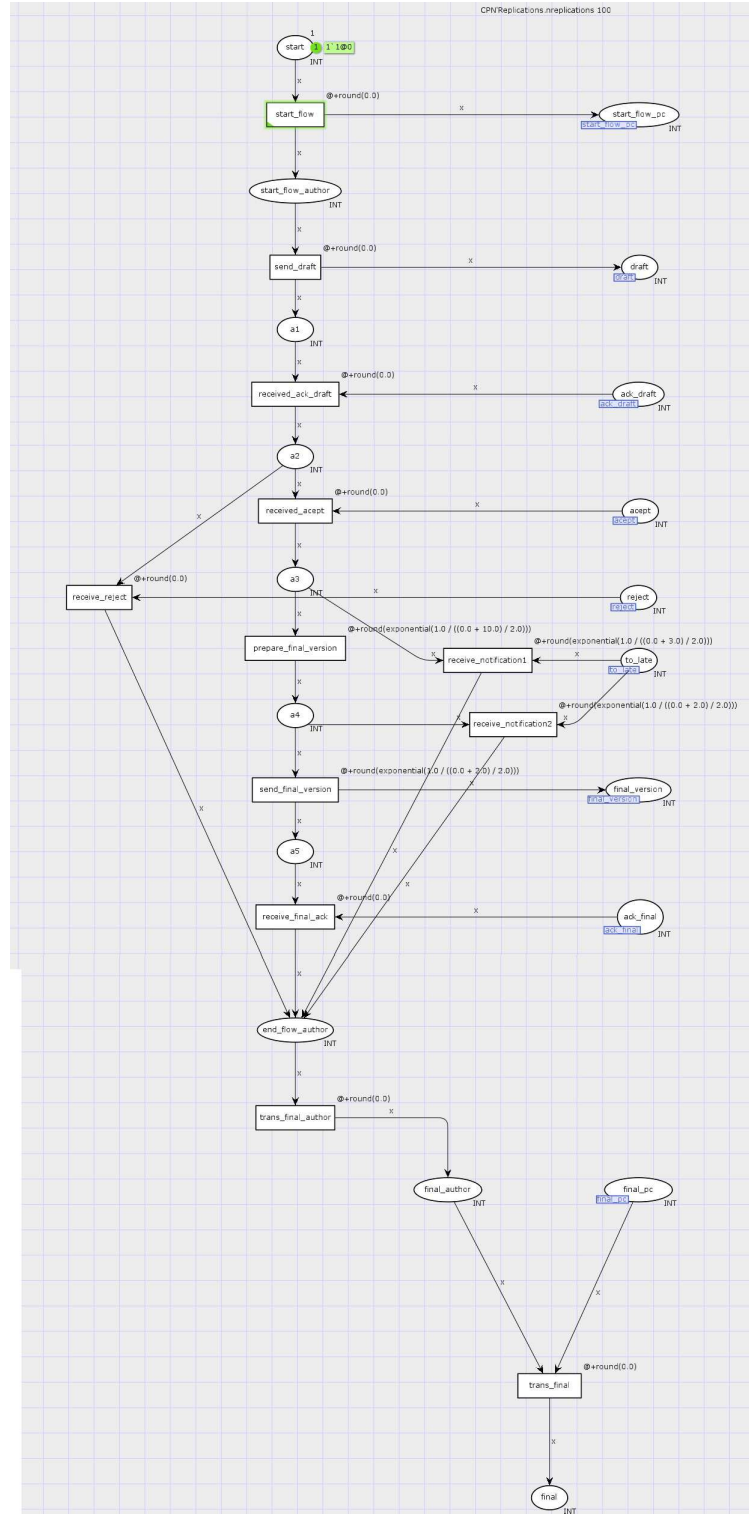


Figura 30 – Modelagem da Workflow Author - Exponencial - Não Sound

projeto, utilizando a mesma distribuição Uniforme, estão contidos nos intervalos produzidos pela análise de sequentes da lógica linear realizada em [Passos e Julia \(2016\)](#).

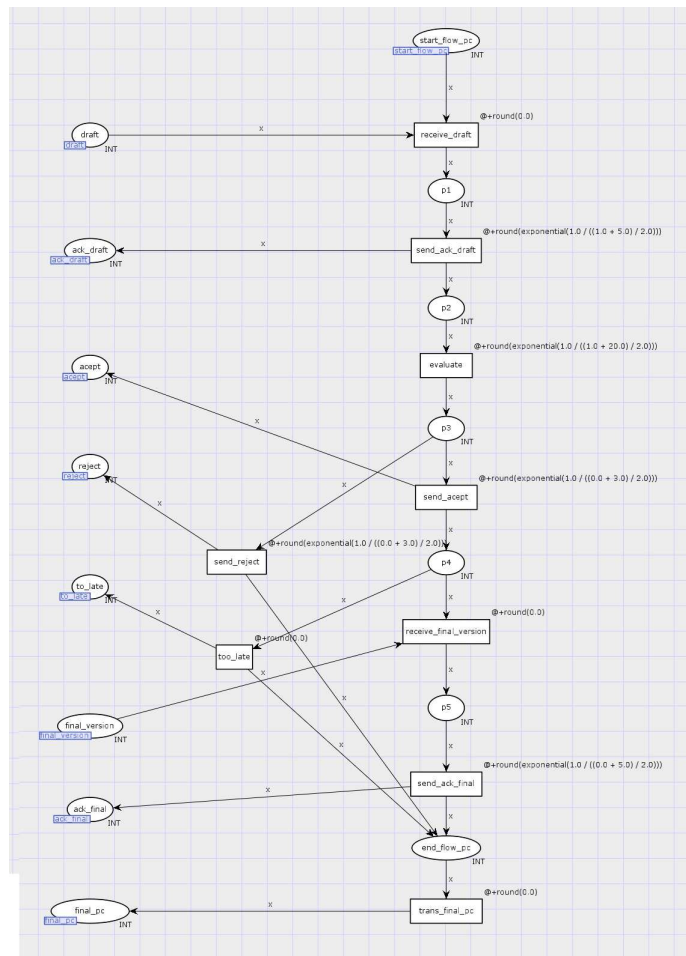


Figura 31 – Modelagem da Workflow PC - Exponencial - Não Sound

Tabela 2 – Resultados

	Intervalo de tempo
Lógica Linear - Não Sound	[2,45]
CPN Tools - Não Sound - Uniforme	[4,34]
Aaslt - Sound - Uniforme	[4,34]
CPN Tools - Não Sound - Exponencial	[2,52]
Aaslt - Sound - Exponencial	[3,53]

7 Considerações Finais

Este trabalho formaliza um processo de modelagem de processos interorganizacionais utilizando uma ferramenta chamada CPN Tools, tanto para a análise qualitativa, na qual validados os modelos segundo a sua corretude, como também para análise quantitativa, na qual valida-se o tempo de execução dos modelos. O *software CPN Tools* fornece uma gama de ferramentas que podem ser utilizadas para analisar modelos construídos com as redes de Petri coloridas. A possibilidade de utilizar a linguagem *Standard ML* para programar os monitores e outras ferramentas expande ainda mais a capacidade do simulador, deixando a cargo do analista as opções de simulações a serem implementadas. Com a ferramenta de monitoração, o *CPN Tools* pode ser utilizado para o problema de análise de confiabilidade e desempenho no contexto de sistemas computacionais distribuídos que precisam respeitar restrições de tempo explícitos (tempo real) como por exemplo, os sistemas de gerenciamento de *workflow*. A análise qualitativa obtida pelo *CPN Tools* comparada à análise por sequentes da lógica linear apresentada em [Passos e Julia \(2009\)](#) apresentam os mesmos resultados quanto ao modelo simulado. Tal estudo poderá, então, ser utilizado para validar experimentalmente os resultados analíticos que foram produzidos no trabalho ([PASSOS; JULIA, 2009](#)).

Neste estudo a maior dificuldade encontrada foi a parte de modelagem dos processos no CPN Tools, na qual foi necessário um grande estudo em relação às suas funcionalidades e principalmente em relação ao *Fusion Place*, utilizado para modelar os lugares de comunicação das *Workflow net Interorganizacional*.

Na análise qualitativa, temos como premissa a verificação da propriedade *soundness* nos processos modelados, logo foi modelado um processo interorganizacional proposto por Aalst, e a constatação de que tal modelo não era *sound*. A propriedade *soundness* é encontrada em alguns modelos de processo. Porém, em Fahland et al. 2011 é feita a análise de 735 processos industriais incluindo finanças, telecomunicações entre outras áreas, e a conclusão produzida é que a maioria dos processos não são *sound*, podendo então, entrar em uma situação de bloqueio ou *deadlock*. Dessa forma, para trabalhos futuros, o objetivo será de analisar e simular processos passíveis de *deadlock*, bem como estudar maneiras de como contornar tais situações de *deadlock* em tempo de execução.

Já na análise quantitativa, em cima do processo modelado, foi representado o tempo nas transações e coletados através dos monitores, os intervalos de tempo na qual o processo levou para a finalização.

Criar redes grandes e intrincadas pode ser uma tarefa pesada. Mas, semelhante à programação modular, a construção de redes CP pode ser dividida em peças menores,

utilizando as instalações dentro das ferramentas CPN para criar transições de substituição. Conceitualmente, as redes com transições de substituição são redes com várias camadas de detalhes - pode-se ter uma rede um tanto simplificada que fornece uma ampla visão geral do sistema que está sendo modelada, ao substituir as transições desta rede de nível superior por páginas mais detalhadas, você pode Traga cada vez mais detalhes no modelo. Nas redes hierárquicas existe um método pelo qual uma transição pode representar uma estrutura inteira de rede, de modo que a rede que contém a transição executa como se a lógica que a transição representasse fisicamente presente na localização da transição. Essa transição é uma transição de substituição.

Com isso uma abordagem futura seria a análise de uma rede Hierárquica, sendo uma proposta de modelagem e análise da propriedade *sound*, análise qualitativa, desta *workflow net*.

Referências

- AALST, W. Three good reasons for using a petri-net-based workflow management system. *Proceedings of the International Working Conference on Information and Process Integration in Enterprises (IPIC'96)*., p. 179–201, 1996. Citado na página 32.
- AALST, W. Loosely coupled interorganizational workflows: modeling and analyzing workflows crossing organizational boundaries. Elsevier Science Publishers B. V., Amsterdam, The Netherlands, v. 37, n. 2, p. 67–75, 2000. Citado na página 32.
- AALST, W.; HEE, K. Workflow management: Models, methods, and systems. The MIT Press Cambridge, Massachusetts. London, England, 2004. Citado 7 vezes nas páginas 5, 11, 12, 19, 20, 21 e 41.
- AALST, W. M. P. van der. The application of petri nets to workflow management. *In: The Journal of Circuits, Systems and Computers*, p. 21–66, 1998. Citado 10 vezes nas páginas 5, 12, 18, 19, 21, 22, 23, 32, 35 e 41.
- AALST, W. M. P. van der. Modeling and analyzing interorganizational workflows. *Application of Concurrency to System Design, 1998. Proceedings., 1998 International Conference on*, p. 262–272, 1998. Citado na página 45.
- AALST, W. M. P. van der. Modern business process automation. *In: HOFSTEDE, A. H. M. (Ed.)*, p. 3–19, 2010. Citado 2 vezes nas páginas 11 e 13.
- AALST W. VAN DER; STAHL, C. Modeling business processes. *MIT Press*, p. 20–25, 2011. Citado 3 vezes nas páginas 19, 28 e 34.
- BORGES, G. A. P. Fluxo de dados em redes de petri coloridas e em grafos orientados a atores. Dissertação (Mestrado) — Instituto de Matemática e Estatística, USP, <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/45/45134/tde-30102008-193432/pt-br.php>, 2008. Citado na página 26.
- CARDOSO J.; VALETTE, R. Redes de petri. *Editora da UFSC*, <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=1883453.1883459>, 1997. Citado na página 26.
- DAVID, R.; ALLA, H. Discrete, continuous, and hybrid petri nets. The MIT Press Cambridge, Massachusetts. London, England, 2005. Citado na página 16.
- FERNANDES, J. M.; TJELL, S.; JORGENSEN, J. B. Requirements engineering for reactive systems with coloured petri nets: the gas pump controller example. Citado na página 27.
- JENSEN, K.; KRISTENSEN, L. M.; WELLS, L. Coloured petri nets and cpn tools for modelling and validation of concurrent systems. *Int. J. Softw. Tools Technol. Transf.*, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, <http://dx.doi.org/10.1007/s10009-007-0038-x>, v. 9, n. 3, p. 213–254, 2007. Citado na página 26.

- JENSEN, K.; KRISTENSEN, L. M.; WELLS, L. Coloured petri nets and cpn tools for modelling and validation of concurrent systems. *Int. J. Softw. Tools Technol. Transf.*, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, v. 9, n. 3, p. 213–254, 2007. Citado na página 27.
- LOMAZOVA, I. A. Interacting workflow nets for workflow process re-engineering. *The Netherlands*, <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=1883453.1883459>, v. 101, n. 1–2, p. 59–70, 2010. Citado na página 11.
- MORTENSEN, K. H. Petri nets: Properties, analysis and applications. *Proceedings of the 21st International Conference on Application and Theory of Petri Nets*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2000. Citado na página 27.
- MURATA, T. Petri nets: Properties, analysis and applications. *Proceedings of the IEEE*, v. 77, n. 4, p. 541–580, 1989. Citado na página 16.
- PASSOS, L.; JULIA, S. Qualitative analysis of workflow nets using linear logic: soundness verification. *Proceedings of the 2009 IEEE international conference on Systems, Man and Cybernetics*, p. 2843–2847, 2009. Citado 3 vezes nas páginas 32, 33 e 56.
- PASSOS, L.; JULIA, S. Linear logic as a tool for qualitative and quantitative analysis of workflow processes. Aceito para publicação no "International Journal on Artificial Intelligence Tools", 2015. Citado na página 33.
- PASSOS, L.; JULIA, S. Uma metodologia baseada na lógica linear para análise de processos de workflow interorganizacionais. Faculdade de Computação, UFU, 2016. Citado 5 vezes nas páginas 4, 14, 45, 53 e 54.
- PETRI, C. A. Kommunikation mit automaten. *Institut für instrumentelle Mathematik, Germany*, 1962. Citado na página 16.
- REZENDE, L. P. de. Site. Dissertação (Mestrado) — Faculdade de Computação, UFU, 2013. Citado na página 18.
- ROCHA; JULIA, S. Modelagem e simulação de processos de negócios utilizando *Workflow Nets* e o simulador cpn tools. 2015. Citado na página 34.
- SANTOS, C. conceitos-e-fundamentos-de-processo-de-negocios. *CEVIU Blog*, <http://blog.ceviu.com.br/info/artigos/conceitos-e-fundamentos-de-processo-de-negocios/>, 2014. Citado na página 11.
- SUN H. C.; DU, Y. Y. Soundness analysis of inter-organizational workflows. *Information Technology Journal*, v. 7, p. 1194–1199, 2008. Citado na página 32.
- TOOLS, C. Workflow netpossibilística para problemas de não conformidade em processos de negócios. <http://cpntools.org/>, 2015. Citado na página 27.
- YAMAGUCHI, S. Wf-net based modeling and soundness verification of interworkflows. *IEICE Trans. Fundam. Electron. Commun. Comput. Sci.*, Oxford University Press, Oxford, UK, n. 4, p. 829–835, 2007. Citado na página 32.

Anexos

ANEXO A – Relatório State Space modelo Não Sound

CPN Tools state space report for:
 /cygdrive/C/Users/Frederico/Desktop/TCC/TCC
 Final/Qualitativa/Workflow - NotSound -
 Qualitativa.cpn
 Report generated: Wed May 10 18:43:46 2017

Statistics

State Space

Nodes: 34
 Arcs: 54
 Secs: 0
 Status: Full

Scc Graph

Nodes: 3
 Arcs: 4
 Secs: 0

Boundedness Properties

Best Integer Bounds

	Upper	Lower
Author'a1 1	1	0
Author'a2 1	1	0
Author'a3 1	1	0
Author'a4 1	1	0
Author'a5 1	1	0
Author'accept 1	1	0

Author'ack_draft 1	1	0
Author'ack_final 1	1	0
Author'draft 1	1	0
Author'end_flow_author 1		
	1	0
Author'final_version 1	1	0
Author'place_t_author 1	1	0
Author'place_t_pc 1	1	0
Author'reject 1	1	0
Author'start 1	1	0
Author'start_flow_author 1		
	1	0
Author'start_flow_pc 1	1	0
Author'to_late 1	1	0
PC'accept 1	1	0
PC'ack_draft 1	1	0
PC'ack_final 1	1	0
PC'draft 1	1	0
PC'end_flow_pc 1	1	0
PC'final_version 1	1	0
PC'p1 1	1	0
PC'p2 1	1	0
PC'p3 1	1	0
PC'p4 1	1	0
PC'p5 1	1	0
PC'place_t_pc 1	1	0
PC'reject 1	1	0
PC'start_flow_pc 1	1	0
PC'to_late 1	1	0

Home Properties

Home Markings

[32]

Liveness Properties

Dead Markings

[32]

Dead Transition Instances

None

Live Transition Instances

None

ANEXO B – Relatório State Space modelo Sound

CPN Tools state space report for:
 /cygdrive/C/Users/Frederico/Desktop/TCC/TCC
 Final/Qualitativa/Workflow - Sound
 - Qualitativa.cpn
 Report generated: Wed May 10 18:45:50 2017

Statistics

State Space

Nodes: 34
 Arcs: 56
 Secs: 0
 Status: Full

Scc Graph

Nodes: 1
 Arcs: 0
 Secs: 0

Boundedness Properties

Best Integer Bounds

	Upper	Lower
Author'a1 1	1	0
Author'a2 1	1	0
Author'a3 1	1	0
Author'a4 1	1	0
Author'a5 1	1	0
Author'accept 1	1	0

Author'ack_draft 1	1	0
Author'ack_final 1	1	0
Author'draft 1	1	0
Author'end_flow_author 1		
	1	0
Author'final_version 1	1	0
Author'place_t_author 1	1	0
Author'place_t_pc 1	1	0
Author'reject 1	1	0
Author'start 1	1	0
Author'start_flow_author 1		
	1	0
Author'start_flow_pc 1	1	0
Author'to_late 1	1	0
PC'accept 1	1	0
PC'ack_draft 1	1	0
PC'ack_final 1	1	0
PC'draft 1	1	0
PC'end_flow_pc 1	1	0
PC'final_version 1	1	0
PC'p1 1	1	0
PC'p2 1	1	0
PC'p3 1	1	0
PC'p4 1	1	0
PC'p5 1	1	0
PC'place_t_pc 1	1	0
PC'reject 1	1	0
PC'start_flow_pc 1	1	0
PC'to_late 1	1	0

Home Properties

Home Markings

All

Liveness Properties

Dead Markings

None

Dead Transition Instances

None

Live Transition Instances

All

ANEXO C – Modelagem - Exponencial - Sound no CPN TOOLS

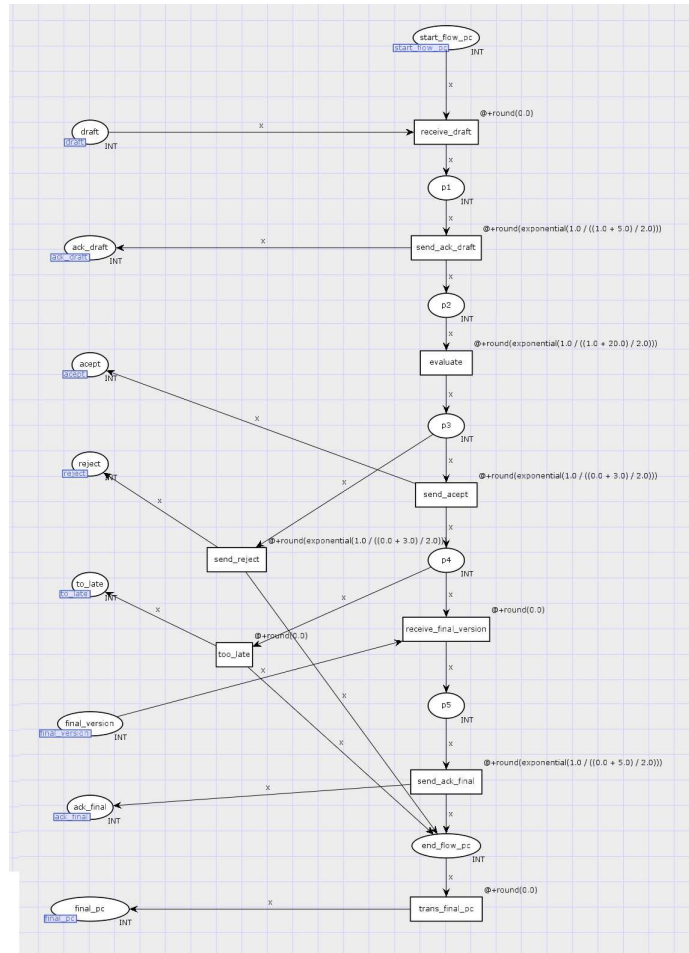


Figura 32 – Modelagem da Workflow PC - Exponencial - Sound

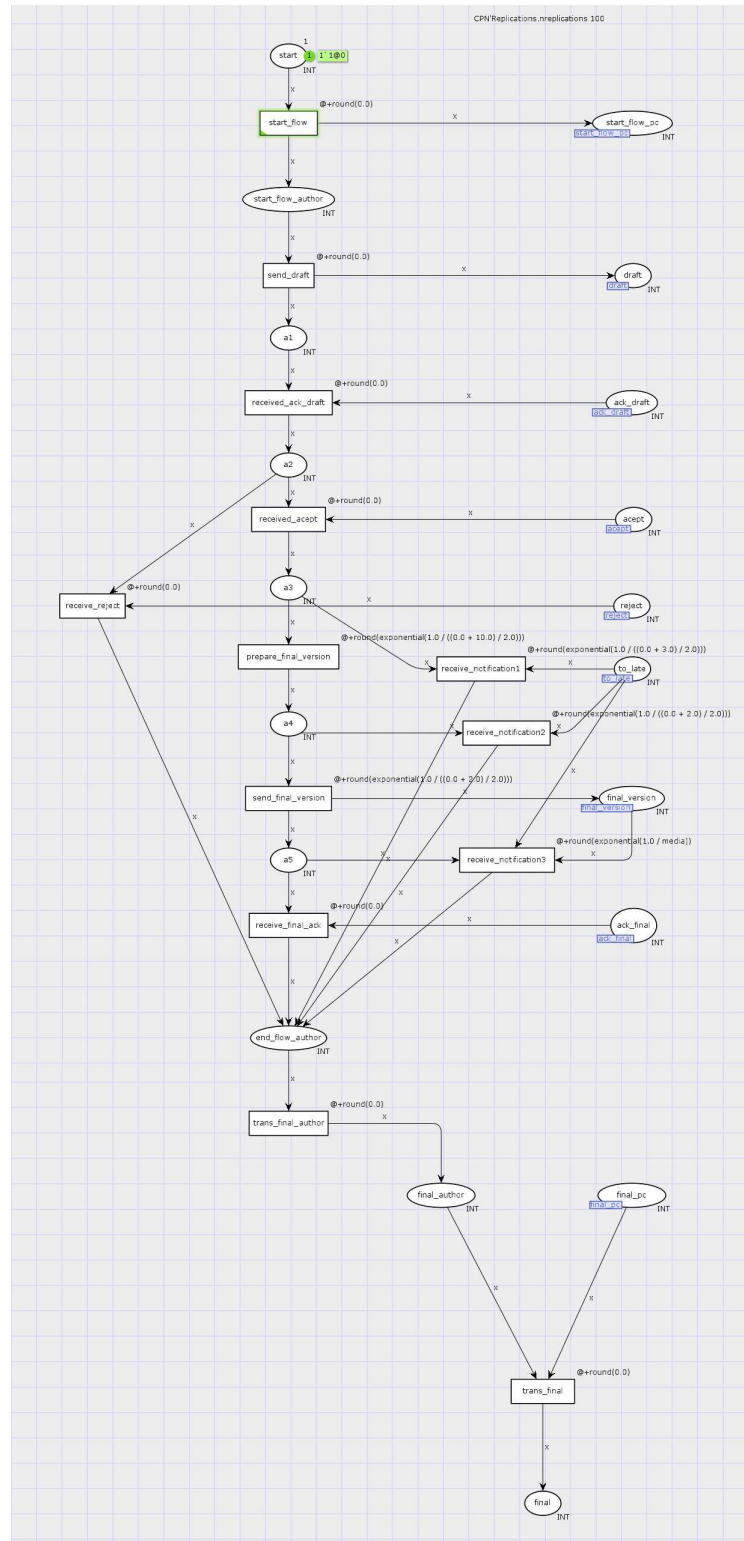


Figura 33 – Modelagem da Workflow Author - Exponencial - Sound

ANEXO D – Relatório Simulação - Não Sound

CPN Tools Performance Report
 Net: /cygdrive/C/Users/Frederico/Desktop/TCC/TCC Final/Quantitativa/NotSound/Workflow - NotSound - Quantitativa - Uniforme - ligia.cpn
 Number of replications: 50

Statistics							
Name	Avrg	90% Half Length	95% Half Length	99% Half Length	StD	Min	Max
EndPlace							
count_iid	11.940000	0.286310	0.343606	0.459729	1.202209	11	14
max_iid	15.940000	1.722337	2.067009	2.765558	7.232043	4	34
min_iid	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0	0
avrg_iid	3.989146	0.535351	0.642484	0.859613	2.247922	0.950000	10.777778

Generated: Tue May 30 22:21:11 2017

Figura 34 – Relatório da simulação replicada - Não Sound - Uniforme

CPN Tools Performance Report
 Net: /cygdrive/C/Users/Frederico/Desktop/Exponencial Final/Workflow - NoSound - Quantitativa - Exponencial.cpn
 Number of replications: 100

Statistics							
Name	Avrg	90% Half Length	95% Half Length	99% Half Length	StD	Min	Max
EndPlace							
count_iid	12.120000	0.202584	0.242370	0.321579	1.216719	11	14
max_iid	16.760000	1.606996	1.922604	2.550926	9.651629	2	52
min_iid	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0	0
avrg_iid	3.670507	0.368124	0.440422	0.584355	2.210955	0.000000	11.509804

Figura 35 – Relatório da simulação replicada - Não Sound - Exponencial

ANEXO E – Relatório Simulação - Sound

CPN Tools Performance Report
 Net: /cygdrive/C/Users/Frederico/Desktop/TCC/TCC Final/Quantitativa/Sound/Workflow - Sound - Quantitativa - Uniforme - ligia.cpn
 Number of replications: 50

Statistics							
Name	Avrg	90% Half Length	95% Half Length	99% Half Length	StD	Min	Max
EndPlace							
count_iid	12.580000	0.385185	0.462268	0.618492	1.617380	11	15
max_iid	18.460000	1.590838	1.909194	2.554409	6.679881	4	34
min_iid	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0	0
avrg_iid	4.613923	0.524248	0.629160	0.841785	2.201303	0.750000	10.516129

Generated: Tue May 30 22:26:34 2017

Figura 36 – Relatório da simulação replicada - Sound - Uniforme

CPN Tools Performance Report
 Net: /cygdrive/C/Users/Frederico/Desktop/Exponencial Final/Workflow - Sound - Quantitativa - Exponencial.cpn
 Number of replications: 100

Statistics							
Name	Avrg	90% Half Length	95% Half Length	99% Half Length	StD	Min	Max
EndPlace							
count_iid	12.720000	0.277076	0.331493	0.439827	1.664119	11	15
max_iid	19.180000	1.883343	2.253225	2.989595	11.311369	3	53
min_iid	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0	0
avrg_iid	4.676624	0.557092	0.666503	0.884321	3.345900	0.000000	14.468085

Figura 37 – Relatório da simulação replicada - Sound - Exponencial