

TÉCNICAS DE REDES DE PETRI APLICADAS A ESTIMADOR DE QUALIDADE DE ENLACE COM LÓGICA PARACONSISTENTE ANOTADA COM ANOTAÇÃO DE 2 VALORES EM SISTEMAS INDUSTRIAIS SEM FIO

Arnaldo de Carvalho Junior

Mestre em Engenharia, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo, Campus Cubatão (IFSP Cubatão), SP, Brasil.

Mauricio Fontoura Blos

Doutor em Engenharia, UNISANTA, Santos, SP, Brasil.

RESUMO: É apresentado neste trabalho uma Rede de Petri utilizada para modelar e representar o enlace de um sistema industrial sem fio onde o elemento receptor coleta duas métricas a cada quadro de dados recebido, intensidade e qualidade do sinal, para serem utilizadas para formular um indicador único robusto e consistente, por um estimador de qualidade do enlace, baseado em lógica paraconsistente anotada (EQE-LPA2V2v).

Palavras-chave: Rede de Sensores Industriais Sem Fio. Redes de Petri. LPA2v. EQE-LPA2V2v.

ABSTRACT: is presented in this work a Petri Net used to model and represent the link of a wireless industrial system where the receiver element collects two metrics to each received data frame, signal intensity and quality, to be used to formulate a robust single indicator and consistent, by a link quality estimator based on annotated paraconsistent logic (EQE-LPA2V2v).

Keywords: Wireless Sensor Network. Petri Net. PAL2v. LQE-PAL2V2v.

INTRODUÇÃO

A demanda por sistemas conectados, efeito da revolução tecnológica conhecida como “Internet das Coisas” (*IoT-Industrial Internet of Things*), é possível graças ao avanço da microeletrônica que permitiu sistemas com maior poder de processamento e menor consumo de energia, aliados a sistemas de análise de grandes conjuntos de dados (WEISS; YU; 2015). Agilidade de instalação e integração aos processos de negócio

impulsionaram a criação de padrões para rede de sensores sem fio – *WSN (Wireless Sensor Network)* (GUNGOR; HANCKE, 2009), tais como Zigbee, ISA100a e WirelessHART, baseados no padrão IEEE 802.15.4, que especifica redes sem fio de área pessoal de baixa taxa – *LR-WPAN (Low Rate-Wireless Personal Area Network)*, faixa de 2400-2483.5 MHz, até 250kbps e espalhamento espectral de sequência direta – *DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum)* com até 16 portadoras.

A estimativa da qualidade do enlace é importante em redes de sensores sem fio de baixa energia, pois quanto menor potência necessária para a transmissão dos dados, menor a taxa de retransmissões por falhas e menor o recálculo e mudança de rotas, maior a durabilidade das baterias (BACCOUR et al., 2010).

Em função da baixa capacidade de processamento aliada a necessidade de baixo consumo, o estimador da qualidade do enlace deve ser simples, porém confiável, obtido a partir de parâmetros disponíveis e de fácil acesso no sensor (BACCOUR et al., 2010).

O padrão IEEE 802.15.4 disponibiliza a Indicação de Intensidade de Sinal Recebido - *RSSI (Received Signal Strength Indication)* e Indicação de Qualidade do Enlace – *LQI (Link Quality Indication)*, compostos cada um de 1 Byte (8 bits) disponíveis a cada transmissão de dados (JAYASRI; HEMALATHA, 2014).

O RSSI é uma medida bruta instantânea da potência em uma determinada banda, antes do processo de demodulação e pode apresentar valores errôneos em função da captação de interferentes, outros transmissores, efeito de multipercurso da propagação, entre outros fatores (ZHENG et al., 2011).

O LQI, métrica prevista no padrão 802.15.4 é baseado na facilidade de demodulação dos símbolos (chip error rate). O LQI é um indicador simples no processo de demodulação do sinal digital e exibe alta correlação com a taxa de recebimento de pacotes – *PRR (Packet Received Rate)*. Um valor de LQI médio pode ser mais útil do que um valor instantâneo para o cálculo da qualidade média do enlace (ZHENG et al., 2011).

A Lógica Paraconsistente trabalha com situações em que tanto uma sentença como sua negação podem ser verdadeiras (DA SILVA FILHO, 2006). Além dos valores verdadeiro e falso, uma proposição pode ter outros valores, tais como inconsistente e indeterminado. Quando múltiplas inferências têm inconsistências, a Lógica Anotada Paraconsistente com anotação de dois valores (PAL2v) tem sido adequada, usando o

conhecimento de evidências para ajudar a resolver conflitos (DA COSTA et al., 1999) (DA SILVA FILHO, 2006). O Nó de Análise Paraconsistente (NAP) é formado por um conjunto de algoritmos cuja origem está na interpretação da rede da Lógica Paraconsistente. Este nó é o bloco básico da célula neural artificial Paraconsistente (CNAP). Um tipo de CNAP é a Célula Neural Artificial Paraconsistente de Aprendizagem (CNAPap) que pode ser usada para reconhecer padrões (DA SILVA FILHO, 2007).

A rede de Petri é uma das várias representações matemáticas para sistemas distribuídos discretos (BLOS, 2016). Este artigo apresenta o modelamento de uma Rede de Petri para a coleta das métricas *RSSI* e *LQI*, filtragem e formulação de um indicador único por um Estimador de Qualidade de Enlace, baseado em Lógica Paraconsistente Anotada com Anotação de 2 valores (CARVALHO JUNIOR, 2017).

REVISÃO DA LITERATURA

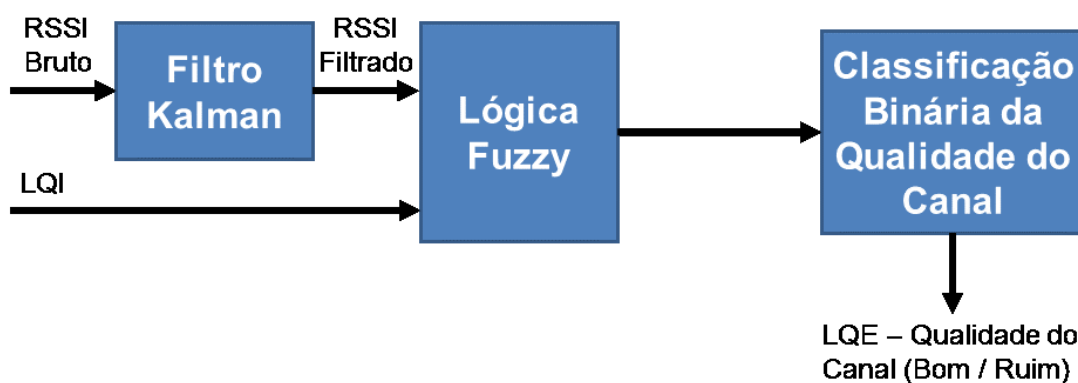
Em estatística, o filtro de Kalman é um método matemático criado por Rudolf Kalman. Seu propósito é utilizar medições de grandezas realizadas ao longo do tempo (contaminadas com ruído e outras incertezas) e gerar resultados que tendam a se aproximar dos valores reais das grandezas medidas e valores associados. O filtro de Kalman produz estimativas dos valores reais de grandezas medidas e valores associados predizendo um valor, estimando a incerteza do valor predito e calculando uma média ponderada entre o valor predito e o valor medido. O peso maior é dado ao valor de menor incerteza. As estimativas geradas pelo método tendem a estar mais próximas dos valores reais que as medidas originais pois a média ponderada apresenta uma melhor estimativa de incerteza que ambos os valores utilizados no seu cálculo (CHUI; CHEN, 2009).

A lógica difusa é a forma de lógica multivalorada na qual os valores lógicos das variáveis podem ser qualquer número real entre 0 (FALSO) e 1 (VERDADEIRO). Diferentemente, na lógica booleana, os valores lógicos das variáveis podem ser apenas 0 e 1. A lógica difusa foi estendida para lidar com o conceito de verdade parcial, onde o valor verdade pode compreender entre completamente verdadeiro e completamente falso. O termo lógico difuso foi introduzido em 1965 com a proposta da teoria de conjuntos

difusos por Lofti A. Zadeh. As implementações da lógica difusa permitem que estados indeterminados possam ser tratados por dispositivos de controle (NÓVAK et al., 1999).

O Estimador de Qualidade de Enlace proposto utiliza como referência o descrito por Jayasri e Hemalatha (2014). Ele utiliza um filtro Kalman para suavizar os valores instantâneos de RSSI, que juntamente com um valor médio de LQI, é aplicado a uma lógica Fuzzy para estimar a qualidade do enlace, conforme a figura 1.

Figura 1 - Estimador de Qualidade de Enlace por Kalman – Fuzzy

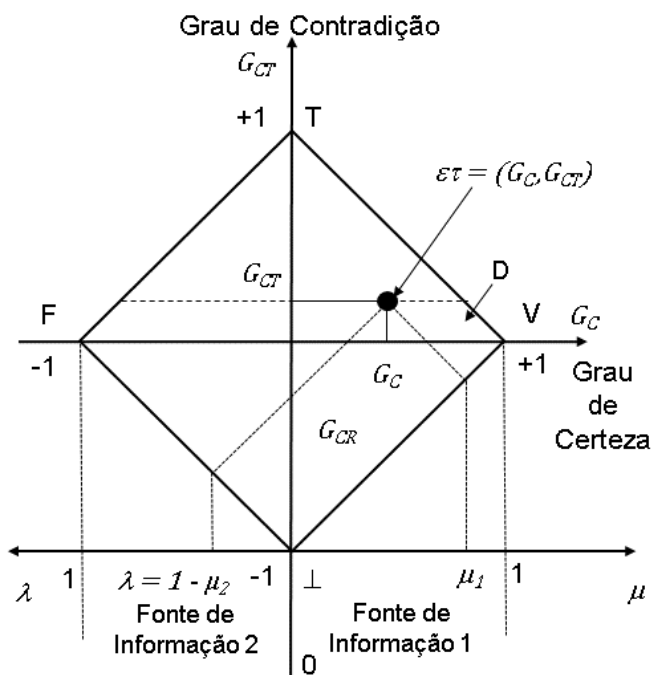


As Lógicas Paraconsistentes nasceram da necessidade de se encontrar meios de dar tratamento às situações contraditórias. Em muitos estudos, apresentaram resultados que possibilitam considerar as inconsistências em sua estrutura de um modo não trivial e por isso, se mostram mais propícias no enquadramento de problemas ocasionados por situações de contradições que aparecem quando lidamos com o mundo real. A Lógica Paraconsistente Anotada de anotação com dois valores - LPA2v mostra-se adequada quando se utiliza o conhecimento de evidências para ajudar a resolver conflitos, quando várias inferências inconsistentes ocorrem. Neste trabalho as contradições são tratadas conforme a LPA2v, e a análise das evidências nos leva a situações de saída que vamos denominar de estados lógicos resultantes. A saída pode ser de 2 tipos: situações de estados extremos que são, Falso, Verdadeiro, Inconsistente e Paracompleto, e as situações de estados denominados de não-extremos, todos representados no reticulado. Para considerar o raciocínio evidencial através da Lógica Paraconsistente Anotada, dois valores, de evidência favorável (\bar{I}) e desfavorável (L), à proposição são agora associados

a uma anotação do reticulado ($\Sigma |$), a partir do Grau de Certeza (G_C) e Grau de Contradição (G_{CT}), conforme apresentado na figura 2 (DA SILVA FILHO, 2006).

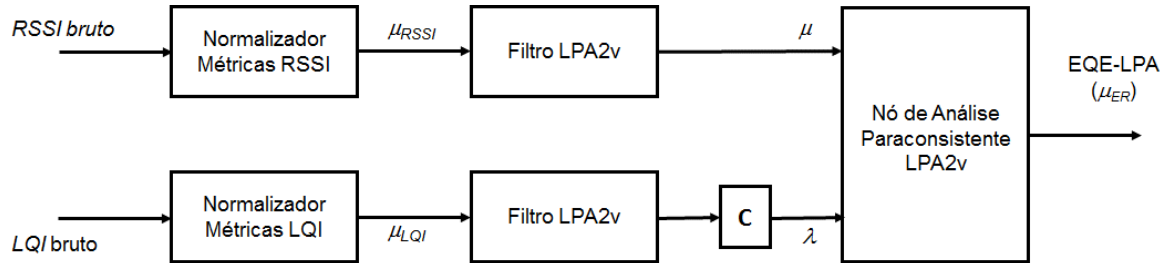
O NAP ou Nó de Análise Paraconsistente é um módulo de algoritmo da LPA2v. O NAP é a base de uma célula neural artificial paraconsistente, ou CNAP. Uma rede de CNAP realimentadas (chamadas de aprendizagem - cNAPap) pode ser utilizada para o cálculo de média e, por consequência, a formação de filtros (Da Silva Filho et al., 2014). Uma rede de cNAPap ou de sua variação, cNAPapxct (MINICZ et al., 2014), pode ser utilizada para filtragem de sinais em substituição ao filtro de Kalman, recebendo o nome de Filtro LPA2v (CARVALHO JR; DA SILVA FILHO; MARIO, 2018).

Figura 2 – Reticulado LPA2v



O EQE proposto por Carvalho Junior (2017) utiliza Filtro de média composto de CNAPapxct em cascata em substituição ao Filtro Kalman e de um NAP LPA2v em substituição da Lógica Fuzzy, conforme a figura 3 a seguir.

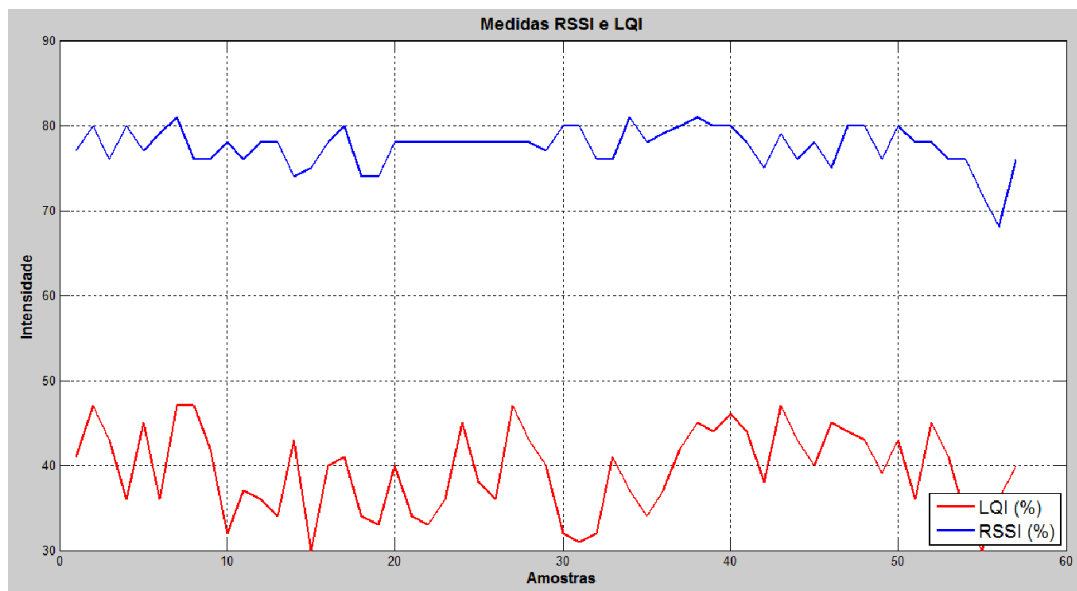
Figura 3 - Estimador de Qualidade de Enlace baseado em LPA2v



Fonte: Carvalho Junior (2017, f. 32, p. 52).

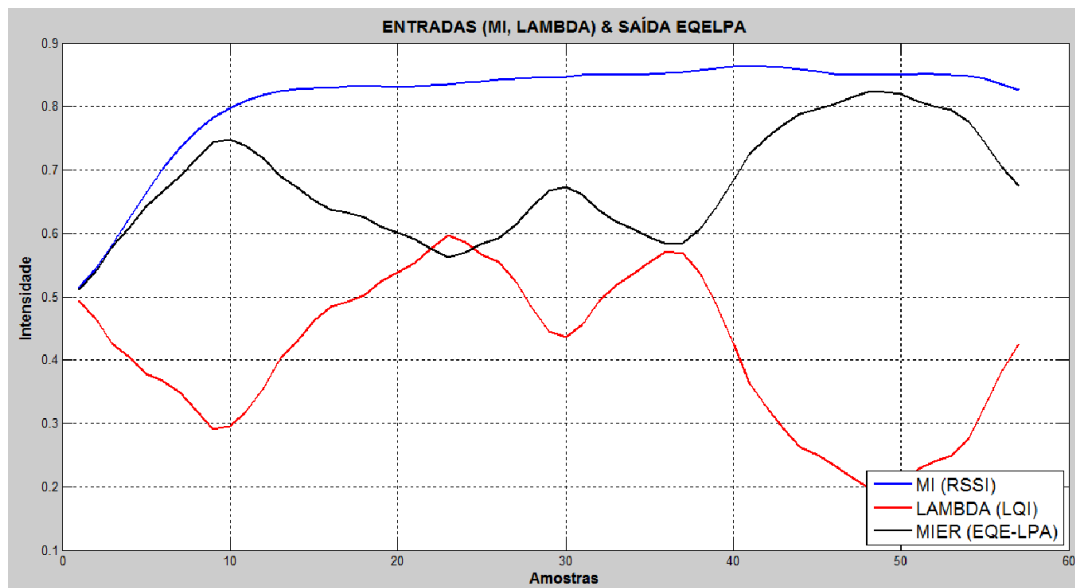
A figura 4 apresenta os sinais de *RSSI* e *LQI* após a conversão de 8 bits em informação numérica, entre 0 e 100%, conforme utilizado pelo sensor utilizado (Transceptor UBEE da Fractum ®). A figura 5 apresenta os sinais *RSSI* e *LQI* na forma de evidências \lceil e \lfloor , para as mesmas medidas apresentadas na figura 5, filtrados pelo Filtro LPA2v. Também apresenta a saída do NAP após o cálculo do EQE-LPA2V.

Figura 4 – Métricas de *RSSI* e *LQI* coletadas



Fonte: Carvalho Junior (2017, f. 63, p. 76).

Figura 5 – RSSI (μ), LQI (λ) e saída EQE-LPA2V



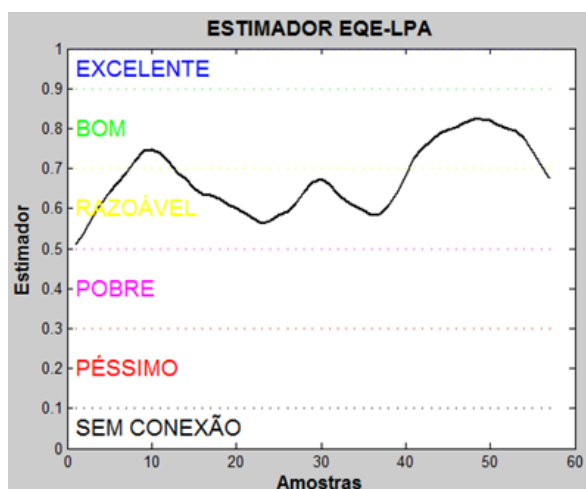
Fonte: Carvalho Junior (2017, f. 64, p. 76)

As métricas utilizadas guardam certas contradições e por essa razão pode ser aplicada o LPA2v para o EQE. A proposição – A qualidade do Enlace é Boa? – é apresentada, sendo que os cenários extremos podem ocorrer:

- Se RSSI é baixa e LQI é alta, qualidade do Link é Boa (contradição, já que podem degradar a qualquer instante com uma piora continuada da RSSI)
- Se RSSI é baixa e LQI é baixa, a qualidade do Link é Baixa (Pobre)
- Se RSSI é alta e LQI é baixa, a qualidade do Link é Baixa (Pobre)
- Se RSSI é alta e LQI é alta, a qualidade do Link é Boa

A figura 6 apresenta um exemplo de indicação do EQE após a aplicação dos valores de RSSI (μ) e LQI (λ) ao NAP LPA2v. A tabela 1 apresenta os valores utilizados para os intervalos de decisão do Grau de Evidência Resultante Real ($\hat{\mu}$ ER).

Figura 6 - Estimador de Qualidade do Enlace (EQE-LPA2V)



Fonte: Carvalho Junior (2017, f. 65, p. 77).

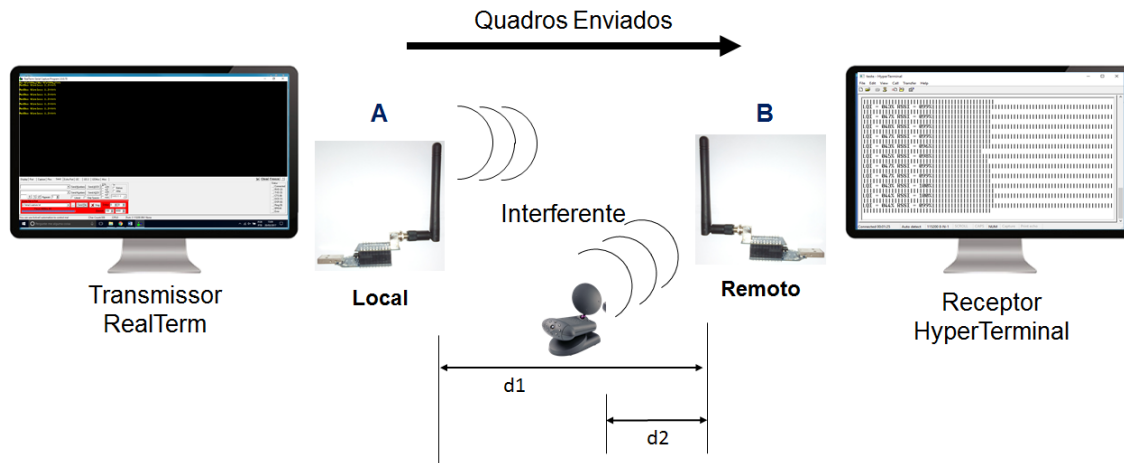
Tabela 1 - Intervalos do LQE

Saída do EQE-LPA	Indicador
$\geq 0,9$	EXCELENTE
$0,7 \leq \mu_{ER} < 0,9$	BOM
$0,5 \leq \mu_{ER} < 0,7$	RAZOÁVEL
$0,3 \leq \mu_{ER} < 0,5$	POBRE
$0,1 \leq \mu_{ER} < 0,3$	PÉSSIMO
$\leq 0,1$	SEM CONEXÃO

MODELO PROPOSTO

Um enlace ponto-a-ponto utilizando transceptores sem fio UBEE da empresa Fractum ® é utilizado para a coleta das informações de *RSSI* e *LQI* em diferentes cenários, tais como diferentes distâncias, com e sem interferência forçada, etc. Um dos sensores será conectado a um computador para a coleta dos dados, conforme a figura 7, a seguir.

Figura 7 - Rede Zigbee para coleta de RSSI e LQI



Fonte: Carvalho Junior (2017, f. 41, p. 59)

REDE DE PETRI

Com base nas etapas do processo em tempo real de formulação do sinal de EQE foram elaborados com auxílio do software PIPE2, os módulos de transmissão e recepção de quadros IEEE 802.15.4 de forma simplificada e de Estimador de Qualidade do Enlace EQE-LPA2V, conforme figuras 8 e 9 a seguir.

Na rede da figura 8, a marca (quadro de dados) transita pelas etapas de transmissão até ser enviada ao receptor. No receptor o pacote de dados transita pelas etapas de recepção e ao final, o receptor responde ao transmissor tanto se o pacote foi recebido com erros ou sem erros. Como esta informação é irrelevante para este artigo, não foi necessário a representação em maiores detalhes.

Figura 8 - Rede de Petri para Transmissor e Receptor Zigbee

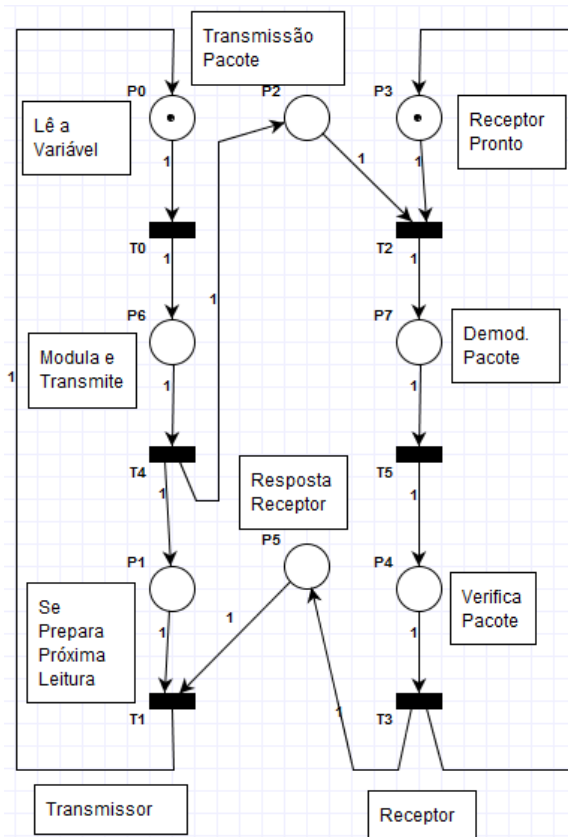
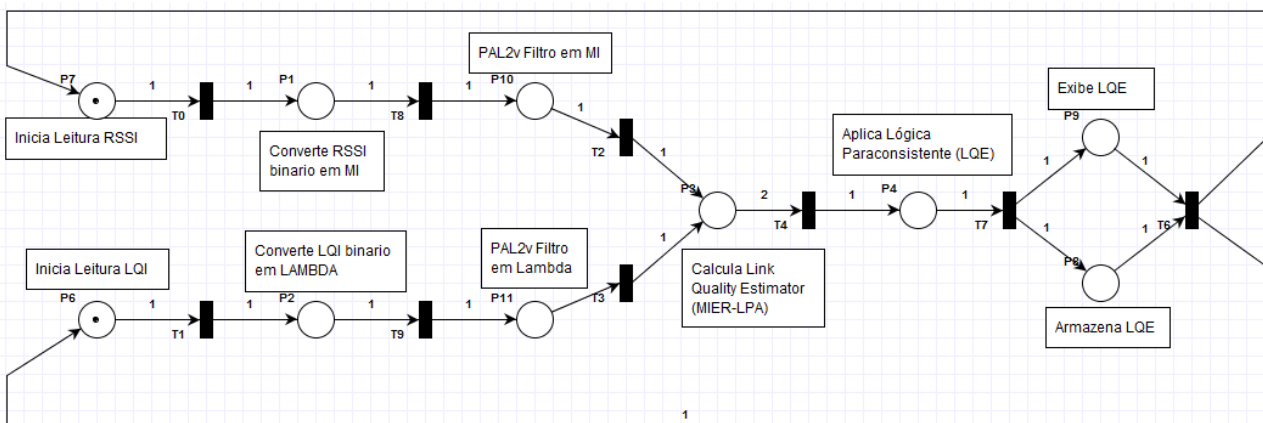


Figura 9 - Rede de Petri para EQE-LPA2V



Na rede da figura 9 as marcas de *RSSI* e *LQI* passam por seus respectivos processos até que quando ambas estão disponíveis o cálculo do Grau de Evidência Real é realizado antes de ser aplicado à lógica paraconsistente para a apresentação da indicação de EQE (ou *LQE* em inglês).

Os modelos foram integrados em uma rede completa conforme figura 10. Já a interpretação das transições e lugares da rede completa é apresentada na tabela 2, a seguir.

Figura 10 - Rede de Petri completa para Rede 802.15.4 e EQE-LPA2V

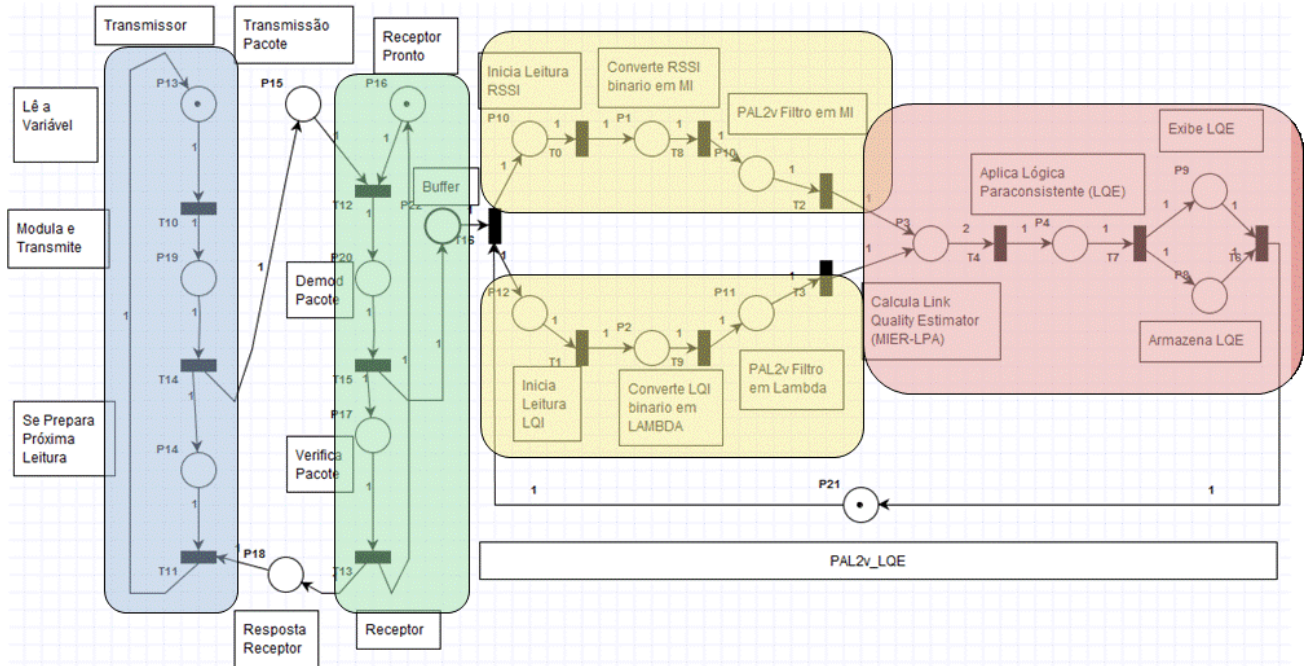


Tabela 2: Interpretação de transições e lugares da Rede de Petri da Figura 8

Nome	Tipo	Descrição
P13	Lugar	Lê o dado a ser transmitido, formata o pacote de transmissão
T10	Transição	Envia pacote para Modulador
P19	Lugar	Faz a Modulação e Transmite o Pacote
T14	Transição	Envia o sinal modulado para a Antena
P14	Lugar	Transmissor se prepara para um novo ciclo de varredura (medição)
T11	Transição	Sinal de novo ciclo é enviado no transmissor
P15	Lugar	Propagação do Sinal Modulado no Ambiente
T12	Transição	Sinal modulado entra pela antena do Receptor
Nome	Tipo	Descrição
P20	Lugar	Demodulação do Pacote no Receptor
T15	Transição	Sinal Recebido é enviado para um buffer com Bytes de RSSI e LQI
P17	Lugar	Verificação de Pacote Recebido
T13	Transição	Receptor envia resposta à transmissor sobre pacote recebido (ACK ou NACK)

P18	Lugar	Propagação no Ambiente da resposta do receptor
P16	Lugar	Receptor se prepara para receber um novo pacote
P22	Lugar	Buffer dos Bytes RSSI e LQI
T16	Transição	Bytes RSSI e LQI são enviados para os respectivos sistemas de tratamento de informação
P10	Lugar	Lê o valor de RSSI em 1 Byte de 8 bits
T0	Transição	Envia o valor de RSSI para normatização (entre 0 e 1) do valor de \lceil
P1	Lugar	Faz a para normatização (entre 0 e 1) do valor de \lceil
T8	Transição	Envia o valor de \lceil (RSSI) para Filtro CNAPap (PAL2v Filter)
P10	Lugar	Faz a suavização (filtragem) do valor de \lceil (RSSI)
T2	Transição	Envia o valor de \lceil para o EQE-LPA2V2v
P12	Lugar	Lê o valor de LQI em 1 Byte de 8 bits
T1	Transição	Envia o valor de LQI para normatização (entre 0 e 1) do valor de \lfloor
P2	Lugar	Faz a para normatização (entre 0 e 1) do valor de \lfloor
T9	Transição	Envia o valor de \lfloor (LQI) para Filtro CNAPap (PAL2v Filter)
P11	Lugar	Faz a suavização (cálculo de média) do valor de \lfloor (LQI)
T3	Transição	Envia os valores de \lceil e \lfloor para o EQE-LPA2V2v
P3	Lugar	Calcula o Grau de Evidência Resultante Real
T4	Transição	Envia o valor de \lceil_{ER} para aplicação da lógica paraconsistente (faixas de valores)
P4	Lugar	Converte o \lceil_{ER} em faixa de valores do EQE-LPA2V2v
T7	Transição	Envia a indicação de EQE-LPA2V2v para registro e exibição
P8	Lugar	Armazena valor de EQE-LPA2V2v
P9	Lugar	Exibe valor de EQE-LPA2V2v
T6	Transição	Envia gatilho para próxima leitura
P21	Lugar	Se prepara para próxima leitura de EQE-LPA2V2v

RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Rede de Petri elaborada foi planejada para não haver travamento (Deadlock), pois há realimentação nos 3 módulos – Transmissor de Dados, Receptor de Dados e módulo EQE-LPA2V2v. Foram executados 2000 gatilhos repetidamente e em nenhum momento a rede apresentou falhas. Infelizmente a ferramenta PIPE2 possui limitações que não permitiram exibir o Grafo de Cobertura/Alcançabilidade, conforme figura 11, a seguir. Já a figura 12 apresenta o resultado da análise de estado/espço, informando que

a rede não possui travamento (Deadlock), enquanto que a figura 13 apresenta os resultados de classificação da Rede de Petri completa desenvolvida.

Figura 11 - Resultados de Grafo de Cobertura / Alcançabilidade da Rede de Petri Completa no PIPE2

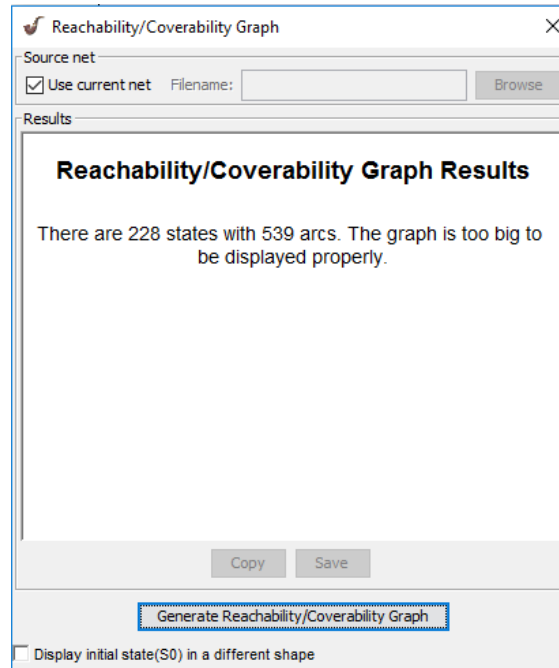
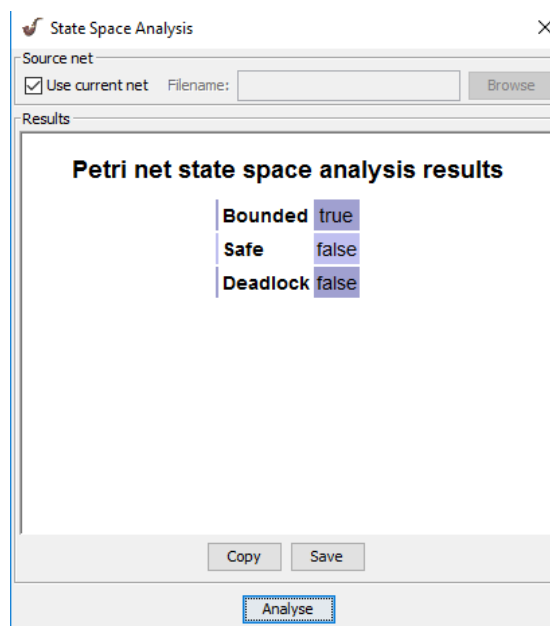


Figura 12 - Resultados de Análise de Estado / Espaço da Rede de Petri Completa no PIPE2



A figura 14 apresenta os resultados de análise de invariantes de transições (T-invariantes) e Lugares (P-invariantes) da Rede de Petri completa, bem como as equações de P-invariantes.

Figura 13 - Resultados de Classificação da Rede de Petri Completa no PIPE2

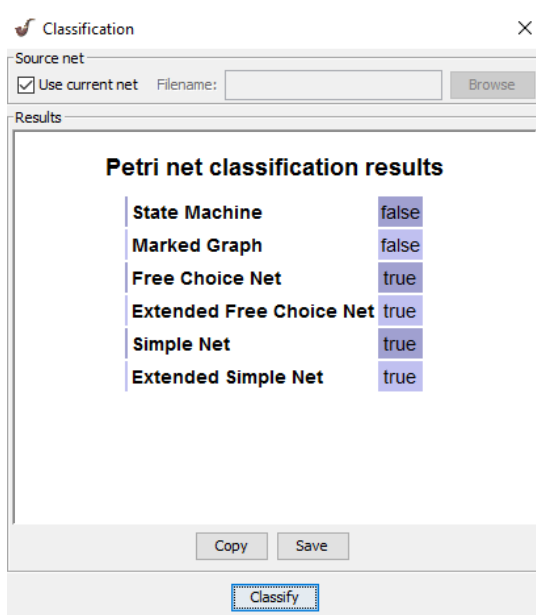
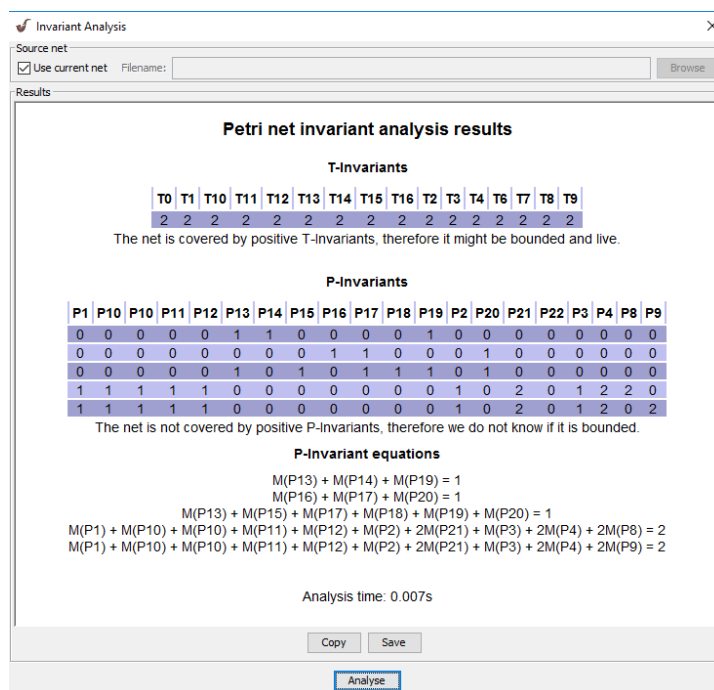


Figura 14 - Resultados de Análise de Invariantes da Rede de Petri Completa no PIPE2



A tabela 3, apresenta as matrizes de Incidente e Marca da Rede de Petri Completa da figura 10, conforme fornecido pela ferramenta PIPE2.

Tabela 3: Matriz de Incidente e Marcas

Forwards incidence matrix I^*

	T0	T1	T10	T11	T12	T13	T14	T15	T16	T2	T3	T4	T6	T7	T8	T9
P1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
P10	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
P11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
P12	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
P13	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P14	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P15	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P16	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P17	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
P18	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P19	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P2	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P20	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
P22	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
P3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0
P4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
P8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
P9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0

Backwards incidence matrix I-

	T0	T1	T10	T11	T12	T13	T14	T15	T16	T2	T3	T4	T6	T7	T8	T9
P1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
P10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
P10	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
P12	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P13	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P14	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P15	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P16	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P17	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P18	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P19	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
P20	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
P21	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
P22	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
P3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0
P4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
P8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
P9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0

Combined incidence matrix I

	T0	T1	T10	T11	T12	T13	T14	T15	T16	T2	T3	T4	T6	T7	T8	T9
P1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0
P10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	1	0
P10	-1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0

P11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	1
P12	0	-1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
P13	0	0	-1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P14	0	0	0	-1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P15	0	0	0	0	-1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P16	0	0	0	0	-1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P17	0	0	0	0	0	-1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
P18	0	0	0	-1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P19	0	0	1	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P2	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1
P20	0	0	0	0	1	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0
P21	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	1	0	0	0
P22	0	0	0	0	0	0	0	1	-1	0	0	0	0	0	0	0
P3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	-2	0	0	0	0
P4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	-1	0	0
P8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	1	0	0
P9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	1	0	0

Inhibition matrix H

	T0	T1	T10	T11	T12	T13	T14	T15	T16	T2	T3	T4	T6	T7	T8	T9
P1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

P16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Marking

	P	P1	P1	P1	P1	P1	P1	P1	P1	P1	P1	P1	P	P2	P2	P2	P	P	P	P9
	1	0	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	2	0	1	2	3	4	8	
Initial	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	1	
Current	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	1	

Enabled transitions

T0	T1	T10	T11	T12	T13	T14	T15	T16	T2	T3	T4	T6	T7	T8	T9
no	no	no	no	no	no	no	no	no	no	no	no	yes	no	no	no

A figura 15 a seguir apresenta a análise de Sifões Mínimos e Armadilhas Mínimas da Rede de Petri completa da figura 10, enquanto que a tabela 4 apresenta os resultados da simulação do PIPE2 após 1000 disparos e 5 replicações. Para todos os lugares são informados a média do número de tokens e o intervalo de confiança para 95%.

Figura 15 - Sifões Mínimos e Armadilhas Mínimas

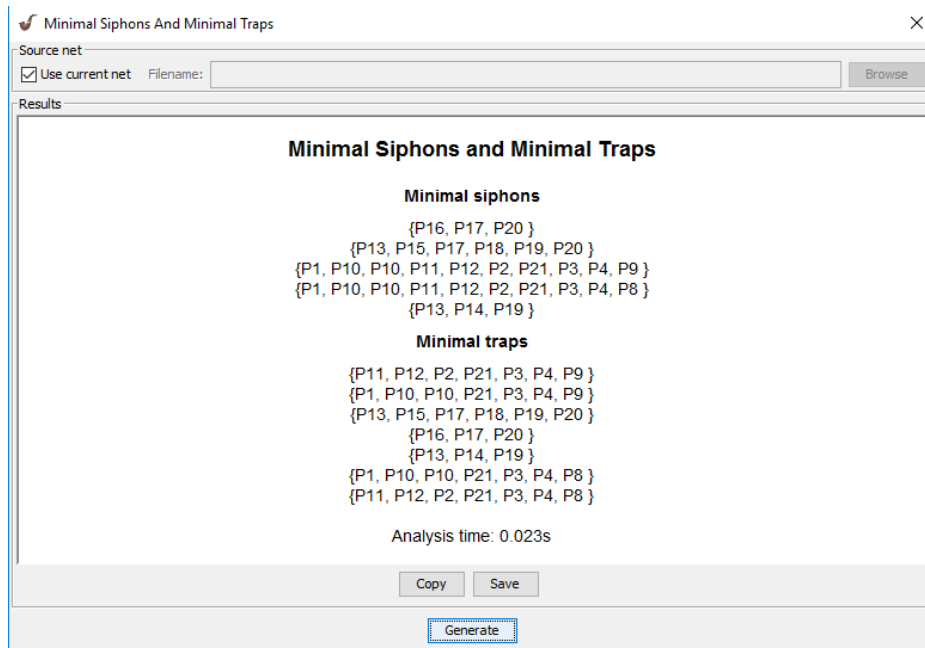


Tabela 4: Simulação do PIPE2 para 1000 disparos e 5 replicações

Place	Average number of tokens	95% confidence interval (+/-)
P1	0,17383	0,01967
P10	0,13886	0,01589
P10	0,18781	0,02707
P11	0,15784	0,02444
P12	0,18282	0,02793
P13	0,14785	0,02876
P14	0,72527	0,04393
P15	0,12388	0,01719
P16	0,53746	0,04229
P17	0,14985	0,00599
P18	0,13886	0,01473
P19	0,12687	0,03121
P2	0,14486	0,03235
P20	0,31269	0,04059
P21	0,0969	0,01524
P22	0,70729	0,07166
P3	0,43057	0,04237
P4	0,1009	0,01101
P8	0,09391	0,01226
P9	0,09391	0,01226

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O objetivo deste artigo foi alcançado e uma Rede de Petri foi elaborada para representar as etapas do processo de elaboração do Estimador de Qualidade de Enlace com LPA2v proposto. Foi possível verificar como a Rede de Petri permite avaliar as etapas de um processo. No modelo proposto, mesmo com os disparos sendo aleatórios, não ocorreram travamentos, acúmulo e marcas comprometedoras e outros fenômenos do processo. Como são necessárias 2 medidas diferentes (*RSSI* e *LQI*) para o cálculo do LQE-LPA proposto, a Rede de Petri utilizada permitiu demonstrar o sequenciamento, o paralelismo, funções AND-Split e AND-Join, sincronização, armazenamento (buffer), gatilho e enlace fechado (sistema cíclico) com sucesso. Redes de Petri mais complexas são possíveis, porém não foram exigidas no modelamento do EQE-LPA2V.

REFERÊNCIAS

Baccour, N.; Koubâa, A.; Youssef, H.; Jamâa, M.B.; Do Rosário, D.; Alves, M.; Becker, L. B. F-LQE: A Fuzzy Link Quality Estimator for Wireless Sensor Networks. **EWSN'10 Proceedings of the 7th European conference on Wireless Sensor Networks**, Pages 240-255, Coimbra, Portugal — February 17 - 19, 2010.

Blos, M. F. A importância das redes de PETRI no ensino de automação no Brasil. **Revista Tecnológica Do Cetep**, V. 1, N. 1, 2016.

CARVALHO JUNIOR, A. **Proposta de Estimador de Qualidade de Enlace em Redes de Sensores Industriais Sem Fio Utilizando Rede Neural Artificial Paraconsistente**. 2017.113f. Dissertação (Mestrado Profissional em Engenharia Mecânica) – Universidade Santa Cecília, Santos, 2017.

CARVALHO JUNIOR, A.; SILVA FILHO, J. I.; MARIO, M. C. A Study of Paraconsistent Artificial Neural Cell of Learning Applied as PAL2v Filter. **Latin Amens**, v. 16, n. 1, p. 202-209, jan. 2018. *rica Transaction*.

Chui, C. K.; Chen, G. Kalman **Filtering with Real-Time Applications**. Col: Springer Series in Information Sciences. 17 4th ed. New York: Springer.2009. 229 p.

Da Costa, N. C. A.; Abe, J. M.; Murolo, A. C.; Da Silva Filho, J. I. **Lógica Paraconsistente Aplicada” (in portuguese)**. São Paulo: Atlas, 1999.

Da Silva Filho, J.; Da Cruz C. M.; Rocco, A.; Garcia, D. V.; Ferrara, L. F. P.; Onuki, A. S.; Mario, M. C.; Jair, M. A. **Paraconsistent Artificial Neural Network for structuring**

Statistical Process Control in Electrical Engineering. Towards Paraconsistent Engineering Book, pp 77-102, Springer International Publishing, 2016.

Da Silva Filho, J. I. Métodos de Aplicações da Lógica Paraconsistente Anotada de anotação com dois valores-LPA2v (in portuguese). **Seleção Documental Magazine**, No 1, SP. Brazil, 2006.

Da Silva Filho, J. I. **Introdução às Células Neurais Artificiais Paraconsistentes**” (in portuguese). **Seleção Documental Magazine**, No 8, SP. Brazil, 2007.

Da Silva Filho, J. I. Lógica Paraconsistente e Probabilidade Pragmática no Tratamento de Incertezas”. (in portuguese). **Seleção Documental Magazine**, n. 9, SP. Brazil, 2008.

Gungor, V. C.; Hancke, G. P. Industrial Wireless Sensor Networks: Challenges, Design Principles, and Technical Approaches. **IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS**; VOL. 56; N° 10, 2009.

Jayasri, T. Hemalatha, M. Link Quality Estimation using Soft Computing Technique. **Middle-East Journal of Scientific Research** 21 (1): 158-168, ISSN 1990-9233. IDOSI Publications, 2014. DOI: 10.5829/idosi.mejsr.2014.21.01.21131.

MINICZ, M. F., MATUCK, G. R., TASINAFFO, P. M. Célula Neural Artificial Paraconsistente de Aprendizagem por Extração do Efeito da Contradição. **Revista Seleção Documental**, n. 33, São Paulo, Brasil. 2014.

Novák, V., Perfilieva, I. and Mockor, J. **Mathematical principles of fuzzy logic** .Dodrecht: Kluwer Academic, 1999. ISBN 0-7923-8595-0

Weiss, J.; Yu, R. **Wireless Sensor Networking for the Industrial Internet of Things**. Dust Networks Product Group. Linear Technology, 2015.

Zheng, G.; Han, D.; Zheng, R.; Schmitz, C.; Yuan, X. **A link quality inference model for IEEE 802.15.4 low-rate wpans**. **GLOBECOM**, 2011, pp. 1–6.