

**UNIVERSIDADE PAULISTA**  
**PROGRAMA DE MESTRADO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**

**UMA ANÁLISE DE DESEMPENHO EM INTERNET**  
**DAS COISAS BASEADA EM LÓGICA**  
**PARACONSISTENTE**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Paulista – UNIP, para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção.

**ALYSSON RAMIREZ DE FREITAS SANTOS**

**SÃO PAULO**

**2017**

**UNIVERSIDADE PAULISTA**  
**PROGRAMA DE MESTRADO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**

**UMA ANÁLISE DE DESEMPENHO EM INTERNET**  
**DAS COISAS BASEADA EM LÓGICA**  
**PARACONSISTENTE**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Paulista – UNIP, para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção.

**Área de Concentração:** Gestão de Sistema de Operação.

**Linha de Pesquisa:** Métodos Quantitativos em Engenharia de Produção

**Orientador:** Dr. Jair Minoro Abe

**Coorientador:** Dr. Ricardo Andrade Lira Rabêlo

**ALYSSON RAMIREZ DE FREITAS SANTOS**

**SÃO PAULO**

**2017**

Santos, Alysson Ramirez de Freitas.

Uma análise de desempenho em internet das coisas baseada em lógica paraconsistente. / Alysson Ramirez de Freitas Santos. - 2017.

94 f. : il. color. + CD-ROM.

Dissertação de Mestrado Apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Paulista, São Paulo, 2017.

Área de concentração: Gestão de Sistemas de Operação.

Orientador: Prof. Dr. Jair Minoro Abe.

Coorientador: Prof. Dr. Ricardo Andrade Lira Rabêlo

1. Lógica paraconsistente. 2. Internet das coisas. 3. RPL. I.  
Abe, Jair Minoro (orientador). II. Rabêlo, Ricardo Andrade Lira. III. Título.

**ALYSSON RAMIREZ DE FREITAS SANTOS**

**UMA ANÁLISE DE DESEMPENHO EM INTERNET  
DAS COISAS BASEADA EM LÓGICA  
PARACONSISTENTE**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Paulista – UNIP, para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção.

Aprovado em:

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Dr. Jair Minoro Abe  
Universidade Paulista – UNIP (Orientador)

---

Prof. Dr. José Benedito Sacomano  
Universidade Paulista – UNIP

---

Prof. Dr. Nélío Fernando dos Reis  
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia São Paulo – IFSP

## DEDICATÓRIA

Agradeço, primeiramente, a Deus pela vida, saúde e força a mim concedidas.

Agradeço aos meus pais, Ana Lourdes e Cecílio, e aos meus irmãos, Stelamar, Ana Cecília, Alex, Ana Cláudia, Ana Cristina e Layse; as minhas sobrinhas, Ana Carolina, Camille, Amora e aos meus cunhados, Manoela, Paulinho e Harilton, por me apoiarem em todas as minhas decisões e sempre estarem ao meu lado.

Ao Prof. Dr. Oduvaldo Vendrametto, por sua gestão exemplar à frente do Programa de Pós-Graduação e, principalmente, por sua sabedoria.

Ao prof. Dr. José Benedito Sacomano, pela sua experiência em abordar contribuições pertinentes e relevantes para a finalização deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Nélio Fernando dos Reis, por acreditar na importância deste trabalho, pelo incentivo à pesquisa científica, pela paciência e dedicação nas orientações durante o processo de qualificação e por fazer parte da realização deste projeto.

Agradeço, em especial, ao meu orientador, Prof. Dr. Jair Minoro Abe, pela sua amizade, dedicação e conselhos durante a longa jornada do desenvolvimento dessa dissertação. Mesmo distante, ele se fez presente, via Skype, e, nas duas oportunidades em que veio a Teresina, sempre buscou, de forma educada e atenciosa, motivar-me e colaborar com o processo de criação do conhecimento.

Agradeço ao meu querido amigo e coorientador, Prof. Dr. Ricardo Andrade Lira Rabêlo, pelos esclarecimentos, ensinamentos e apoio.

Agradeço ao meu amigo de pesquisa e de mestrado, Prof. Ms. Marcello Anderson, por me ajudar, com sua experiência, em todas as nossas reuniões e na realização deste trabalho.

Agradeço a todos os familiares e amigos, por torcerem por mim.

Agradeço aos amigos de mestrado, por todos os momentos de aprendizagem e também de descontração.

Agradeço a todos os professores do PPGE, por me proporcionarem uma formação sólida e de excelência.

Por fim, agradeço a todos que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho/sonho.

## RESUMO

Neste trabalho, foi aplicada a Lógica Paraconsistente Anotada Evidencial  $E\tau$  em Internet da Coisas (do Inglês, *Internet of Things*, IoT), considerada o futuro da Internet. Compostas por objetos heterogêneos denominados nós, possuem capacidade de processamento, entre outros recursos. Nossa proposta está concentrada no Protocolo de Roteamento para Redes com Perdas e Baixo Consumo de Energia (do inglês, *Routing Protocol for Low-power and Lossy Networks*, RPL). Esse é o protocolo de roteamento projetado para Redes com Perdas e Baixo Consumo de Energias (do inglês, *Low-power and Lossy Networks*, LLNs), desenvolvido e padronizado pelo ROLL Working Group no Internet Engineering Task Force (IETF desde março de 2012, RFC 6550). O RPL possui duas funções objetivo como default, a OF0 e a MRHOF. Será utilizado o simulador COOJA do Sistema Operacional Contiki, para obter os dados das métricas adotadas nesta pesquisa. Em seguida, os dados serão processados de acordo com o algoritmo Para-analizador, cuja estrutura baseia-se na Lógica Paraconsistente Evidencial  $E\tau$ , que permite manipular dados incertos, contraditórios e paracompletos de modo não trivial. Assim, com base na Lógica  $E\tau$ , será gerada uma nova função objetivo, a OF-BPL, que será comparada com a OF0 e a MRHOF. Em todas as métricas analisadas neste trabalho, o OF-BPL obteve um surpreendente desempenho em relação as outras funções objetivo. Seus resultados revelam que pode alcançar um desempenho notável nas LLNs, por meio das métricas configuradas no RPL, com base na Lógica  $E\tau$ , em comparação com as funções objetivas existentes, e, de forma adequada, satisfazer a qualidade das diferentes aplicações de serviço, inclusive a de selecionar o nó pai preferido e no prolongamento da vida útil da IoT.

**Palavras-Chave:** Lógica Paraconsistente. Internet das Coisas. RPL. Contiki. Cooja.

## ABSTRACT

In this work, we applied the Paraconsistent Annotated Evidential Logic in the Internet of Things (IoT). Our proposal is focused on the Routing Protocol for Low-power and Lossy Networks (RPL), which was designed for Low-power and Lossy Networks (LLNs) developed and standardized by the ROLL Working Group in the Internet Engineering Task Force (IETF) since March 2012, RFC 6550. RPL has as default two objective functions, the OF0 and the MRHOF. The COOJA simulator of the Contiki Operating System will be used to obtain the data of the metrics adopted in this research. Then, the data will be processed according to the Para-analyzer algorithm, whose structure is based on the Evidential Paraconsistent Logic  $E\tau$ , which allows us to manipulate uncertain, contradictory and full-length data in a non-trivial way. Thus, a new objective function will be generated, based on the Logic  $E\tau$ , OF-BPL, which will be compared with OF0 and MRHOF. In all the metrics analyzed in this work, OF-BPL obtained a surprising performance when compared to the other objective functions. The results show that they can achieve remarkable performance in LLNs through metrics configured in RPL based on  $E\tau$  Logic when compared to existing objective functions and adequately meet the quality of different service applications, including selecting the preferred parent node and extending IoT's service life.

**Keywords:** Paraconsistent Logic. Internet of Things. RPL. Contiki. Cooja.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Estados extremos e não-extremos .....	21
Figura 2 – Diagrama com os graus de incerteza e de certeza, com valores ajustáveis de controle limite indicados nos eixos. Observe também as regiões consideradas.....	21
Figura 3 – Diversos dispositivos conectados na IoT .....	23
Figura 4 – Monitoramento de performance de equipamentos industriais .....	26
Figura 5 – Monitoramento por sensores de controle de temperatura e umidade em datacenter.....	27
Figura 6 – Monitoramento de energia residencial por sensores ( <i>smart object</i> ) residencial .....	28
Figura 7 – Nó Sensor e uma Rede de Sensores Sem Fio.....	29
Figura 8 – Protocolo 6LoWPAN na camada de Adaptação .....	31
Figura 9 – Comunicação entre o protocolo 6LoWPAN e o IPv6.....	32
Figura 10 – LLN, nós sensores, enviando pacotes para o nó Sorvedouro ( <i>Sink</i> ) .....	33
Figura 11 – DODAG RPL.....	34
Figura 12 – Partilha de DIOs com exemplo de atualização para melhorar encaminhamento..	35
Figura 13 – Solicitação com pacotes DIS.....	36
Figura 14 – Encaminhamento descendente das mensagens DAO.....	37
Figura 15 – Classificação de <i>rank</i> em um DODAG.....	39
Figura 16 – Início da simulação em Cooja, nós sensores recebendo endereçamento IPv6.....	40
Figura 17 – Simulação de nós sensores, trocando pacotes por meio do protocolo de roteamento RPL com base na OFBPL no Cooja, SO Contiki .....	45
Figura 18 – Simulação de nós sensores trocando pacotes por meio do protocolo de roteamento RPL com base na OFBPL no Cooja, SO Contiki .....	45
Figura 19 – Simulação de nós sensores trocando pacotes por meio do protocolo de roteamento RPL com a OF0 no Cooja, SO Contiki .....	48
Figura 20 – Simulação de nós sensores trocando pacotes por meio do protocolo de roteamento RPL com a MRHOF no Cooja, SO Contiki .....	48
Figura 21 – Reticulado formado com o resultado métrica da contagem média de saltos analisada pelo para-analizador para gerar na OF-BPL.....	56
Figura 22 – Reticulado formado com o resultado da métrica nível de bateria residual analisada pelo para-analizador para gerar na OF-BPL.....	56
Figura 23 – Reticulado formado com o resultado da métrica qualidade do <i>link</i> analisada pelo para-analizador para gerar na OF-BPL.....	57



Figura 24 – Gráfico de comparação entre OF0, MRHOF com ETX e OFBPL no termo da contagem média de saltos com grau de evidência favorável .....	59
Figura 25 – Gráfico de comparação entre OF0, MRHOF com ETX e OFBPL no termo da contagem média de saltos com grau de evidência desfavorável .....	59
Figura 26 – Gráficos energia residual por nó pelo tempo de simulação, Grau de Evidência Favorável .....	60
Figura 27 – Gráficos energia residual por nó pelo tempo de simulação, grau de evidência desfavorável.....	61
Figura 28 – Gráficos exibe nível de qualidade do <i>link</i> das funções objetivo e seus graus de evidência favorável e desfavorável.....	62
Figura 29 – Gráfico com o índice de alteração de nós (pai) com a melhor qualidade da rede, grau de evidência favorável.....	63
Figura 30 – Gráfico com o índice de alteração de nós (pai) com a pior qualidade da rede, grau de evidência desfavorável.....	63

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Estados extremos e estados não-extremas .....	20
Tabela 2 – Valores das métricas obtidos de uma simulação em Cooja da OF0 .....	50
Tabela 3 – Valores das métricas obtidos de uma simulação em Cooja da MRHOF .....	51
Tabela 4 – Valores normalizados e evidências favoráveis ( $\mu$ ) e desfavoráveis ( $\lambda$ ) das métricas de seleção do nó pai preferido .....	53
Tabela 5 – Base de dados formada pelas métricas obtidas nas simulações de Cooja com a OF0 .....	54
Tabela 6 – Base de dados formada pelas métricas obtidas nas simulações de Cooja com a MRHOF .....	54
Tabela 7 – Resultado da métrica número médio de saltos analisado pelo para-analizador para gerar na OF-BPL .....	55
Tabela 8 – Resultado da energia residual analisado pelo para-analizador para gerar na OF-BPL .....	55
Tabela 9 – Resultado da qualidade do <i>link</i> analisado pelo para-analizador para gerar na OF-BPL .....	55

## LISTA DE SIGLAS

<b>IoT</b>	<i>Internet of Things</i>
<b>SO</b>	<i>Sistema Operacional</i>
<b>TIC</b>	<i>Tecnologia da Informação e Comunicação</i>
<b>Lógica E<math>\tau</math></b>	<i>Lógica Paraconsistente Evidencial E<math>\tau</math></i>
<b>RSSF</b>	<i>Rede de Sensores Sem Fio</i>
<b>WPAN</b>	<i>Wireless Personal Area Network</i>
<b>WLAN</b>	<i>Wireless Local Area Network</i>
<b>LAN</b>	<i>Local Area Network</i>
<b>GPRS</b>	<i>General Packet Radio Services</i>
<b>3GPP</b>	<i>3rd Generation Partnership Project</i>
<b>IEEE</b>	<i>Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos</i>
<b>WSN</b>	<i>Wireless Sensor Networks</i>
<b>6LoWPAN</b>	<i>IPv6 over Low power Wireless Personal Area Networks</i>
<b>RFID</b>	<i>Radio-Frequency IDentification</i>
<b>ETX</b>	<i>Expected Transmission Count</i>
<b>LQL</b>	<i>Link Quality Level</i>
<b>RSSI</b>	<i>Received Signal Strength Indicator</i>
<b>IP</b>	<i>Internet Protocol</i>
<b>IPv6</b>	<i>Internet Protocol Version 6</i>
<b>IETF</b>	<i>Internet Engineering Task Force</i>
<b>RPL</b>	<i>Router Protocol for Low-Power and Lossy Networks</i>
<b>ROLL</b>	<i>Routing Over Low-power and Lossy networks</i>
<b>LLN</b>	<i>Low Power and Lossy Networks</i>
<b>OF</b>	<i>Objective Function</i>
<b>OF0</b>	<i>Objective Function Zero</i>
<b>MRHOF</b>	<i>Minimum Rank with Hysteresis Objective Function</i>
<b>DAG</b>	<i>Directed Acyclic Graph</i>
<b>DODAD</b>	<i>Destination Oriented DAG</i>
<b>DIS</b>	<i>DODAG Informational Solicitation</i>
<b>DIO</b>	<i>DODAG Information Object</i>
<b>DAO</b>	<i>DODAG Advertisement Object</i>

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\mu$	Grau de evidência favorável
$\lambda$	Grau de evidência desfavorável
<b>Gic</b>	Grau de inconsistência
<b>Gpa</b>	Grau de paracompleteza
<b>Gve</b>	Grau de verdade
<b>Gfa</b>	Grau de falsidade
<b>Gce</b>	Grau de certeza
<b>Gin</b>	Grau de incerteza
<b>T</b>	Inconsistente
<b>V</b>	Verdadeiro
<b>F</b>	Falso
$\perp$	Paracompleto
<b>QV <math>\rightarrow</math> T</b>	Quase-Verdadeiro tendendo ao Inconsistente
<b>QV <math>\rightarrow \perp</math></b>	Quase-Verdadeiro tendendo ao Paracompleto
<b>QF <math>\rightarrow</math> T</b>	Quase-Falso tendendo ao Inconsistente
<b>QF <math>\rightarrow \perp</math></b>	Quase-Falso tendendo ao Paracompleto
<b>QT <math>\rightarrow</math> V</b>	Quase-Inconsistente tendendo ao Verdadeiro
<b>QT <math>\rightarrow</math> F</b>	Quase-Inconsistente tendendo ao Falso
<b>Q<math>\perp</math> <math>\rightarrow</math> V</b>	Quase-Paracompleto tendendo ao Verdadeiro
<b>Q<math>\perp</math> <math>\rightarrow</math> F</b>	Quase-Indefinido tendendo ao Falso

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>13</b>
1.1	Considerações Iniciais .....	13
1.2	Hipótese .....	13
1.3	Problema .....	14
1.4	Justificativa .....	14
1.5	Objetivos.....	14
1.5.1	Objetivo geral.....	14
1.5.2	Objetivo específicos .....	15
1.6	Contribuições.....	15
1.7	Estrutura do trabalho.....	16
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>	<b>18</b>
2.1	Lógica Paraconsistente .....	18
2.1.1	Motivação para a utilizar a Lógica Paraconsistente .....	18
2.2	Lógica Paraconsistente Anotada Evidential Et .....	19
2.3	Internet das Coisas .....	22
2.3.1	Arquitetura da IoT .....	24
2.3.2	Aplicações .....	25
2.4	Redes de Sensores Sem Fio .....	28
2.4.1	6LoWPAN.....	30
2.5	<i>Routing Protocol for Low-Power and Lossy Networks</i> .....	32
2.5.1	Objetivo do protocolo de roteamento RPL .....	33
2.5.2	Grafo Acíclico Direcionado .....	33
2.5.3	Mensagens de Controle RPL.....	35
2.5.4	Rotas Descendentes.....	37
2.6	Sistema Operacional Contiki .....	39
2.6.1	COOJA .....	40
2.7	Trabalhos Relacionados.....	41
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA.....</b>	<b>43</b>
3.1	Considerações iniciais .....	43
3.2	Estabelecendo uma boa rota .....	43
3.3	Métricas de desempenho utilizadas .....	45

3.4 Cenário de simulação.....	47
3.4.1 Combinação de métricas de roteamento.....	49
3.4.1.1 Métrica de entrada número médio de saltos.....	51
3.4.1.2 Métrica de entrada da energia restante.....	52
3.4.1.3 Métrica de entrada da qualidade do <i>link</i> (ETX).....	52
3.4.1.4 Métrica de saída da qualidade nó vizinho.....	52
3.4.2 Normalização .....	53
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>58</b>
4.1 Contagem média de saltos .....	58
4.2 Tempo de vida da rede (consumo de energia) .....	59
4.3 Qualidade do <i>Link</i> (ETX) .....	61
4.4 Número de médio de alterações de pais .....	62
<b>5 CONCLUSÃO.....</b>	<b>64</b>
<b>6 RECOMENDAÇÕES DE TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>65</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>66</b>
<b>APENDICE .....</b>	<b>72</b>
APENDICE 1 – An Analysis of the Metrics of RPL routing protocol for Internet of Things Based on Paraconsistent Logic .....	72
APENDICE 2 – OF-BPL: Qualidade do Serviço do Protocolo de Roteamento RPL Paraconsistente para Internet das Coisas .....	87

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Considerações Iniciais

Atualmente, a importância da Lógica Paraconsistente Evidencial  $E\tau$  (Lógica  $E\tau$ ) não é motivada somente por considerações filosóficas ou teóricas. Um dos acontecimentos recentes e marcantes desse tipo de lógica é ter encontrado aplicações nos mais variados campos: inteligência artificial, automação, robótica, enfim, na informática em geral (ABE, 2011).

Considerado o futuro da Internet, a computação e a comunicação evoluíram para um novo paradigma, que recebe uma variedade de tecnologias com sistemas embarcados, denominadas coisas e objetos, capazes de processar diversas aplicações sobre o ambiente e de comunicar informação útil entre equipamentos heterogêneos interconectados com várias finalidades e na busca de um objetivo comum. Dessa forma, crescem os estudos sobre a Internet das Coisas (do Inglês, *Internet of Things*, IoT) (ATZORI et al., 2010; GUBBI, 2013).

Neste trabalho, será apresentado, inicialmente, o estudo da arte sobre as teorias abordadas para a realização dessa pesquisa, começando pela lógica paraconsistente, que vem ganhando crescente importância no cenário tecnológico, por ser uma lógica não-clássica e capaz de tratar informações inconsistentes, paracompletas e incertezas. Também estudaremos a estrutura da Internet das Coisas, bem como suas funções e os objetos inteligentes que a compõem, como as redes de sensores sem fio e o protocolo de roteamento RPL, que será simulado no Cooja do Sistema Operacional Contiki, proporcionando os resultados das métricas que serão analisadas de suas duas funções objetivo (*default*), para alcançar uma performance melhor no desempenho de comunicação entre os nós sensores da IoT. Depois que os dados das métricas forem processados pelo para-analizador da Lógica  $E\tau$ , será gerada uma nova Função Objetivo, baseada em Lógica  $E\tau$  (do inglês, *Objective Function-Based on Logic Paraconsistente*, OF-BPL), que será comparada com as métricas de desempenho em estudo das OF0 e MRHOF (GNAWALI, 2012): contagem média de salto, média de energia remanescente e qualidade do *link* (ETX), que retornará uma métrica de conclusão, denominada número médio de troca de país.

## 1.2 Hipótese

Esse estudo foi desenvolvido em função da necessidade de sanar o transtorno gerado pelos escassos recursos energéticos em Redes com Perdas e de Baixo Consumo (do inglês, *Low-Power and Lossy Networks*, LLNs) que compõem a IoT, cujo transceptor é o maior

consumidor de energia, pois encaminha tanto seu próprio pacote para o destino nó sorvedouro (sink, por exemplo), como os de outros nós na rede, resultando no desperdício dos recursos energéticos nesses dispositivos. A hipótese levantada é tratar essas inconsistências nas funções objetivos (*default*) do protocolo de roteamento RPL, OF0 e MRHOF, cujas rotas serão otimizadas por meio dos dados obtidos nas simulações realizadas no Cooja, que serão submetidos ao para-analizador, desenvolvendo, dessa forma, uma nova função objetivo, a OF-BPL.

### 1.3 Problema

A reunião dos dados/informações aqui apresentados tem por propósito responder ao seguinte problema de pesquisa: quais os efeitos da aplicação da Lógica Paraconsistente Evidencial  $\mathcal{E}\tau$  sobre as funções objetivos (*default*), OF0 e MRHOF, do protocolo de roteamento RPL, em relação as métricas analisadas? A função objetivo gerada, OF-BPL, com influência Lógica  $\mathcal{E}\tau$  aplicada pelo para-analizador proporcionará a otimização da performance da Internet das Coisas?

### 1.4 Justificativa

Devido ao expressivo progresso nas pesquisas da Lógica Et e suas aplicabilidades e à necessidade de buscar soluções para o balanceamento de carga energética de uma LLN, de modo a evitar que um ou vários nó sensores tenham desligamento prematuro, essa pesquisa justifica-se pelo uso da Lógica Et aplicada pelo algoritmo para-analizador sobre a OF0 e a MRHOF, do protocolo de roteamento RPL, em contribuição com as informações das métricas obtidas nas simulações em Cooja do Sistema Operacional (SO) ‘Contiki, que resulta em uma nova função objetivo, OF-BPL, na busca de vantagem na integração entre os objetos inteligentes (*Smartobjects*) e as pessoas que utilizam essa tecnologia para diferentes finalidades.

### 1.5 Objetivos

#### 1.5.1 Objetivo geral

Esse projeto de pesquisa limitou-se a colher informações sobre as implicações da Lógica Paraconsistente Evidencial  $\mathcal{E}\tau$  aplicada aos resultados das métricas analisadas nas



funções objetivos *default*, OF0 e MRHOF, do protocolo de roteamento RPL, que será simulado em Cooja do ambiente Contiki. Assim, as métricas serão submetidas ao para-analizador e retornará uma nova função objetivo, baseada em Lógica Et, OF-BPL. Seu resultado será comparado com as funções objetivos originais de RPL, com o intuito de produzir, por análise e comparação, 01 (um) cenário de Redes de Sensores Sem Fio o mais próximo da realidade, bem como determinar o grau de evidência favorável e o grau de evidência desfavorável para IoT.

### 1.5.2 Objetivo específicos

- Apresentar o estudo da arte sobre os temas que farão parte da pesquisa deste trabalho. São eles: Lógica Paraconsistente Evidencial Et, Internet das Coisas, Rede de Sensores Sem Fio, protocolo de roteamento RPL, simulador Cooja e Sistema Operacional Contiki;
- Avaliar as informações das métricas obtidas nos resultados das simulações realizadas no Cooja do Sistema Operacional Contiki, referente OF0, e a MRHOF do protocolo de roteamento RPL;
- Aplicar nos dados das métricas no algoritmo para-analizador, após seus valores serem normalizados no intervalo entre 0 e 1, o que resultará na OF-BPL
- Comparar as funções objetivo (*default*) do protocolo RPL com a função objetivo baseada em lógica Et; e
- Determinar o grau de evidência favorável e o grau de evidência desfavorável da OF baseada em Lógica Paraconsistente.

### 1.6 Contribuições

Como contribuições da utilização das simulações propostas neste trabalho, podemos citar:

- Proporcionar uma solução para melhorar o desempenho da rede utilizada pelas diversas tecnologias e aplicações de IoT.
- Utilizar técnicas de roteamento baseadas em sistemas inteligentes em Lógica E, que usam informações das métricas da rede de sensores sem fio, para estimar, de forma mais precisa, a qualidade das rotas, reduzindo, dessa forma, o consumo de energia dos componentes da rede, para diminuir a quantidade de saltos e para aumentar a qualidade do *link* entre os nós da rede.

- Aumentar o desempenho da capacidade de rastreamento e localização das aplicações de IoT sobre os protocolos estudados que integram a RSSF; e
- Disponibilizar uma estrutura de rede mais confiável para o transporte dos dados de coisas e objetos (localização, identificação, variáveis do ambiente) coletados pelos nós que compõem a aplicação de IoT.

## 1.7 Estrutura do trabalho

Esse trabalho está organizado em sete capítulos:

- No Capítulo 2, será apresentado o estudo da arte sobre a origem do estudo da Lógica Paraconsistente Evidencial  $E\tau$ . Também abordaremos a história do desenvolvimento da teoria da Lógica  $E\tau$  e os cientistas que a criaram. Em seguida, serão descritas a estrutura da Internet das Coisas, suas funções e os objetos inteligentes que a compõem, como as redes de sensores sem fio e o protocolo de roteamento RPL. Por fim, uma breve apresentação do simulador Cooja e seu Sistema Operacional Contiki, desenvolvido para testes de simulações em IoT.
- O Capítulo 3 tem por objetivo apresentar a metodologia proposta neste trabalho, expondo as métricas obtidas nas simulações cujos dados serão submetidos ao processo de análise pelo para-analizador, com base em Lógica Paraconsistente Evidencial  $E\tau$ , e que resultaram na OF-BPL.
- O Capítulo 4 apresenta os resultados e discussões obtidas com as simulações de RPL com as funções objetivos, OF0 e MRHOF, utilizando suas métricas, para gerar a OF-BPL, que é a função objetivo proposta. Mostraremos, a comparação entre as métricas de desempenho analisadas do protocolo de roteamento RPL, OF0 e MRHOF e a nova função objetivo, OF-BPL, que retorna uma métrica de conclusão decorrente dos dados resultantes do para-analizador, o número médio de troca de país.
- O Capítulo 5 apresenta as conclusões do trabalho sobre a função objetiva proposta para aplicações de IoT que procurou obter as melhores rotas do protocolo de roteamento RPL, analisado com na Lógica  $E\tau$ .

- O Capítulo 6 apresenta algumas sugestões para um trabalho futuro e como se almeja melhorar os resultados alcançados, para aumentar os benefícios das aplicações, serviços e comunicações entre os sensores que compõem a IoT.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

Para a melhor compreensão deste trabalho, esse capítulo apresenta a Lógica Paraconsistente Anotada Evidencial  $E\tau$ , um breve resumo histórico e suas aplicações. Em seguida, serão exibidos os fundamentos relacionados à Internet das Coisas (IoT), importantes para entender o problema tratado neste trabalho e a solução proposta (conceitos sobre a IoT, sua arquitetura e aplicações). Logo após, trataremos das Redes de Sensores Sem Fio e do protocolo de roteamento RPL, que será otimizado na proposta abordada na IoT. Por último, abordaremos o Sistema Operacional Contiki e seu Simulado COOJA, finalizando, assim, a contextualização do problema apresentado.

### 2.1 Lógica Paraconsistente

A Lógica Paraconsistente pertence à classe das lógicas denominadas não clássicas heterodoxas. Originou-se dos trabalhos elaborados e publicados, em 1948, de modo independente, pelo polonês Stanislaw Jaskowski e pelo brasileiro Newton C.A. da Costa, atualmente professor da Faculdade de Filosofia da USP. Esses trabalhos pioneiros consideravam a contradição e só foram denominados de “Paraconsistentes”, que significa “ao lado de”, “próximo de”, pelo filósofo Francisco Miró Quesada em 1976. Assim nasceu a Lógica Paraconsistente. O Prof. Newton C. A. Da Costa, que desenvolveu e vem desenvolvendo vários sistemas paraconsistentes contendo todos os níveis lógicos usuais, é considerado pela comunidade científica mundial um dos inventores da Lógica Paraconsistente. Esse artigo traz um método que mostra como ela é simples, fácil de ser aplicada e faz com que os sistemas de controle apresentem análises muito mais próxima das características humanas.

#### 2.1.1 Motivação para a utilizar a Lógica Paraconsistente

A Lógica clássica utiliza apenas dois estados lógicos: verdadeiro ou falso. Se afirmarmos, por exemplo, que uma maçã é vermelha, existirão apenas duas situações: ela é vermelha ou ela é não-vermelha. Sabemos que, na realidade, existem inúmeros casos nos quais uma maçã pode ter cor próxima ao vermelha, ao verde, etc. Por possuir características binárias, a lógica clássica oferece facilidades para ser aplicada em circuitos elétricos digitais e sistemas de computação. Por outro lado, quando queremos descrever o mundo real, justamente essa característica binária impossibilita que seja aplicada em todos os casos. Os

Sistemas Binários encontram muitas dificuldades no tratamento de situações que aparecem com frequência no mundo real, como inconsistências, ambiguidades, paradoxos e indefinições. Justamente para responder a essas situações reais não abrangidas pela lógica clássica, foi criada a Lógica Paraconsistente.

A ineficiência da Lógica Clássica tornou-se mais evidente com as recentes pesquisas feitas para desenvolver e propor Sistemas Especialistas na área de Inteligência Artificial, que não conseguem fazer um tratamento adequado, quando acontecem contradições entre as informações vindas de dois ou mais agentes que opinam sobre um mesmo assunto. Quanto a isso, basta ficarmos atentos às opiniões sobre a economia do Brasil, vindas de vários especialistas: há uma infinidade de contradições. Por aceitá-las, a Lógica Paraconsistente dá um tratamento mais adequado e muito parecido com o funcionamento do cérebro humano, quando nos deparamos com situações reais.

Também na área de Robótica, para o desenvolvimento de Sistemas de Controle de Robôs móveis autônomos, é grande a dificuldade, quando se utiliza Lógica Clássica para obter comportamento de robôs que imitem o ser humano.

Em Robótica, quando se trata de robôs móveis autônomos, há uma série de fatores que inviabilizam um bom desempenho. De início, os projetos que envolvem esses tipos de robôs são muito limitados devido às dificuldades tecnológicas dos sensores que trazem informações sobre o meio ambiente. Por exemplo, para trafegar em uma sala, um robô precisa ter informações a respeito dos obstáculos existente em sua trajetória. Na utilização de um único sensor, não se conseguem informações sobre as formas, os contornos e a profundidade dos obstáculos, pois apresenta uma movimentação muito precária. Como resultado, ele pode atropelar ou ser atropelado por pessoas ou mesmo, se houver tráfego, bater em outro robô. A solução é utilizar vários sensores que informem a existência ou não de obstáculos. Porém, quando isso é aplicado, aparecem sinais contraditórios que provocam a ineficiência do Sistema de Controle que utiliza a lógica binária ou clássica.

## **2.2 Lógica Paraconsistente Anotada Evidential $E\tau$**

Iniciamos nossa exposição de modo coloquial, incrementando-a até atingir uma apresentação com o rigor que o tema necessita. A Lógica Paraconsistente Anotada Evidencial  $E\tau$  (Lógica  $E\tau$ ) possui uma linguagem  $E\tau$ . Suas proposições atômicas são do tipo  $p(\mu, \lambda)$ :  $p$  é uma proposição e  $\mu, \lambda \in [0, 1]$  (intervalo real unitário fechado). Intuitivamente,  $\mu$  indica o grau de evidência favorável de  $p$  e  $\lambda$ , o grau de evidência desfavorável de  $p$ . A leitura dos valores  $\mu, \lambda$  dependem das aplicações consideradas e podem sofrer mudanças. Com efeito,  $\mu$

pode ser o grau de crença favorável e  $\lambda$  poder ser o grau de crença contrária da proposição  $p$ ;  $\mu$  também, pode indicar a probabilidade expressa por  $p$  ocorrer e  $\lambda$ , a improbabilidade expressa por  $p$  de ocorrer. As proposições atômicas  $p(\mu, \lambda)$  da Lógica  $E\tau$  podem, intuitivamente, ser lidas como: creio em  $p$  com o grau de crença favorável  $\mu$  e o grau de crença contrária  $\lambda$ , ou o grau de evidência favorável de  $p$  é  $\mu$  e o grau de evidência desfavorável de  $p$  é  $\lambda$ .

As fórmulas atômicas da Lógica  $E\tau$  são do tipo  $p(\mu, \lambda)$ , onde  $(\mu, \lambda) \in [0, 1]^2$  ( $P$  denota uma variável proposicional).  $p(\mu, \lambda)$  pode ser intuitivamente ler: "Supõe-se evidência favorável desse  $p$  é  $\mu$  e evidência desfavorável é  $\lambda$ ". Assim:

- $p(1.0, 0.0)$  pode ser lido intuitivamente como uma proposição verdadeira.
- $p(0.0, 1.0)$  pode ser lido intuitivamente como uma proposição falsa.
- $p(1.0, 1.0)$  pode ser lido intuitivamente como uma proposição inconsistente.
- $p(0.0, 0.0)$  pode ser lido intuitivamente como uma proposição paracompletas.
- $p(0.5, 0.5)$  pode ser lido intuitivamente como uma proposta indefinida.

Introduzimos os seguintes conceitos (considerações são tomadas com  $0 \leq \mu, \lambda \leq 1$ ):

- Grau de incerteza:  $G_{un}(\mu, \lambda) = \mu + \lambda - 1$
- Grau certeza:  $G_{ce}(\mu, \lambda) = \mu - \lambda$

Intuitivamente,  $G_{un}(\mu, \lambda)$  mostra-nos quão perto (ou longe) a constante de anotação  $(\mu, \lambda)$  é de inconsistente ou paracompletas Estado. Da mesma forma,  $G_{ce}(\mu, \lambda)$  aponta o quão perto (ou longe) a constante de anotação  $(\mu, \lambda)$  é de estado verdadeiro ou falso. Dessa forma, podemos manipular a informação dada pela constante de anotação  $(\mu, \lambda)$ . Note-se que esses não são graus distância métrica.

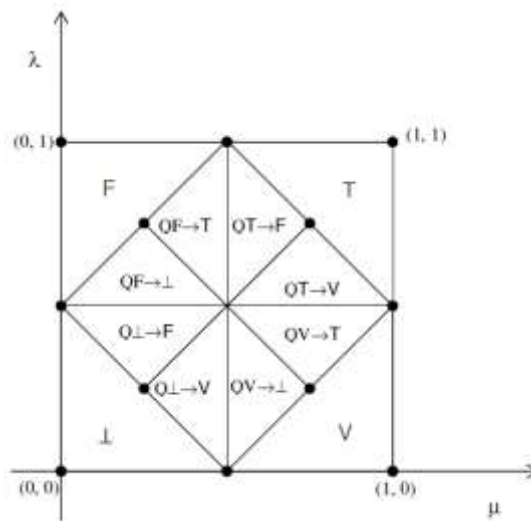
- a) Com a incerteza e a certeza graus, podemos obter os seguintes 12 estados de saída (Tabela 1): estados extremos e estados não-extremas, como mostra a Figura 1.

Tabela 1 – Estados extremos e estados não-extremas

Estados Não-Extremos	Símbolo
Quase-verdadeiro tendendo ao Inconsistente	$QV \rightarrow T$
Quase-verdadeiro tendendo ao Paracompleto	$QV \rightarrow \perp$
Quase-falso tendendo ao Inconsistente	$QF \rightarrow T$
Quase-falso tendendo ao Paracompleto	$QF \rightarrow \perp$
Quase-inconsistente tendendo ao Verdadeiro	$QT \rightarrow V$
Quase-inconsistente tendendo ao Falso	$QT \rightarrow F$
Quase-paracompleto tendendo ao Verdadeiro	$Q\perp \rightarrow V$
Quase-paracompleto tendendo ao Falso	$Q\perp \rightarrow F$

Fonte: Abe (2015).

Figura 1 – Estados extremos e não-extremos



Fonte: Abe (2015).

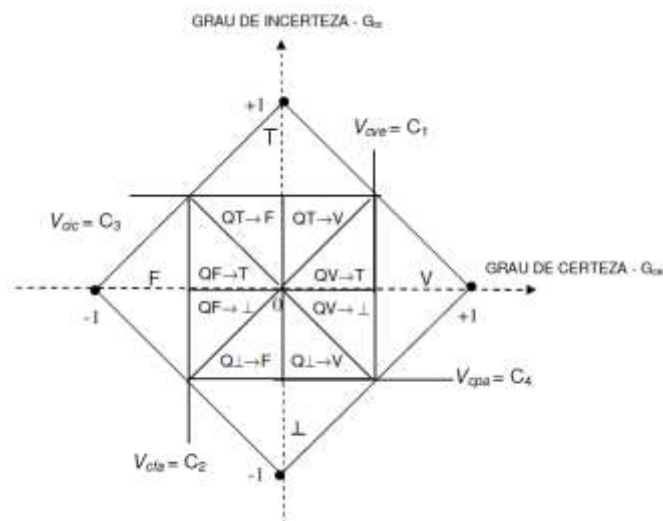
Alguns valores de controle adicionais são:

- $V_{scct}$  = valor máximo de controle de incerteza =  $F_{tun}$
- $V_{SCC}$  = valor máximo de controle certeza =  $F_{tce}$
- $V_{icct}$  = valor mínimo de controle incerteza =  $-F_{tun}$
- $V_{ICC}$  = valor mínimo de controle certeza =  $-F_{tce}$

Tais valores são determinados pelo conhecimento engenheiro, dependendo de cada aplicação encontrar os valores de controle apropriadas para cada um deles.

Todos os estados são representados na Figura 2, inclusive a relação entre com certeza e de incerteza graus.

Figura 2 – Diagrama com os graus de incerteza e de certeza, com valores ajustáveis de controle limite indicados nos eixos. Observe também as regiões consideradas



Fonte: Abe (2015).

Dadas as entradas  $\mu$  favorável e  $\lambda$  contrário como provas de evidência, não é o algoritmo para-analizador (abaixo), que descobrir uma saída conveniente (ABE, 2015; PIMENTA JR, 2015).

A terminologia para as distâncias é assim:

Sensor da esquerda, expresso pela evidência favorável  $\mu$ :

- 1) Evidência favorável alta ( $0.75 \leq \mu \leq 1$ )
- 2) Evidência favorável ligeiramente alta ( $0.5 \leq \mu \leq 0.75$ )
- 3) Evidência favorável ligeiramente baixa ( $0.25 \leq \mu \leq 0.5$ )
- 4) Evidência favorável baixa ( $0 \leq \mu \leq 0.25$ )

Sensor da direita, expresso pela evidência desfavorável  $\lambda$ :

- 1) Evidência desfavorável alta ( $0.75 \leq \lambda \leq 1$ )
- 2) Evidência desfavorável ligeiramente alta ( $0.5 \leq \lambda \leq 0.75$ )
- 3) Evidência desfavorável ligeiramente baixa ( $0.25 \leq \lambda \leq 0.5$ )
- 4) Evidência desfavorável baixa ( $0 \leq \lambda \leq 0.25$ )

### 2.3 Internet das Coisas

A Internet das Coisas é um paradigma do cenário moderno da comunicação sem fio. A ideia básica da Internet das Coisas é sua presença a nossa volta, por meio de uma variedade de objetos como ilustrado na Figura 3. Ela não precisa ser necessariamente implementada na forma de uma Rede de Sensores sem fio. Qualquer sistema de endereçamento único para os objetos que tenha uma estrutura similar à Internet pode ser considerado uma implementação desse conceito. Para que os objetos possam interagir com outros, normalmente são utilizados tags RFID (Radio-Frequency IDentification), atuadores, sensores, celulares e até mesmo leitores de código de barra (ATZORI, 2010; SOBRAL, 2015).

Segundo Atzori (2010), ao endereçar cada elemento de forma única, a Internet das Coisas aumenta incrivelmente o número de elementos dentro de uma rede. Cada um deles precisa ser recuperável. Dessa forma, uma política de endereçamento efetiva mostra-se essencial.

Além disso, nas redes de objetos inteligentes, os paradigmas de comunicação e roteamento podem não seguir os mesmos padrões de uma rede como a Internet (CHAOUCHI, 2013). Sendo assim, como devem ser explorados, para extrair melhor desempenho das redes de objetos inteligentes? Surgem questões tanto teóricas quanto práticas, como prover



endereçamento aos dispositivos ou encontrar rotas de alta vazão e melhor taxa de entrega, mantendo baixo o uso dos recursos limitados. Desse modo, fica evidente a necessidade de adaptar os protocolos existentes, por exemplo, o RPL e o 6LoWPAN, entre outros.

Diante dos avanços da IoT, são criadas novas aplicações para o desenvolvimento de serviços para coleta e comunicação de dados existentes no meio ambiente. Em serviços públicos, por exemplo, temos aplicação para as áreas de transporte, saúde, educação e segurança, como também em ambientes privados: domicílio e escritórios, permitindo, inclusive, o emprego em diversos domínios econômicos e sociais, tais como indústria, comércio e defesa (KHAN et al., 2012).

Assim como o desenvolvimento de abstrações capazes de facilitar o desenvolvimento de aplicações e serviços suportados por pequenos objetos heterogêneos, facilitam a vida das pessoas (MCEWEN; CASSIMALLY, 2013). Todavia, com a presente perspectiva de conectar bilhões de objetos que, por sua vez, elevarão o tráfego e a necessidade de armazenamento dos dados, emerge a necessidade de especificar um modelo computacional adequado a essa realidade. A arquitetura de comunicação proposta deve enfrentar a escalabilidade, interoperabilidade, confiabilidade, QoS, entre outros fatores (KHAN et al., 2012).

Alguns autores já pressupõem que a IoT será a nova revolução da tecnologia da informação (ASHTON 2009; PRESS 2014; WANG et al., 2015). Sendo assim, ela possivelmente não deve ser entendida como um fim, mas como um meio de alcançar algo maior, a saber, a computação ubíqua.

Figura 3 – Diversos dispositivos conectados na IoT



Fonte: bitmag.com.br (2016).

### 2.3.1 Arquitetura da IoT

A arquitetura da IoT envolve muitos fatores: comunicação, segurança, processos, necessidade de interagir com qualquer outro elemento do sistema, que pode estar geograficamente distante e ter seu estado alterado dinamicamente na rede. Para disponibilizar essa gama de serviços da rede, a IoT é orientada a eventos.

A arquitetura orientada a eventos divide um sistema complexo em objetos menores e bem definidos, que permitem atender a requisitos de escalabilidade, modularidade e interoperabilidade (ZANELLA, 2014). Baseado nesse conceito de orientação a eventos, as redes IoT podem ser divididas em quatro níveis principais: sensores, rede, serviços e interface (LI et al., 2015).

No primeiro nível, encontra-se a rede de sensores. Os equipamentos que têm uma identificação única coletam informações dos sensores e enviam para a rede. A rede de sensores geralmente é formada por equipamentos considerados WPAN, ou seja, limitados em termos de energia, memória e computação. Exemplos disso são os equipamentos inteligentes, Tags de RFID, de sensores e atuadores de processos como temperatura, pressão, vazão, corrente e tensão (ZANELLA, 2014).

O nível da rede é constituído das tecnologias que servem de ponte entre as diversas redes de sensores e que permitirão a integração dessas aplicações. As tecnologias de redes envolvidas geralmente são: redes WLAN e LAN (empregadas na comunicação entre os gateways da rede e baseadas no padrão IEEE 802.11); tecnologias de celular (como Serviço de Rádio de Pacote Geral, do inglês, *General Packet Radio Services*, GPRS) e o Projeto de Parceria de 3ª Geração (do inglês, *3rd Generation Partnership Project*, 3GPP), que disponibilizam dados para a Internet (CHANG et al., 2012).

Em nível de serviços, as tecnologias de middleware habilitam os serviços e aplicações em IoT. Esse *middleware* é formado por todos os serviços de troca de informação e armazenamento de dados, gerenciamento de dados e serviços de busca (ZANELLA, 2014).

Por fim, o nível de interface está relacionado à aplicação. Nesse contexto, como a IoT está relacionada com diferentes tecnologias de diferentes tipos de equipamentos, a interface provê um mecanismo de interconexão e gerencia a comunicação entre esses equipamentos de forma simplificada e padronizada (LI et al., 2015). Dentro desses vários níveis de comunicação, devem existir protocolos padrões, de forma a facilitar a interconexão entre os módulos e os equipamentos de forma padronizada. Foram feitos vários esforços de grupos -

como IEEE e IETF -, para criar padrões nos diferentes níveis de comunicação da IoT (PALATTELLA, 2013).

Os protocolos utilizados em IoT, mais especificamente, para rede de sensores sem fio (RSSF), podem ser vistos na Tabela 1. Alguns deles são bem definidos e largamente utilizados. Outros ainda possuem deficiências e alguns encontram-se na fase de definição (PALATTELLA, 2013).

### 2.3.2 Aplicações

As aplicações em IoT enfrentam as mesmas dificuldades de toda tecnologia que aparece como uma tendência tecnológica, mas necessita de maturação do mercado, para sua adoção em larga escala. Nos últimos dois anos, principalmente, começaram a surgir diversas aplicações em IoT dentro de mercados já maduros da tecnologia, como a automação de processos de negócios, o gerenciamento de redes e sistemas, o monitoramento das atividades de negócios e a integração entre aplicações.

A tomada de decisões baseadas em indicadores em tempo real tornou-se uma prática comum em mercados maduros de tecnologia, como o norte-americano e o europeu. Porém, no Brasil, esse processo ainda está iniciando, justamente pela dificuldade de integrar diferentes sistemas e parques tecnológicos com um ecossistema de aplicações bastante heterogêneo. Há alguns anos, falamos sobre a Internet das Coisas, mas somente agora, graças à tecnologia de baixo custo, colocar esse conceito em funcionamento e gerar maior eficiência operacional está se tornando realidade para empresas orientadas a investimentos tecnológicos. Hoje, por exemplo, já é possível comprar sensores que conectam uma “coisa” à Internet a partir de U\$1.50, *made in China*. O sensor com conexão Wi-Fi pode enviar informações de uso, disponibilidade de recursos ou qualquer outro dado importante de ser gerenciado a outro sistema.

Por meio da experiência da *OpServices*, com monitoração de processos de negócios e visualização de dados referentes à inteligência de negócios e à integração entre aplicações, podemos elencar aplicações como a Internet das Coisas, para gerar dados com orientação à tomada de decisões:

1. **Indústria 4.0:** Uma das aplicações da IoT que vem ganhando espaço mundial e desenvolvendo-se com base tecnológica da integração das coisas é a Indústria 4.0. A IoT faz parte dos principais avanços alcançados na área da tecnologia nos últimos anos, juntamente com a Big Data<sup>1</sup>. Ambas formam os pilares da Indústria 4.0 (HINRICHSEN et al., 2013). No caso da Internet das Coisas, o principal objetivo é conectar objetos físicos, ambientes e máquinas à rede mundial de computadores que, por sua vez, permite a coleta e a troca de dados entre esses itens, como mostra a Figura 4. Em outras palavras, “tudo dentro e ao redor de uma planta operacional (fornecedores, distribuidores, unidades fabris, e até o produto) é conectado digitalmente, proporcionando uma cadeia de valor altamente integrada” (DAVIES, 2015). Essa nova fase de desenvolvimento da cadeia de produção passa diretamente pela IoT, pois os sistemas cyber-físicos utilizados pela Indústria 4.0 funcionam à base de sensores dessa conexão.

Figura 4 – Monitoramento de performance de equipamentos industriais

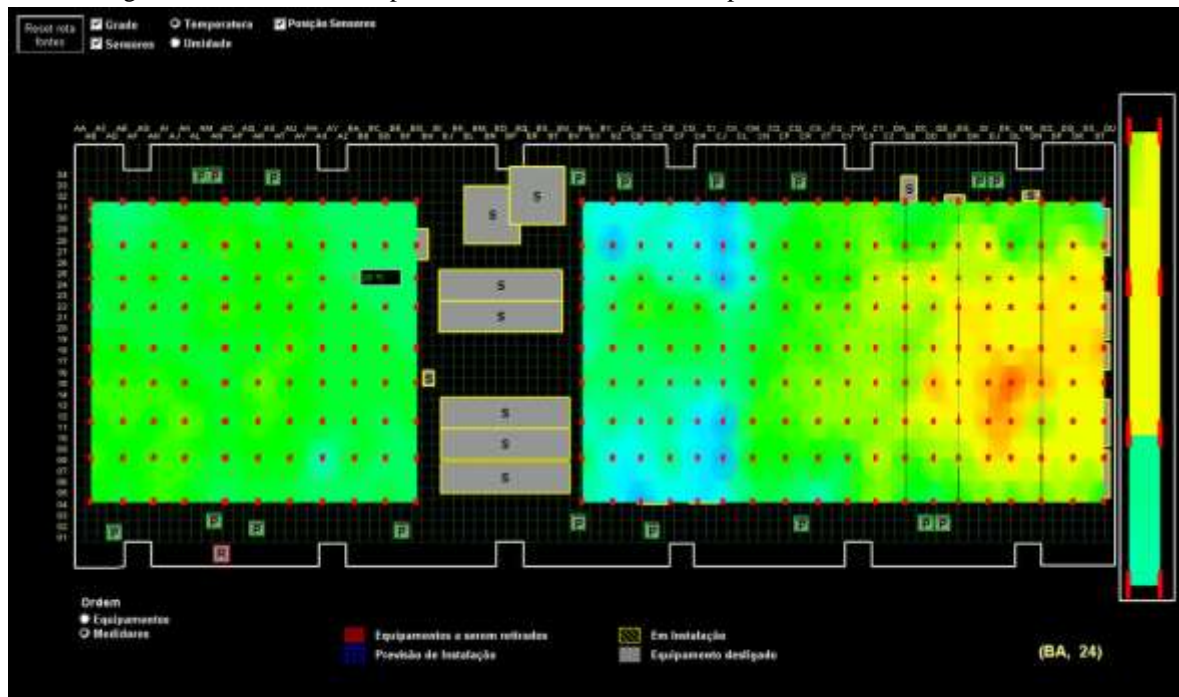


Fonte: [baguete.com.br](http://baguete.com.br) (2017).

<sup>1</sup> Big Data, que descreve o gigantesco volume de dados estruturados e não estruturados coletados e armazenados por *softwares*. É aplicado ao contexto da Indústria 4.0, para a qualificação desses dados, transformando-os em informações relevantes para o negócio. Esse tratamento de dados se dá a partir dos 6 Cs, classificados como conexão (sensores e redes industriais), *cloud computing* (dados a pedido), cyber (computação e dados a pedido), conteúdo / contexto (modelo e memória), comunidade (compartilhamento de informações) e customização (personalização dos dados) (LEE et al., 2014).

2. **Sensores no datacenter:** os medidores de temperatura e umidade são um exemplo já consolidado de Internet das Coisas nos ambientes de Tecnologia da informação. Tanto os sensores construídos a partir de *Arduino* como os comercializados pelo mercado já para um fim específico têm sido amplamente utilizados no controle da temperatura e umidade de datacenters. Eles são integrados a alguma ferramenta de monitoramento de redes e sistemas e, caso sua temperatura ultrapasse 24°C ou 70% de umidade, por exemplo, são gerados alertas para a tomada de ações corretivas. Esses alertas podem indicar, por exemplo, que os ares-condicionados não estão funcionando e colocam em risco a integridade dos servidores alocados no datacenter, como mostra a Figura 5.

Figura 5 – Monitoramento por sensores de controle de temperatura e umidade em datacenter



Fonte: [elipsesoftware.squarespace.com](http://elipsesoftware.squarespace.com) (2017).

3. **Controle de consumo de energia:** os aumentos recentes do custo da energia, como se vê na Figura 5, teve grande impacto nas empresas nos últimos anos, principalmente no setor industrial. O controle de consumo de energia já vinha se tornando uma preocupação das empresas, também impulsionada pelos consumidores, que exigem delas cada vez menos impacto ambiental. A possibilidade de colocar sensores em todos os equipamentos consumidores de energia é um diferencial para saber o custo energético de todas as tecnologias utilizadas pela empresa.

Figura 6 – Monitoramento de energia residencial por sensores (*smart object*) residencial



Fonte: pro.tecmundo.com.br (2017).

## 2.4 Redes de Sensores Sem Fio

Um dos dispositivos obrigatórios para emprego na camada de percepção da infraestrutura para IoT é o sensor, também conhecido como nó de sensor, elemento pequeno e autônomo, responsável pela coleta e comunicação dos dados físicos do ambiente (CHAQFEH et al., 2012).

Os avanços na tecnologia de fabricação dos semicondutores proporcionam o desenvolvimento de dispositivos cada vez menores, com custos mais acessíveis e capacidades funcionais crescentes. Essas características promovem a criação de componentes “inteligentes”, como sensores e pequenos atuadores. Atualmente esses elementos possuem processamento local e comunicação por rede sem fio (*wireless*). A utilização de dezenas ou até milhares desses dispositivos em uma rede de comunicação autoconfigurável originou a tecnologia conhecida como Rede de Sensores sem Fio (RSSF) (CANSADO, 2011).

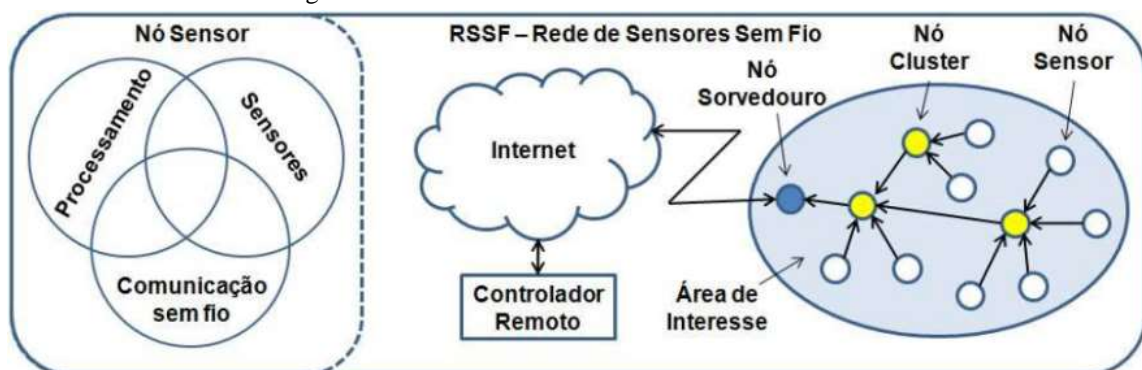
Um número expressivo de trabalhos sobre pesquisas em Redes de Sensores Sem Fio é unânime em justificar que o desenvolvimento dessa tecnologia resulta da inevitável convergência da comunicação sem fio, da computação e dos dispositivos sensores proporcionados pela tecnologia dos semicondutores (AKYLDIZ et al., 2002; POTTIE, 1998; POTTIE; KAISER, 2000; STANKOVIC, 2008a; STANKOVIC, 2008b; TUBAISHAT; MADRIA, 2003; VIEIRA et al., 2003; CANSADO, 2011). A união dessas funcionalidades na



obtenção de um nó sensor e a sua interligação em rede proporcionando a formação de uma Rede de Sensores Sem Fio é apresentada na Figura 7.

A estrutura dessa rede está baseada na comunicação de nós sensores independentes, que são basicamente dispositivos eletrônicos leves e minúsculos, dotados de restrita capacidade de processamento, reduzida memória, módulo de rádio, um minúsculo sistema operacional e outros utilitários, um ou mais sensores, propriamente dito, uma fraca unidade de transmissão/recepção (*transceiver*), bateria ou unidade de captação de energia solar e, opcionalmente, um módulo de locomoção (DWIVEDI; VYAS, 2010). Devido às características intrínsecas dessa tecnologia, o uso de baterias impõe limitações de armazenamento, de processamento e de comunicação sem fio não estruturada, ou seja, ad hoc, com o agravante, em muitas oportunidades, dos mesmos estarem dispersos no ambiente de maneira aleatória e não assistida. Essas características proporcionam baixa confiabilidade individual aos nós sensores que, por sua vez, é compensada pelo trabalho colaborativo da rede e pela redundância devido à elevada quantidade desses dispositivos (CANSADO, 2011).

Figura 7 – Nó Sensor e uma Rede de Sensores Sem Fio



Fonte: Cansado (2011).

Uma RSSF é o emprego de uma elevada quantidade de sensores geograficamente dispersos em um ambiente físico, sem o apoio de qualquer infraestrutura física estabilizada. Pressupõe-se que os nós de sensores serão individualmente capazes de monitorar o meio, coletar o dado para, quando possível, processá-lo localmente e, em seguida, enviá-lo a um ou mais pontos de coleta: *gateway*, nós sorvedouros e os nós *clusters*.

Principais características desses pontos de coleta:

- *Gateway*, também considerado ponte de ligação, é uma máquina intermediária, geralmente destinada a interligar redes, separar domínios de colisão ou mesmo traduzir protocolos.

- Nós sorvedouros (*sink*) ou estação base é obrigatório e tem como principal função ser o ponto de acesso da rede e o responsável pela comunicação com os demais dispositivos fornecidos.
- Nós *clusters* t]~em sua utilização de dependente da aplicação, tendo como função principal agregar os dados dos nós vizinhos, criando uma hierarquia de comunicação com o nó sorvedouro.

Por meio da comunicação sem fio, wireless, esses componentes geralmente possuem disponibilidade de recursos muito superior aos dos nós sensores em termos de memória, processamento, energia e conectividade, entre outros (DWIVEDI; VYAS, 2011; CANSADO, 2011).

A distribuição dos sensores no ambiente depende dos requisitos de aplicação e do espaço geográfico de interesse. A dispersão pode ser normal (quando planejado e fixa); aleatória (quando os nós são aleatoriamente posicionados no espaço) ou móvel (quando os nós possuem meios de locomoção). Essa informação torna-se importante devido ao fato de a distribuição influenciar diretamente o desempenho e a escolha do protocolo de roteamento dos sensores, conseqüentemente, o consumo de energia (DWIVEDI; VYAS, 2011).

Dessa forma, buscando uma performance melhor e uma considerável redução de custos em redes, aprofundaremos nossos estudos nas tecnologias das RSSF, que utilizam sistemas com “inteligência” distribuída, com sensores locais distribuídos no ambiente físico, com capacidade de processamento de uma lógica pré-definida, atuadores e ainda auxiliados pelo uso da tecnologia sem fio. As RSSF têm como vantagens a rápida possibilidade de sua utilização em locais sem estrutura física preexistente (ponto de energia, cabeamento estruturado, etc.). Além disso, suas conexões sem fio em áreas perigosas possibilitam a redução de riscos pessoais por não haver a necessidade de expor pessoas a essas condições.

Portanto, restam alguns obstáculos que merecem ser superados, com destaque para os estudos, visando otimizar o roteamento, a latência, a quantidade de saltos e o tempo de vida da rede de sensores (DWIVEDI; VYAS, 2010; SHARMA; THAKUR, 2014; LIU, 2012).

#### **2.4.1 6LoWPAN**

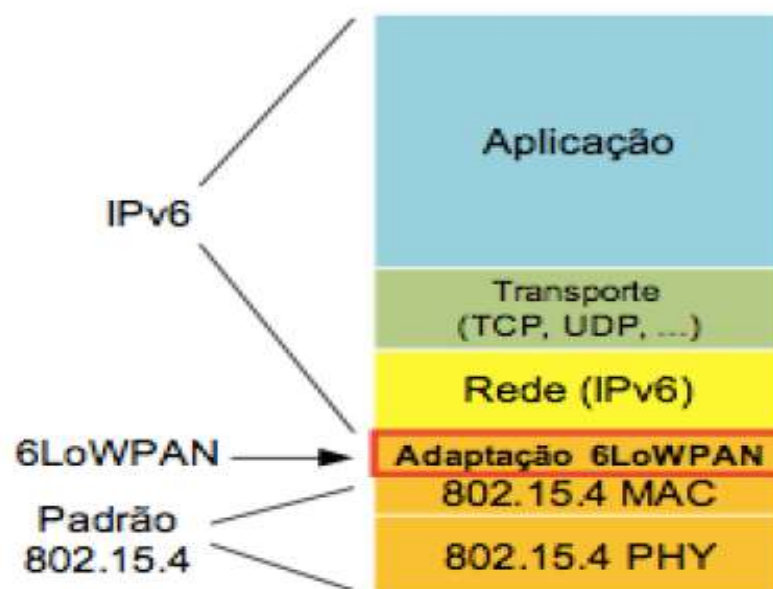
Em 2005, o IETF fretou o grupo de trabalho IPv6 sobre redes sem fio de baixa potência (6LoWPAN), que surgiu para padronizar as adaptações do IPv6 sobre redes de malha compostas por dispositivos com baixa consumo de energia, ligadas sem fio. A



fragmentação do datagrama de camada de enlace e a compressão de cabeçalho IPv6 foram definidas para transportar eficientemente datagramas IPv6 dentro de quadros IEEE 802.15.4. Novos mecanismos também foram definidos, a fim de realizar operações para a descoberta de vizinhos do IPv6 (do inglês, Neighbor Discovery for IPv6, IPv6 ND). Tais operações, registradas na Camada de enlace de dados (RFC 1122), são responsáveis pela autoconfiguração de endereço dos nós, pela descoberta de outros nós na rede local e seus endereços, pela detecção de endereços duplicados, pela descoberta de prefixos de endereços e pela manutenção da informação sobre outros nós vizinhos que estejam ativos (BRADEN, 1989; FALL et al., 2011).

Enquanto o 6LoWPAN foi originalmente fretado para IEEE 802.15.4.- como mostra a Figura 8 -, o termo "Redes 6LoWPAN" é, muitas vezes, generalizado, referindo-se à malha de redes construídas por mecanismos que apresentam perda no enlace e baixa potência. Os dispositivos que utilizam a tecnologia 6LoWPAN possuem recursos limitados em termos de capacidade computacional (processamento, memória), largura de banda de comunicação e de energia da bateria (ATZORI et al., 2010).

Figura 8 – Protocolo 6LoWPAN na camada de Adaptação

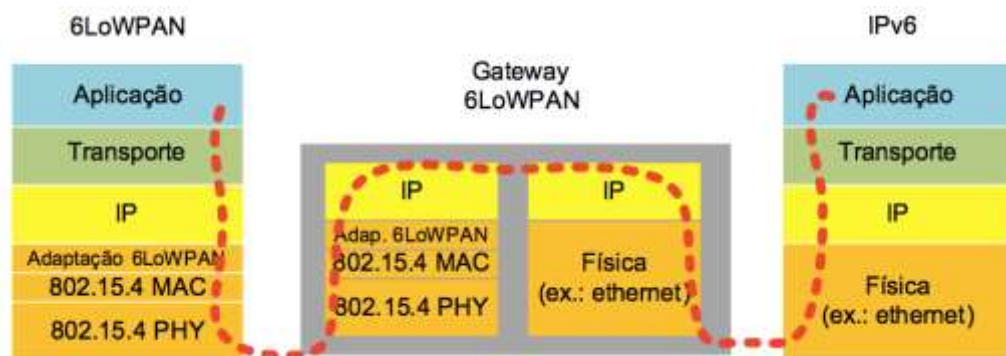


Fonte: IPv6.br (2016).

Uma questão de longa data na adaptação do IPv6 a qualquer tecnologia de enlace é se deve ou não suportar um único domínio de broadcast, no qual toda comunicação é transitiva dentro da sub-rede. Por exemplo: se A pode enviar para B e B pode enviar para C, então A pode enviar para C, e qualquer interface pode alcançar qualquer número de interfaces dentro

da sub-rede, enviando um único datagrama IP. Emular um único domínio de broadcast dentro de uma rede 6LoWPAN requer roteamento e encaminhamento de camada de enlace, muitas vezes, referido como "por baixo da malha", uma vez que a topologia de malha com saltos múltiplos é abstraída por debaixo de IPv6, para aparecer como uma rede totalmente conectada. No entanto, o IETF não especificou qualquer malha por baixo do protocolo de roteamento para uso em redes 6LoWPAN. Observe a Figura 9 (SHELBY, 2011).

Figura 9 – Comunicação entre o protocolo 6LoWPAN e o IPv6



Fonte: IPv6.br (2016).

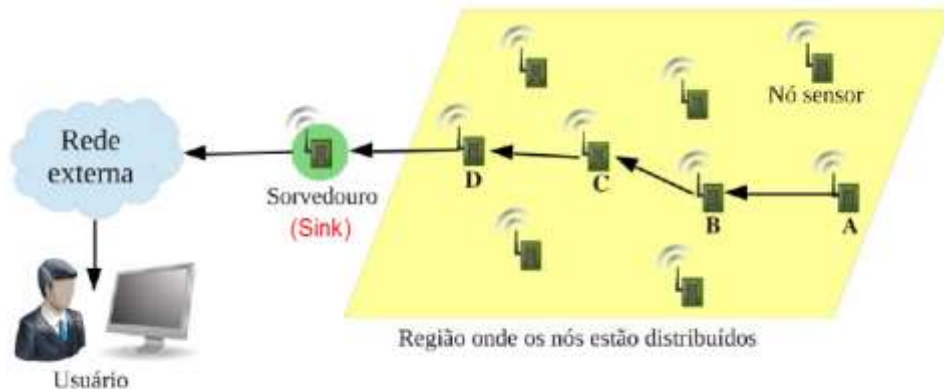
Segundo Shelby (2011), o IETF especificou, em contraste, uma arquitetura sobre o roteamento e o RPL. O roteamento e encaminhamento implementados na camada de rede de acordo com a arquitetura IP serão explicados nas próximas seções. Quando uma arquitetura é definida sob a malha, a extensão IPv6 liga-se, imediatamente, aos vizinhos acessíveis dentro de um único *link* de transmissão. Em outras palavras, uma rede roteamento 6LoWPAN seria composta de vários escopos *link-local* sobrepostos, cada nó definindo seu próprio escopo *link-local*, que inclui seus nós vizinhos de ligação imediata.

## 2.5 Routing Protocol for Low-Power and Lossy Networks

O Protocolo de Roteamento para Redes com Perdas e Baixo Consumo de Energia (do inglês, *Routing Protocol for Low-power and Lossy Networks*, RPL), especificado no Pedido de Comentários (do inglês, *Request for Comments*, RFC) RFC6550 (WINTER, 2012), é projetado para Redes com Perdas e Baixo Consumo de Energias (do inglês, *Low-power and Lossy Networks*, LLNs), desenvolvido e padronizado pelo *ROLL Working Group* no *Internet Engineering Task Force*, IETF. O RPL foi projetado para ser o protocolo padrão que utiliza IPv6 para LLNs e redes de sensores, aplicável em todos os tipos de implementações e aplicações de LLNs, como mostra a Figura 10 (WINTER, 2012).

Essas Redes com Perdas e Baixo Consumo de Energias são compostas por grandes quantidades de nós limitados, nos quais existem *links* instáveis e voláteis que, normalmente, suportam baixas taxas de transmissão de dados e padrões de entrega que nem sempre são ponto a ponto (MARTOCCI et al., 2010).

Figura 10 – LLN, nós sensores, enviando pacotes para o nó Sorvedouro (*Sink*)



Fonte: Santos (2013).

### 2.5.1 Objetivo do protocolo de roteamento RPL

O RPL tem como objetivo prover um roteamento eficiente de caminhos para três padrões de tráfego (WINTER, 2010):

- **Multipoint-to-point:** são nós que periodicamente enviam mensagens para um ponto de coleta específico, no sorvedouro (*sink*);
- **Point-to-multipoint:** quando a mensagem do tráfego é originada em um nó *sink* e tem como destino dispositivos específicos dentro da LLN.
- **Point-to-point:** usado para estabelecer uma conexão direta entre dois nós.

### 2.5.2 Grafo Acíclico Direcionado

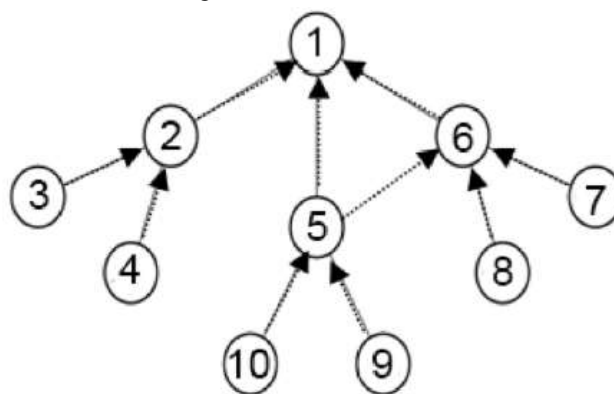
O RPL baseia-se no conceito de Grafo Acíclico Direcionado (do Inglês, *Directed Acyclic Graph*, DAG). Uma DAG define uma estrutura em forma de árvore, que especifica as rotas padrão entre os nós do LLN. No entanto, uma estrutura de DAG é mais do que uma árvore típica, no sentido de que um nó pode estar associado a múltiplos nós pais no DAG, ao contrário das árvores clássicas, nas quais apenas um dos pais é permitido. Mais especificamente, RPL organiza nós como Grafo Acíclico Direcionado Orientado ao Destino (do Inglês, *Destination-Oriented Directed Acyclic Graph*, DODAG), no qual os nós mais

populares de destino, os nós sorvedouros (também conhecidos como, *sinks*) ou aqueles que fornecem uma rota padrão para a Internet (ou seja, *gateways*) agem como as raízes da DAG.

Uma instância RPL consiste em vários requisitos introduzidos pelos aplicativos de destino. Pode ser composta de grafos disjuntos, nos quais cada grafo é um DODAG e a comunicação entre os pontos é feita subindo a estrutura do grafo ou descendo a mesma até alcançar suas folhas (PISTER et al., 2009). Assim, o objetivo do protocolo RPL é prover um roteamento eficiente de caminhos para padrões de tráfego em árvores em um cenário de Redes com Perdas e Baixo Consumo de Energias. Na prática, assim que um nó RPL obtém um endereço IPv6 global, une-se a um DODAG (WINTER, 2010).

No processo de construção da topologia da rede, cada roteador identifica um conjunto estável de pais em um caminho em direção à raiz DODAG e associa-se a um pai preferido, selecionado com base na função objetivo (do Inglês, *Objective Function*, OF) (JAVOID et al., 2009). A função objetivo define como nós RPL uma ou mais métricas em fileiras que selecionam e otimizam rotas em um DODAG. Uma OF é responsável pela classificação computacional, baseada em métricas de roteamento específicos, como atraso, qualidade do *link*, conectividade, ETX, entre outras (JAVOID et al., 2009), e especificando as restrições de roteamento e os objetivos de otimização dos dispositivos de rede executado pelo RPL. Para esse propósito, um DODAG é criado, como mostra a Figura 11. Cada nó mantém a melhor rota para a raiz do DODAG.

Figura 11 – DODAG RPL



Fonte: Ruckebusch (2016).

O RPL utiliza quatro tipos de mensagens de controle, elencadas a seguir, para manter e atualizar as rotas. O processo de roteamento inicia pela construção do DAG. A raiz anuncia informações sobre seu DODAG (de um único nó) para todos vizinhos alcançáveis. Em cada nível da árvore de roteamento, os nós tomam decisões sobre rotas baseadas na OF. Uma vez

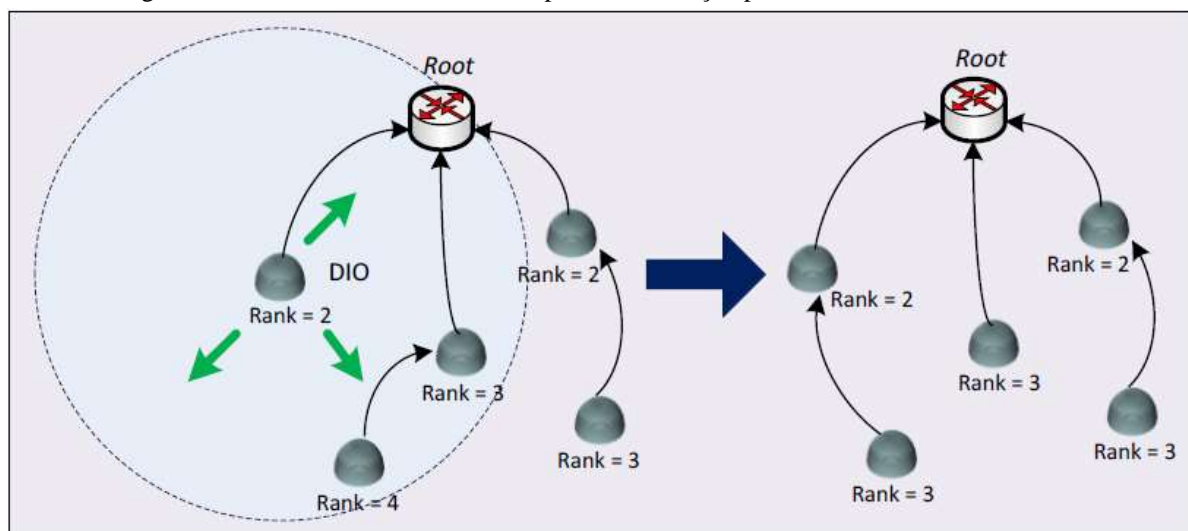
que se junta ao DODAG, o nó escolhe uma raiz como seu pai e calcula seu *rank*, uma métrica que indica as coordenadas do nó na hierarquia da rede (VASSEUR et al., 2011). Os demais nós repetirão esse processo de seleção do pai e notificação as informações do DODAG para possíveis novos dispositivos. Quando esse processo se estabiliza, o roteamento de dados pode então começar. O processo descrito cria rotas ascendentes, dos nós para uma raiz. Para construir as rotas descendentes, o RPL emite as mensagens especiais discutidas a seguir.

### 2.5.3 Mensagens de Controle RPL

O RPL especifica três tipos principais de mensagens de controle suportadas, descritas a seguir:

- **DIO (*DODAG Information Object*):** essas mensagens são utilizadas para anunciar um DODAG e suas características. Dessa forma, são usadas para a descoberta de DODAG bem como de sua formação e manutenção. O intervalo de envio de DIO é controlado de modo eficiente pelo algoritmo *Trickle* (LEVIS et al., 2011). A Figura 12 ilustra outro exemplo de atualização da posição dos nós e dos encaminhamentos criados. Quando um nó mais profundo recebe um DIO cujo cálculo do *rank* temporário é menor do que o *rank* atualmente considerado, é realizada uma nova seleção e emitido um novo DIO, alertando sobre a nova posição (novo *rank*), com o novo encaminhamento consequentemente criado (GOUVEIA, 2013).

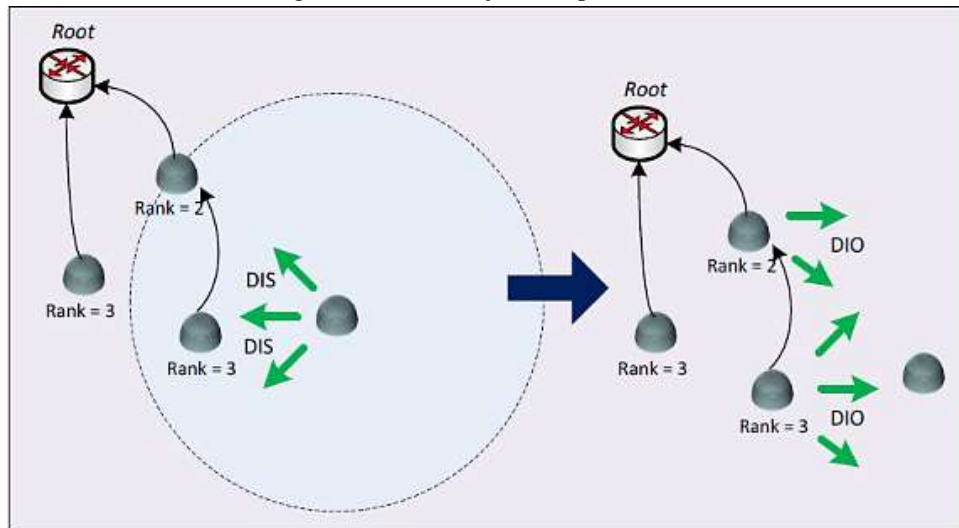
Figura 12 – Partilha de DIOs com exemplo de atualização para melhorar encaminhamento



Fonte: Gouveia (2013).

- **DIS (*DODAG Information Solicitation*)**: esse tipo de mensagem é similar às mensagens de solicitação de rotas do IPv6 (NARTEN, 2007) usadas para descobrir DODAG na vizinhança e solicitar DIO de nós vizinhos, sem possuir corpo de mensagem. Dessa forma, os nós associados à rede e que ainda não recebam DIS de outros nós com o mesmo objetivo, são ignorados até encontrarem um nó pai e calcularem o próprio *rank*. Se, ao fim de um limite máximo de pacotes DIS emitidos, os nós não obtêm resposta, passam para o estado *SLEEP* até à próxima vez que se encontrarem no estado ativo (GOUVEIA, 2013). A Figura 13 apresenta a utilização básica e primária do DIS.

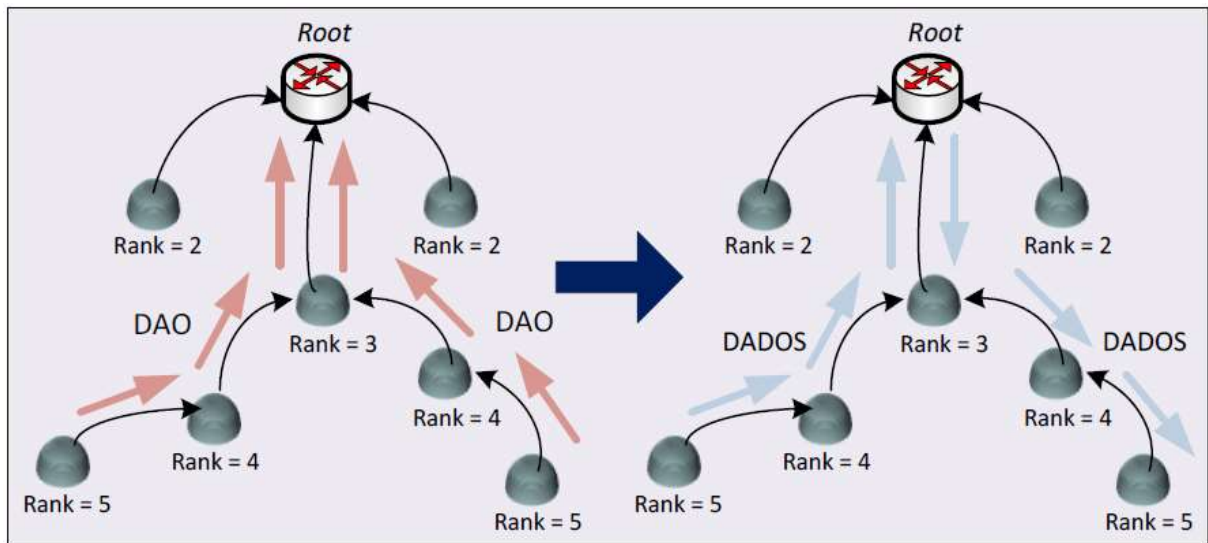
Figura 13 – Solicitação com pacotes DIS



Fonte: Gouveia (2013).

- **DAO (*Destination Advertisement Object*)**: mensagens DAO são utilizadas durante o processo de notificação de rotas descendentes. Elas são enviadas em sentido ascendente (dos nós que manifestam o desejo de receber mensagens para seus pais preferenciais), para propagar informações de destino ao longo do DODAG. Essas informações são utilizadas no preenchimento das tabelas de roteamento descendente, que permitem o tráfego ponto-a-multiponto e ponto-a-ponto. Fundamentalmente, o mecanismo DAO é utilizado em pelo menos duas situações distintas. A primeira é a entrega de pacotes de um nó de uma DODAG para outro nó da mesma DODAG. A segunda é a entrega de pacotes entre nós de uma DODAG e nós de outras redes, sejam de outras DODAGs sejam de redes externas e distintas. Note-se que não é obrigatória a construção desses encaminhamentos em aplicações que não requerem tráfego descendente. A Figura 14 exhibe o encaminhamento descendente das mensagens DAO.

Figura 14 – Encaminhamento descendente das mensagens DAO



Fonte: Gouveia (2013).

#### 2.5.4 Rotas Descendentes

As rotas descendentes, da raiz para os nós, são ativadas por meio de mensagens DAO, propagadas como *unicast*, por meio dos pais em direção à raiz. Essas mensagens informam quais prefixos pertencem a qual roteador RPL e quais prefixos podem ser alcançados por meio de qual roteador RPL. O protocolo especifica dois modos de operação para o roteamento descendente: *storing* e *non-storing*, Figura 14. Ambos requerem a geração de mensagens DAO, que são enviadas e utilizadas de maneira diferente em cada modo de operação. Os dois modos de operação são descritos a seguir:

- **Modo *storing*:** nesta operação, cada roteador RPL deve armazenar rotas para seus destinos em um DODAG. Essas informações são repassadas dos nós para seus pais preferenciais. Isso faz com que, em nós mais próximos da raiz, o armazenamento necessário seja definido pelo número de destinos na rede. Com isso, a memória necessária em um nó próximo à raiz e em outro, distante dela, pode variar drasticamente. Conforme a rede evolui, torna-se necessário algum tipo de implementação e manutenção administrativa contínua nos dispositivos (HERBERG et al., 2013). Entretanto, tal intervenção é inviável devido ao perfil dinâmico da rede.



- **Modo *non-storing*:** cada nó gera e envia mensagens DAO para a raiz do DODAG. O intervalo no qual o DAO é enviado varia de acordo com a implementação. Entretanto, a especificação do protocolo sugere que esse intervalo seja inversamente proporcional à distância do nó a raiz. Dessa forma, um nó folha gera mais mensagens do que um nó intermediário, por exemplo. Após coletar toda informação necessária, a raiz agrega essa informação. Se ela precisa enviar uma mensagem descendente na rede, deve utilizar um cabeçalho IPv6 para roteamento de origem (*source routing*). Dessa forma, os nós encaminham a mensagem até que ela alcance seu destino (TSVETKO, 2011). Ou seja, caso os nós não possuam capacidade de armazenamento para operarem no modo *storing*, a rede sofre maior risco de fragmentação e, portanto, perda de pacotes de dados, consumindo a capacidade da rede com o roteamento de origem (HERBERG et al., 2013).

Em uma LLN convergente, cada roteador RPL identifica um conjunto estável de pais, considerados um potencial próximo salto (*next-hop*) em um caminho no sentido da "raiz" do DODAG, bem como um pai preferido. Cada roteador que for parte de um DODAG (ou seja, selecionou os pais) emitirá mensagens DIO, usando *link-local* multicast e indicando a respectiva classificação na DODAG, ou seja, a distância para a raiz DODAG de acordo com algumas métricas, na forma mais simples de contagem de saltos (*hop-count*). Após receber um número dessas mensagens, um roteador calculará sua própria posição tal que é maior do que a classificação de cada um de seus pais. Seleciona-se um pai preferencial e, em seguida, inicia-se a emissão de mensagens DIO.

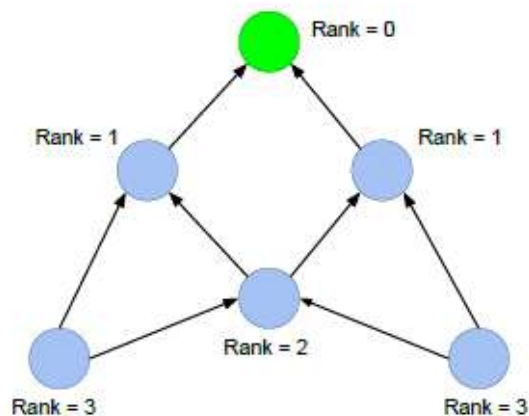
Para a formação de um DODAG, inicia-se, na raiz DODAG, um único roteador, que faz parte de um DODAG, e gradualmente são recebidas mensagens DIO, que se espalham para cobrir toda a LLN, os pais e os pais preferidos são selecionados e outros roteadores RPL participam da DODAG. A raiz DODAG também inclui, nas mensagens DIO, um objeto de configuração DODAG, que descreve uma configuração comum de atributos para todos os roteadores RPL nessa rede, incluindo seu modo de funcionamento, características e temporização. Dessa forma, inclui-se, ao DODAG, a cópia do último objeto de configuração DODAG recebido em suas mensagens DIO, permitindo também que esses parâmetros de configuração propagem-se por meio da rede.

Um roteador pode assumir, livremente, um *rank* menor do que o anunciado anteriormente, isto é, com a aproximação da raiz, logicamente, descobre-se um pai anunciando uma classificação mais baixa. Deve, portanto, ignorar todos os pais anteriores de



*ranks* mais altos, de modo a restringir a capacidade de um roteador RPL mudar de *rank*, Figura 15 (CORDERO, 2013). Mas essa capacidade de um roteador assumir um grau maior que o anunciado anteriormente é restrita, para evitar problemas de contagem de saltos infinitos. A raiz pode desencadear um "recálculo global" do DODAG, aumentando um número de mensagens DIO em sequência.

Figura 15 – Classificação de *rank* em um DODAG



Fonte: Vasseur (2011); Cordero (2013).

Logo, o DODAG construído é usado para instalar rotas: o "pai preferido" de um roteador RPL pode servir como uma rota padrão para a raiz ou a raiz pode incorporar, em suas mensagens DIO, os prefixos de destino incluídos na conectividade fornecida pela raiz a mensagens DIO geradas pelos roteadores RPL por meio da LLN. Assim, o RPL, por meio de mensagens DIO geradas, fornece "rotas para cima" ou "rotas multiponto-a-ponto" dos sensores dentro da LLN e para a raiz.

## 2.6 Sistema Operacional Contiki

Contiki é um sistema operacional de código aberto, que permite a conexão de microcontroladores de baixa potência com a Internet. Contiki apoia plenamente o padrão IPv6 e IPv4 e os últimos padrões wireless de baixo consumo: 6LoWPAN, RPL, COAP. Contiki é executado em uma grande quantidade de dispositivos sem fio de baixa potência (CONTIKI, 2016).

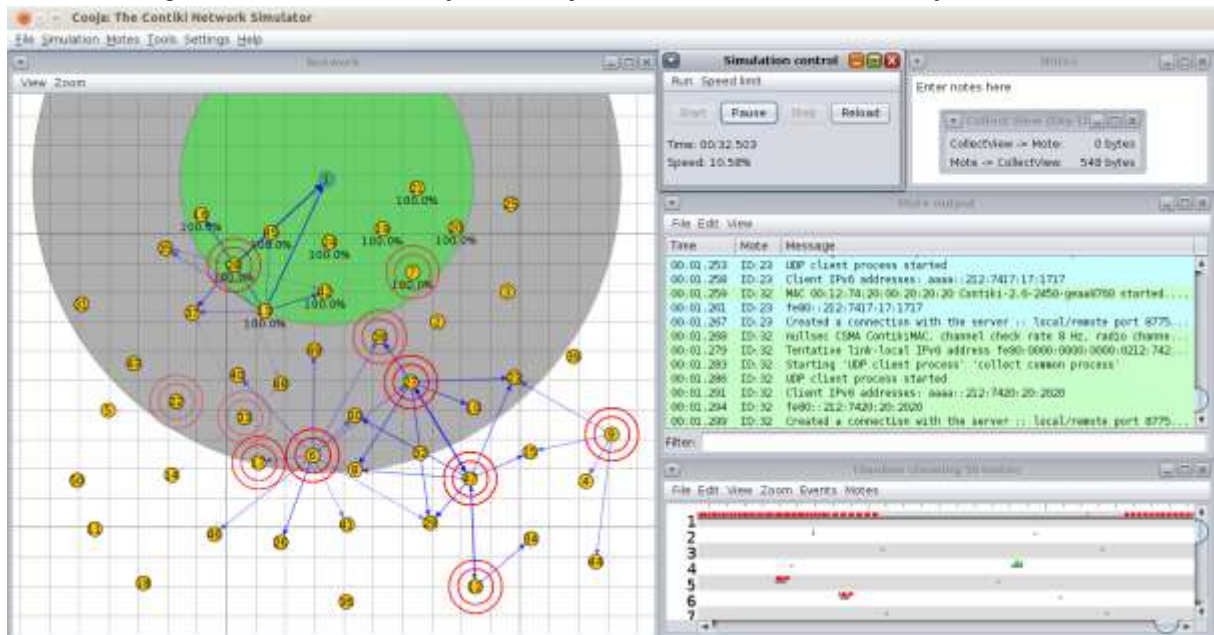
Utilizando o Contiki, as aplicações têm sido desenvolvidas de maneira rápida e fácil. Elas podem ser desenvolvidas na linguagem de programação C, o que possibilita a utilização do simulador Cooja, que simula redes sem fio para IoT (CONTIKI, 2016).

Uma das suas importantes características é ter sido projetado para trabalhar ocupando pouco espaço de memória. Isso torna Contiki altamente eficiente em termos de memória, facilitando a compilação do teste de aplicações em uma variedade de plataformas previamente configuradas no simulador Cooja. Podemos exemplificar algumas das diversas plataformas disponíveis em Contiki, rede IP completa, com protocolos como: UDP, TCP, HTTP, 6LoWPAN, RPL, COAP e IPv6; operando, principalmente, em sistemas de sensores com perda e baixo consumo de energia (CONTIKI, 2016).

### 2.6.1 COOJA

COOJA é um simulador baseado em Java, que foi projetado para redes de sensores sem fio e é executado no sistema operacional Contiki. COOJA simula rede de nós sensores, Figura 16, onde cada nó pode ser de um tipo diferente, diferindo tanto no software quanto no hardware. Muitas partes do simulador podem ser facilmente substituídas ou estendidas com novas funcionalidades. Exemplos de partes que podem ser estendidas incluindo na simulação: meio rádio, hardware nó simulado, e plug-ins para simulação de entrada e saída (ÖSTERLIND et al., 2006).

Figura 16 – Início da simulação em Cooja, nós sensores recebendo endereçamento IPv6



Fonte: Simulação realizada no Cooja pelo autor.

Um nó simulado em COOJA tem três propriedades básicas: sua memória de dados, o tipo de nó e seus periféricos de hardware. O tipo de nó pode ser compartilhado entre vários

nós e determina a propriedades comuns a todos eles.

Todas as interações com simulações e nós simuladas são realizadas por meio de plug-ins. Um exemplo é o plug-in que possibilita ao usuário iniciar ou pausar a simulação. Interfaces e plug-ins podem ser facilmente adicionados ao simulador, facilitando aos usuários a personalização da sua simulação (ÖSTERLIND et al., 2006).

## 2.7 Trabalhos Relacionados

Essa seção apresenta alguns exemplos de trabalhos correlatos, que tratam de questões de pesquisa relacionadas aos temas centrais dessa dissertação: otimização de roteamento RPL para IoT. O capítulo descreve trabalhos que utilizam o protocolo de roteamento RPL como referência para roteamento e que introduzem alguma forma de adaptação por meio de simulações no Cooja, em busca de melhorias na performance da IoT, utilizando lógica computacional.

Em Gaddour (2014), é proposta a utilização de lógica *fuzzy* no cálculo da função objetivo para o protocolo RPL. Na especificação do RPL, o componente responsável por selecionar os caminhos é a função objetivo (do inglês, *Objective Function*, OF). Ela permite selecionar o nó pai preferencial dentro um conjunto de candidatos. No entanto, a especificação não define quais conjuntos de métricas devem ser utilizados na seleção dos melhores caminhos, deixando esse item aberto para os implementadores.

Os autores propõem uma função objetivo, chamada por eles de OF-FL (*Fuzzy Logic*), a fim de computar o melhor caminho ao nó sink, considerando um conjunto de parâmetros. Os parâmetros escolhidos foram: número de saltos (*hop count*), tempo de Atraso ponto-a-ponto, taxa de perda de pacotes e taxa de mudanças na rota default.

Esses parâmetros são representados como variáveis linguísticas e combinadas com um conjunto de regras *fuzzy*. A avaliação dessas regras origina a classificação de um nó vizinho (em termos de qualidade, como "excelente", "muito bom", "bom", "ruim", entre outros).

Na dissertação de mestrado de Radoi (2011), o COOJA foi utilizado para avaliar o desempenho de protocolos de roteamento em ligações com perdas para a construção de redes inteligentes. Já na dissertação de mestrado de Ali (2012), foi utilizado para a avaliação de performance de RPL em Contiki.

Neste estudo, foi investigado funções objetivo assim como os parâmetros mais influentes sobre RPL em Contiki (WSN OS). Em seguida, avaliou-se o desempenho RPL em termos de energia, latência, taxa de entrega, controle do overhead e tempo de convergência da

rede. Realizou-se uma análise detalhada e extensiva das simulações, produzindo os diferentes parâmetros RPL no que diz respeito às cinco métricas de desempenho. O estudo fornece uma visão sobre as diferentes configurações de RPL, adequados para diferentes áreas de aplicação.

Os resultados experimentais mostram que ETX é um objetivo melhor e que ContikiRPL fornece rede muito eficiente de convergência (14s), sobrecarga de tráfego Control (1300 pacotes), consumo de energia (1,5% de rádio no tempo), Latência (0.5s) e Rácio de pacotes de entrega (98%) em nossa amostra de simulação RPL de uma hora com 80 nós, após a configuração cuidadosa do DIO intervalo mínimo / duplicações, Rádio dever ciclismo, e Frequência de mensagens de aplicação.

Outro exemplo de uso prático do COOJA foi apresentado na dissertação de mestrado de Bitencourt (2013), na qual o autor propõe uma nova taxonomia para simuladores de RSSF, baseada na modelagem dos quatro domínios dos quais um simulador deve tratar. São eles: nó sensor, rede, ambiente e energia. Portanto, o simulador Cooja foi selecionado para a implementação de um novo estimador de consumo de energia e a inclusão de um modelo de baterias alcalinas que considera o efeito de relaxamento baseado na taxonomia proposta, a retenção de capacidade e a taxa de descarga. A nova extensão Cooja apresenta um erro médio menor do que 4,5% para as estimativas da capacidade remanescente final e tempo de vida do nó sensor.

Como podemos observar, já existem muitos usos práticos do Simulador Cooja, isto é, ele serve para muitas aplicações de desempenho em relação às tecnologias que englobam o conceito da IoT, por exemplo, para observar o comportamento das redes LNNs e o protocolo RPL antes mesmo de implementá-las.

### 3 METODOLOGIA

#### 3.1 Considerações iniciais

Um importante desafio relacionado às RSSF, visando aplicações de IoT, refere-se ao problema do consumo de energia dos sensores, no caso, dos localizados próximos ao nó sorvedouro ou que fazem parte das rotas mais utilizadas e tendem a esgotar prematuramente seus recursos de energia (RAMOS et al., 2014). A morte prematura pode ocasionar o rompimento de rotas anteriormente estabelecidas, fazendo com que a rede tenha que se reorganizar, ocasionando maior consumo de energia e largura de banda (ALSHAWI et al., 2012). Assim, o esquema de seleção de rotas deve considerar a energia residual dos nós e a qualidade da comunicação entre eles, a fim de reduzir o consumo de energia e, ao mesmo tempo, proporcionar o balanceamento de carga (MACHADO et al., 2013) e a melhor seleção do pai preferido, que tenha a menor contagem de saltos na rede.

Adicionalmente, a seleção de rotas pode ser realizada utilizando-se um mecanismo capaz de estimar a qualidade do *link* ponto-a-ponto, baseado nas informações oriundas das múltiplas camadas, como condições da rede, energia e número de saltos. Contudo, geralmente, os protocolos de roteamento para aplicações de IoT não levam em conta todos esses importantes requisitos, fazendo com que soluções alternativas devam ser desenvolvidas (CHEN et al., 2012).

Neste trabalho, será realizada uma pesquisa experimental, tendo por objeto de estudo as funções objetivas padrões existentes na configuração do simulador Cooja, OF0 e a MRHOF, utilizadas pelo protocolo de roteamento RPL. Utilizaremos as OF0 e MRHOF como cenários (Figuras 17 e 18), por meio dos quais analisaremos três variáveis como métricas capazes de influenciar para uma melhor seleção do nó pai preferido. As métricas utilizados serão: número médio de saltos, nível de energia da rota e qualidade do link (ETX). Dessa forma, as métricas serão analisadas no para-analizador, baseado em Lógica  $E\tau$ , que irá gerar uma nova função objetivo, denominada OF-BPL

#### 3.2 Estabelecendo uma boa rota

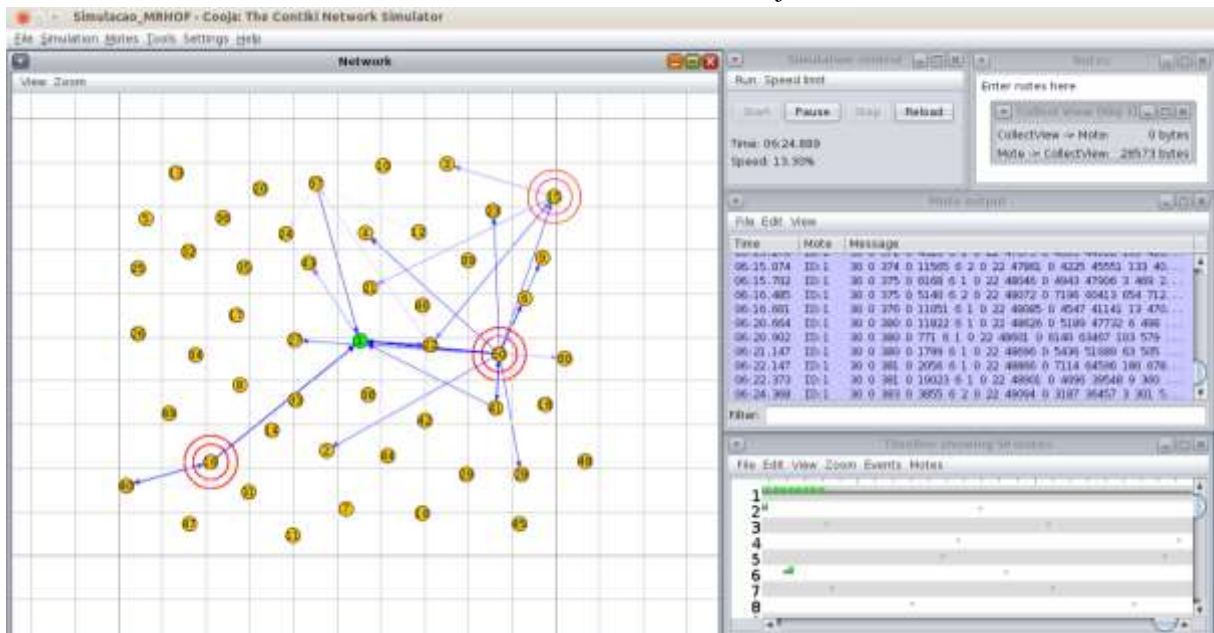
Cada métrica descreve uma propriedade importante do nó vizinho, elegível como um nó pai preferido, contribuindo para formar uma rota para a raiz. Consideramos as métricas de

nós sensores que serão usadas para expressar se a rota até um determinado vizinho apresenta boa qualidade de serviço. Primeiro, identificamos as propriedades de um bom caminho. De modo geral, uma boa rota em LLNS deve satisfazer as seguintes propriedades:

- **Distância mínima:** uma rota é escolhida com menor número de saltos para chegar ao nó sink, sendo ela rota a mesma que terá um gasto mínimo de energia. Portanto, quando os nós transmitem com a mesma potência, a rota com menor número de saltos é a mesma que a rota com o menor gasto de energia.
- **Confiabilidade:** uma rota é confiável, se fornece alta taxa de entrega. Essa propriedade é muito correlacionada com a qualidade do *link* que forma o percurso. Assim, a propriedade de confiabilidade pode ser avaliada por meio de estimadores de qualidade do *link*, tais como o número esperado de retransmissões (ETX) e outros (BACCOUR et al., 2012).
- **Eficiência Energética:** uma rota é eficientemente energética se usar os nós que têm mais energia, realizando, assim, o balanceamento de carga da rede. Consequentemente, os níveis de bateria dos nós para estender o tempo de vida útil da rede devem ser considerados. Assim, no processo de roteamento, deve-se evitar, o quanto for possível, os nós com níveis de bateria fraca. A eficiência energética será medida por meio da energia remanescente nos nós sensores que compõem as LLNs, entre outros.

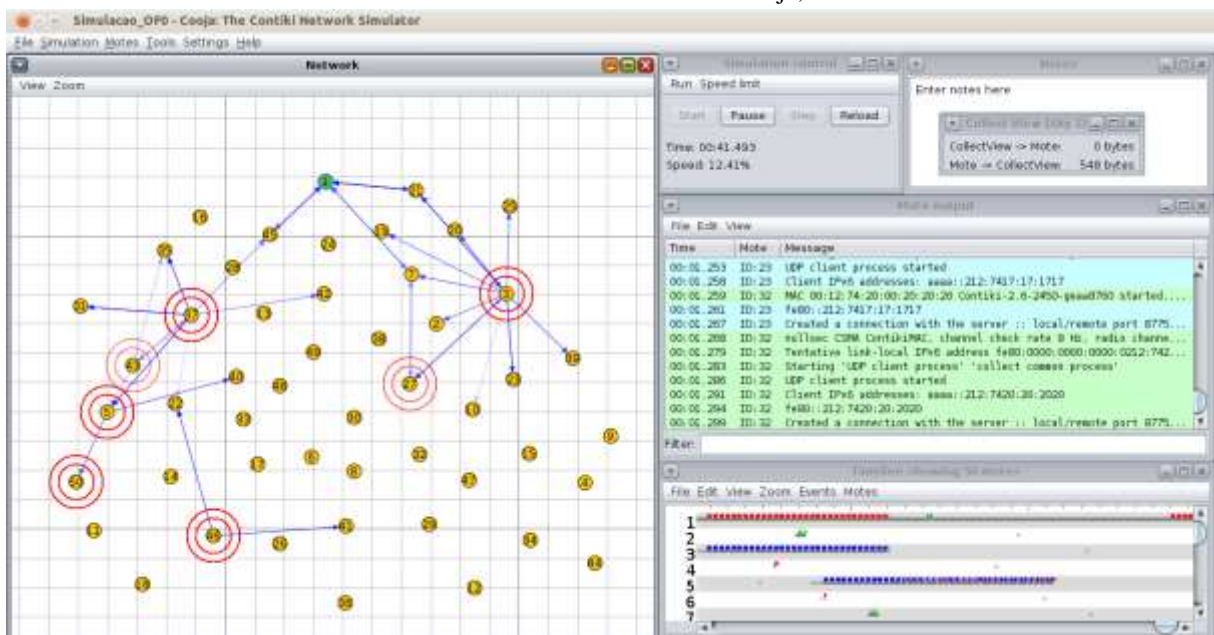
Certamente essas propriedades podem ter diferentes requisitos antagônicos e torna-se um desafio satisfazer todas simultaneamente. Por exemplo, um percurso confiável pode apresentar um aumento no número de saltos devido aos nós vizinhos selecionados para a rota ter uma maior carga de energia residual da bateria, tornando esse caminho com uma melhor qualidade do *link*. Em Vasseur (2012) foram exibidas várias métricas de roteamento para serem usadas no encaminhamento em LLNs. Na seção seguinte, serão expostas as métricas analisadas nesta pesquisa.

Figura 17 – Simulação de nós sensores, trocando pacotes por meio do protocolo de roteamento RPL com base na OFBPL no Cooja, SO Contiki



Fonte: Simulação realizada no Cooja pelo autor.

Figura 18 – Simulação de nós sensores trocando pacotes por meio do protocolo de roteamento RPL com base na OFBPL no Cooja, SO Contiki



Fonte: Simulação realizada no Cooja pelo autor.

### 3.3 Métricas de desempenho utilizadas

As métricas de desempenho analisadas neste artigo são as seguintes:

- **Número médio de saltos:** essa métrica refere-se ao número de saltos entre o nó vizinho (isto é, o candidato ao pai preferido) e a raiz. No entanto, o número de saltos depende, principalmente, da métrica, que é especificada pelo resultado das OFs, sendo esse campo incrementado sempre que a mensagem tiver a necessidade de ser reenviada.
- **Nível de energia da rota:** representa o menor nível de energia entre os nós que compõem a LLN roteada pelo protocolo RPL. Se uma rota possui um nível de energia muito baixo, existe grande possibilidade de ela falhar pelo esgotamento de energia de um dos nós. Por esse motivo, as OFs atualizam essas informações sempre que uma mensagem DIO é recebida. Caso a energia do nó seja inferior ao campo de nível de energia da mensagem, o campo recebe o valor atual de energia do nó. Dessa forma, associa-se com o nível de energia para cada rota, o nível mais baixo de energia dos nós que compõem a rota. Caso contrário, a mensagem é enviada contendo o nível de energia que já estava gravado no campo da mensagem. Contudo, é essencial considerar essa métrica para aplicações com preocupações de eficiência energética.
- **Qualidade do *Link*:** essa métrica é medida pelo número esperado de retransmissões (ETX) como um indicador da qualidade do *link* entre o nó e seu vizinho. Um bom *link* deve ter valores ETX próximos a zero. Altos valores de ETX significam que o *link* não é confiável conforme o número de retransmissões aumenta. Essa métrica deve ter peso significativo para aplicações com requisitos de confiabilidade. Outras métricas de qualidade do *link*, tais como o Indicador de Intensidade do Sinal Recebido (do inglês, *Received Signal Strength Indicator*, RSSI) ou o Nível de Qualidade da Ligação (do inglês, *Link Quality Level*, LQL) também podem ser consideradas estimadores de qualidade de *link* (BACCOUR et al., 2009).

Nosso objetivo é especificar uma abordagem de todas as métricas que, efetivamente, fazem parte do processo de roteamento, no qual serão combinadas individualmente, para análise em conjunto, mas com requisitos diferentes. Propomos uma abordagem utilizando a Lógica  $E\tau$ , combinada com as métricas obtidas das funções objetivos defaults do roteamento RPL para redes LLNs, que será apresentada na próxima seção.



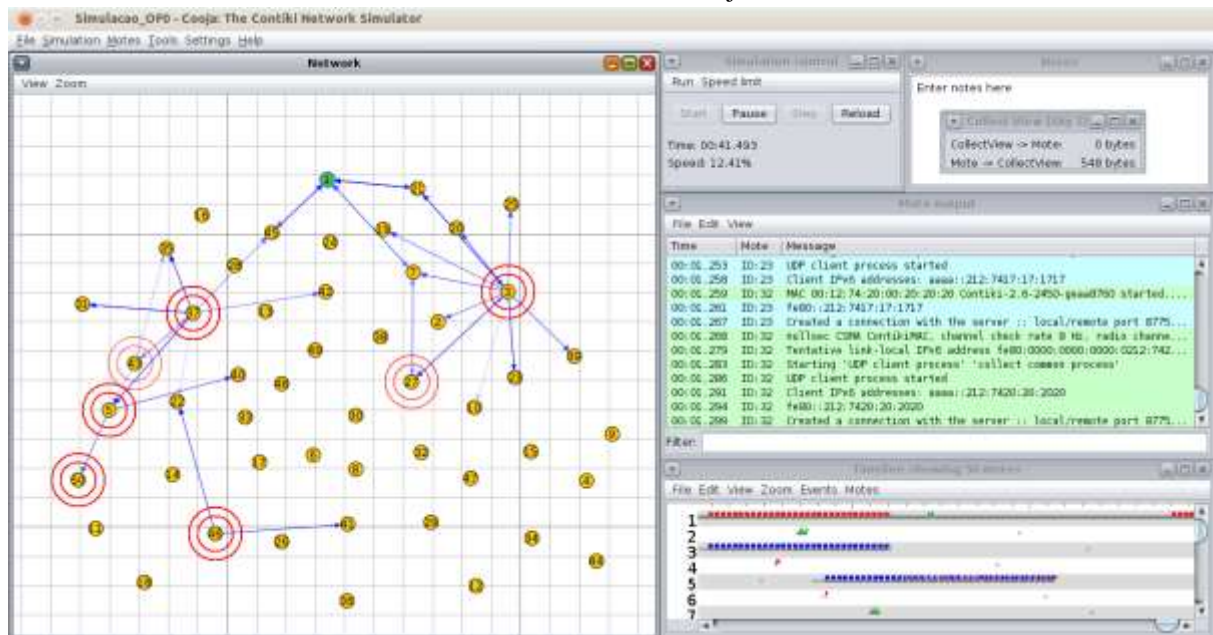
### 3.4 Cenário de simulação

Segundo Kulkarni, Forster, Venayagamoorthy (2011) diversas técnicas de Inteligência Computacional (IC) têm sido utilizadas, para resolver os problemas das RSSF. Entre eles, o de roteamento. Assim, o trabalho de simulação proposto apresenta um mecanismo baseado em sistemas paraconsistentes, capazes de estimar o grau de evidência da qualidade das rotas, de modo que se possa classificá-las, com o intuito de auxiliar o protocolo de roteamento RPL, utilizando uma comparação de métricas suas funções objetivo em cenários de aplicações de IoT que integram RSSF com perda e de baixa potência, as LLNs, possibilitando, dessa forma, a seleção de um nó pai preferido.

Para essa proposta de implementação, foi utilizado simulador Cooja, que pertence ao ambiente do Sistema Operacional Contiki. Caracteriza-se por ser um simulador baseado em *java* e usa a linguagem de programa C como a linguagem de design de software em redes de sensores sem fio. Fornecerá um método adequado para definir as necessidades ambientais de uma IoT. Optamos pelo Contiki, por ser um sistema operacional *open source*, altamente portátil e multitarefa para sistemas, com memória eficiente embutido em redes de sensores sem fio. Dessa forma, fornece precisão em sua simulação no comportamento e implementação de uma LLN real. Também permite que os usuários adicionem, rapidamente, uma funcionalidade e personalizem simulações específicas, pois tanto as interfaces como os plug-ins podem ser facilmente adicionados ao COOJA.

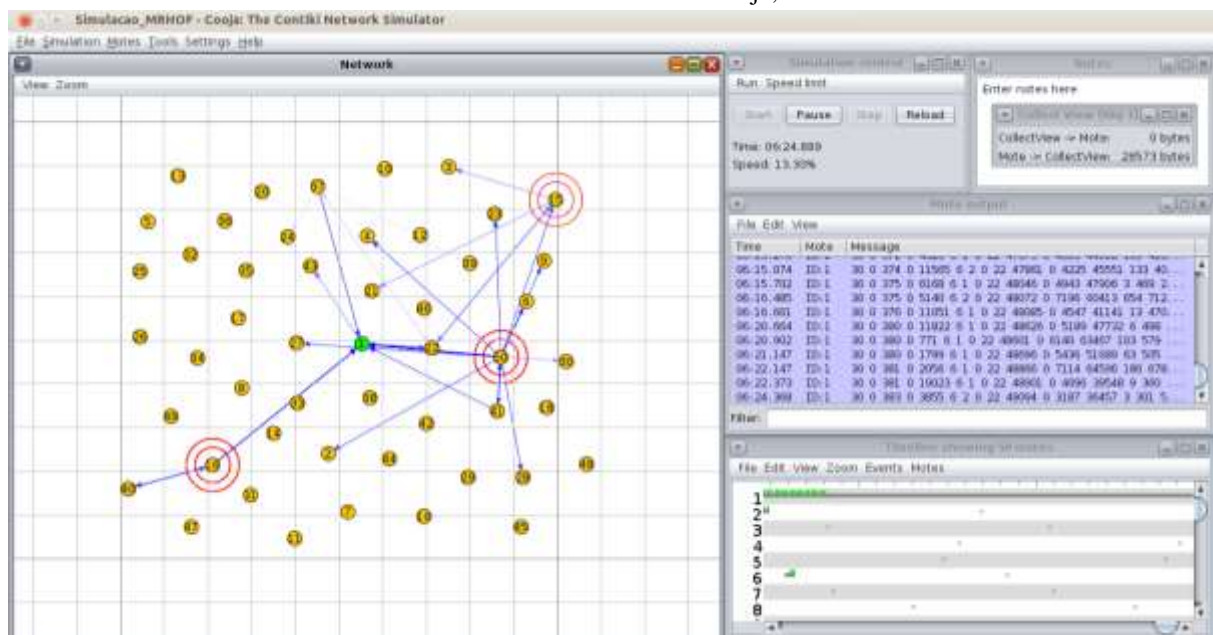
O cenário de simulação foi construído, para permitir a avaliação de desempenho da abordagem proposta. A topologia do cenário utilizado consiste em 49 nós sensores e um nó sink. Há, portanto, 50 dispositivos em uma topologia de rede aleatória, suficientes para a formação de múltiplas rotas em cada nó da rede, de modo a oferecer suporte para a validação da abordagem proposta no cenário que utiliza a OF0, como mostra a Figura 19 e o cenário com a MRHOF como exposto na Figura 20.

Figura 19 – Simulação de nós sensores trocando pacotes por meio do protocolo de roteamento RPL com a OF0 no Cooja, SO Contiki



Fonte: Simulação realizada no Cooja pelo autor.

Figura 20 – Simulação de nós sensores trocando pacotes por meio do protocolo de roteamento RPL com a MRHOF no Cooja, SO Contiki



Fonte: Simulação realizada no Cooja pelo autor.

O tempo total de simulação (30 minutos) permitiu uma observação do comportamento do protocolo. Utilizando as funções objetivo avaliadas, as simulações foram repetidas quatro vezes distintas, resultado nas métricas que serão analisadas no para-analizador da lógica  $\epsilon\tau$ . Dessa forma a energia inicial dos nós foi ajustada para 2000 joules para a potência máxima,

que corresponde ao valor máximo de energia nesta simulação própria para ser utilizada nos dispositivos de IoT.

### 3.4.1 Combinação de métricas de roteamento

Nesta seção, propomos uma análise do protocolo de roteamento RPL com a utilização das funções objetivo globais, combinando os resultados das métricas acima mencionados com uma abordagem lógica  $E\tau$ .

Chamamos a função objetivo baseada na Lógica  $E\tau$ , OF-BPL. Na proposta dessa função, consideramos as métricas acima mencionadas, como a contagem de saltos, qualidade do *link* (ETX) e o nível de bateria remanescente para cada nó na concepção da OF-BPL. Cada métrica descreve um elo importante ou propriedade do nó, como anteriormente discutido. O conjunto de métricas selecionadas serão utilizadas para avaliar a qualidade dos *links* dos nós e comparar o conjunto de nós vizinhos, a fim de selecionar o pai preferido, que representará o próximo salto para atingir a raiz DAG. Com o intuito de avaliar o melhor nó vizinho para ser o pai preferido, recorreremos a lógica  $E\tau$ .

O uso de técnicas de inteligência artificial para suportar o processo de tomada de decisão é, de fato, amplamente utilizado nas recentes pesquisas de obras relacionadas a redes com perda e com baixa potência energética para sensores sem fio (LLNs). Técnicas como a de inteligência artificial reforçam a eficiência e o desempenho de protocolos de roteamento por meio da combinação de dados de nós e suas interações, buscando um sistema capaz de tomar decisões para uma melhora no desempenho para rede de sensores sem fio.

Nosso objetivo é decidir sobre o melhor nó pai entre a lista dos nós vizinhos, de acordo com os requisitos da aplicação em uma forma eficiente. Assim, propomos o uso da Lógica  $E\tau$  por meio do seu algoritmo para-analizador, que desempenha um papel importante na tomada de decisão. Há muitas vantagens na lógica  $E\tau$  (ABE, 2011):

- Permite um raciocínio abstrato em valores de qualquer faixa;
- Fornece uma álgebra rigorosa para lidar com imprecisas em formação;
- É um método conveniente de combinar objetivos conflitantes e conhecimento humano especialista; e
- Pode ser implementado com algoritmos de baixa complexidade.

A partir da Coleta de Dados dos Sensores (Sensor Data Collect) do simulador Cooja do SO Contiki, foi possível extrair os valores das métricas em análise da OF0 mostrada na Tabela 2 e da MRHOF demonstrada na Tabela 3:

Tabela 2 – Valores das métricas obtidos de uma simulação em Cooja da OF0

Sensor Data Collect with Contiki (connected to <stdin>)														
File Tools														
Nodes	Node Control		Sensor Map		Network Graph		Sensors		Network		Power		Node Info	
	Node	ETX	Hops	Lost	Power	Received	Dups	Listen	Power	CPU Power	LPM Power	Rtmetric	Chum	Transmit Power
<All>														
1.1	1.1	0.000	0.000	0	0.000	0	0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0	0.000
2.2	2.2	32.000	2.000	0	1.374	16	0	0.575	0.491	0.149	768.000	0	0.159	12 min, 41 sec
3.3	3.3	32.000	2.000	0	1.561	16	0	0.697	0.541	0.147	768.000	0	0.176	12 min, 08 sec
4.4	4.4	32.000	2.000	0	1.594	16	0	0.618	0.533	0.147	768.000	0	0.296	11 min, 44 sec
5.5	5.5	16.000	1.000	0	1.813	15	0	0.888	0.616	0.145	512.000	0	0.164	11 min, 34 sec
6.6	6.6	32.000	2.000	0	1.461	16	0	0.669	0.526	0.148	768.000	0	0.119	11 min, 52 sec
7.7	7.7	32.000	2.000	0	1.702	16	0	0.739	0.542	0.147	768.000	0	0.274	11 min, 44 sec
8.8	8.8	48.000	3.000	0	1.284	16	0	0.596	0.417	0.151	1024.000	0	0.119	11 min, 52 sec
9.9	9.9	16.000	1.000	0	1.326	16	0	0.632	0.507	0.148	512.000	0	0.038	12 min, 08 sec
10.10	10.10	16.000	1.000	0	1.261	16	0	0.553	0.509	0.148	512.000	0	0.050	12 min, 00 sec
11.11	11.11	16.000	1.000	0	1.214	16	0	0.528	0.494	0.149	512.000	0	0.044	12 min, 08 sec
12.12	12.12	32.000	2.000	0	1.801	16	0	0.727	0.572	0.146	768.000	0	0.357	11 min, 52 sec
13.13	13.13	16.000	1.000	0	1.173	16	0	0.498	0.472	0.149	512.000	0	0.063	11 min, 52 sec
14.14	14.14	16.000	1.000	0	1.098	16	0	0.453	0.439	0.150	512.000	0	0.055	11 min, 44 sec
15.15	15.15	32.000	2.000	0	1.342	16	0	0.575	0.454	0.150	768.000	0	0.164	12 min, 37 sec
16.16	16.16	32.000	2.000	0	1.556	16	0	0.586	0.475	0.149	768.000	0	0.346	11 min, 44 sec
17.17	17.17	16.000	1.000	0	1.720	16	0	0.848	0.602	0.145	512.000	0	0.124	12 min, 04 sec
18.18	18.18	48.000	3.000	0	1.747	16	0	0.740	0.553	0.147	1024.000	0	0.307	12 min, 08 sec
19.19	19.19	32.000	2.000	0	1.419	16	0	0.606	0.530	0.147	768.000	0	0.135	11 min, 44 sec
20.20	20.20	16.000	1.000	0	1.240	16	0	0.519	0.518	0.148	512.000	0	0.056	11 min, 52 sec
21.21	21.21	16.000	1.000	0	1.316	16	0	0.612	0.523	0.148	512.000	0	0.033	12 min, 00 sec
22.22	22.22	16.000	1.000	0	1.301	16	0	0.603	0.517	0.149	512.000	0	0.033	12 min, 08 sec
23.23	23.23	48.000	3.000	0	1.288	16	0	0.535	0.426	0.151	1024.000	0	0.177	12 min, 08 sec
24.24	24.24	64.000	4.000	0	1.202	16	0	0.528	0.421	0.151	1280.000	0	0.102	11 min, 44 sec
25.25	25.25	32.000	2.000	0	1.596	15	0	0.634	0.478	0.149	768.000	0	0.335	11 min, 47 sec
26.26	26.26	16.000	1.000	0	1.103	16	0	0.467	0.420	0.151	512.000	0	0.065	12 min, 04 sec
27.27	27.27	16.000	1.000	0	1.282	15	0	0.576	0.489	0.149	512.000	0	0.069	11 min, 47 sec
28.28	28.28	48.000	3.000	0	1.473	16	0	0.638	0.484	0.149	1024.000	0	0.204	12 min, 04 sec
29.29	29.29	48.000	3.000	0	1.389	16	0	0.616	0.449	0.150	1024.000	0	0.174	11 min, 52 sec
30.30	30.30	48.000	3.000	0	1.334	16	0	0.585	0.452	0.150	1024.000	0	0.148	11 min, 44 sec
31.31	31.31	32.000	2.000	0	1.908	16	0	0.772	0.585	0.146	768.000	0	0.405	12 min, 08 sec
32.32	32.32	16.000	1.000	0	1.084	16	0	0.461	0.421	0.151	512.000	0	0.052	12 min, 08 sec
33.33	33.33	48.000	3.000	0	1.655	16	0	0.657	0.520	0.148	1024.000	0	0.330	12 min, 16 sec
34.34	34.34	48.000	3.000	0	1.446	16	0	0.652	0.498	0.148	1024.000	0	0.147	12 min, 08 sec
35.35	35.35	32.000	2.000	0	1.597	15	0	0.660	0.545	0.147	768.000	0	0.245	11 min, 29 sec
36.36	36.36	32.000	2.000	0	1.468	16	0	0.667	0.525	0.148	768.000	0	0.128	12 min, 08 sec
37.37	37.37	48.000	3.000	0	1.213	15	0	0.503	0.410	0.151	1024.000	0	0.149	11 min, 29 sec
38.38	38.38	16.000	1.000	0	1.238	16	0	0.532	0.498	0.148	512.000	0	0.059	12 min, 16 sec
39.39	39.39	32.000	2.000	0	1.803	16	0	0.812	0.571	0.146	768.000	0	0.273	12 min, 00 sec
40.40	40.40	64.000	4.000	0	1.427	16	0	0.621	0.487	0.149	1280.000	0	0.170	11 min, 52 sec
41.41	41.41	48.000	3.000	0	1.321	16	0	0.576	0.445	0.150	1024.000	0	0.150	12 min, 41 sec
42.42	42.42	64.000	4.000	0	1.337	16	0	0.591	0.441	0.150	1280.000	0	0.155	11 min, 48 sec
43.43	43.43	32.000	2.000	0	1.564	15	0	0.665	0.475	0.149	768.000	0	0.275	11 min, 29 sec
44.44	44.44	32.000	2.000	0	1.437	16	0	0.623	0.523	0.148	768.000	0	0.143	12 min, 08 sec
45.45	45.45	48.000	3.000	0	1.374	15	0	0.574	0.474	0.149	1024.000	0	0.176	11 min, 38 sec
46.46	46.46	48.000	3.000	0	1.702	16	0	0.744	0.549	0.147	1024.000	0	0.262	12 min, 00 sec
47.47	47.47	32.000	2.000	0	1.279	16	0	0.592	0.469	0.149	768.000	0	0.165	12 min, 08 sec
48.48	48.48	16.000	1.000	0	1.073	16	0	0.447	0.429	0.151	512.000	0	0.047	12 min, 00 sec
49.49	49.49	16.000	1.000	0	1.185	16	0	0.500	0.490	0.149	512.000	0	0.046	11 min, 52 sec
50.50	50.50	32.000	2.000	0	1.502	16	0	0.678	0.521	0.148	768.000	0	0.155	12 min, 37 sec
Avg		32.653	2.041	0.000	1.422	15.857	0.000	0.615	0.496	0.148	778.449	0.000	0.162	11 min, 59 sec

Fonte: Resultados obtidos da simulação realizada no Cooja pelo autor.



Tabela 3 – Valores das métricas obtidos de uma simulação em Cooja da MRHOF

Node Control		Sensor Map		Network Graph		Sensors	Network	Power	Node Info		Serial Console			
Received	Dups	Hops	Rtmetric	ETX	Churn	Beacon Interval	Reboots	CPU Power	LPM Power	Listen Power	Transmit Power	Power	On-time	
0	0	0.000	0.000	0.000	0		0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000		
22	0	1.000	512.000	16.000	0	18 min, 21 sec	0	0.544	0.147	0.562	0.054	1.307	4 min, 36 sec	
22	0	1.000	512.000	16.000	0	17 min, 58 sec	0	0.538	0.147	0.549	0.060	1.295	4 min, 44 sec	
22	0	1.000	512.000	16.000	0	18 min, 15 sec	0	0.517	0.148	0.517	0.065	1.247	4 min, 32 sec	
23	0	1.000	512.000	16.000	0	18 min, 30 sec	0	0.540	0.147	0.558	0.087	1.332	5 min, 06 sec	
22	0	1.000	512.000	16.000	0	17 min, 22 sec	0	0.527	0.148	0.533	0.050	1.258	4 min, 28 sec	
22	0	1.000	615.045	16.000	0	18 min, 21 sec	0	0.539	0.147	0.565	0.046	1.297	4 min, 34 sec	
22	0	1.000	615.045	16.000	0	18 min, 09 sec	0	0.528	0.148	0.528	0.062	1.265	5 min, 06 sec	
22	0	1.000	512.000	16.000	0	18 min, 04 sec	0	0.551	0.147	0.573	0.078	1.349	4 min, 29 sec	
22	0	1.000	515.773	16.000	0	17 min, 52 sec	0	0.529	0.147	0.551	0.052	1.279	4 min, 50 sec	
22	0	2.000	788.182	33.188	1	13 min, 56 sec	0	0.453	0.150	0.487	0.128	1.218	4 min, 41 sec	
22	0	1.000	621.045	16.000	0	17 min, 34 sec	0	0.493	0.149	0.504	0.063	1.209	4 min, 39 sec	
22	0	1.909	795.818	30.545	1	14 min, 23 sec	0	0.521	0.148	0.529	0.133	1.331	4 min, 14 sec	
22	0	1.000	512.000	16.000	0	18 min, 15 sec	0	0.540	0.147	0.567	0.056	1.310	4 min, 47 sec	
23	0	1.000	512.000	16.000	0	18 min, 30 sec	0	0.526	0.148	0.531	0.059	1.263	4 min, 36 sec	
22	0	1.000	512.000	16.000	0	18 min, 06 sec	0	0.506	0.148	0.504	0.057	1.215	4 min, 29 sec	
22	0	1.000	615.045	16.000	0	18 min, 09 sec	0	0.514	0.148	0.522	0.054	1.239	4 min, 32 sec	
22	0	1.000	512.000	16.000	0	17 min, 55 sec	0	0.515	0.148	0.516	0.059	1.239	4 min, 20 sec	
22	0	1.000	512.364	16.000	0	18 min, 45 sec	0	0.545	0.147	0.568	0.053	1.312	4 min, 10 sec	
23	0	1.000	620.826	16.000	0	18 min, 19 sec	0	0.464	0.149	0.480	0.072	1.165	4 min, 53 sec	
22	0	1.909	796.091	30.545	1	14 min, 20 sec	0	0.523	0.148	0.530	0.139	1.340	4 min, 33 sec	
22	0	1.000	512.000	16.000	0	18 min, 09 sec	0	0.545	0.147	0.581	0.048	1.321	4 min, 25 sec	
22	0	1.000	571.182	16.000	0	17 min, 34 sec	0	0.507	0.148	0.495	0.051	1.200	4 min, 57 sec	
22	0	1.000	515.364	16.000	0	17 min, 22 sec	0	0.521	0.148	0.524	0.062	1.255	4 min, 49 sec	
22	0	2.000	814.773	32.000	0	17 min, 22 sec	0	0.480	0.149	0.518	0.146	1.294	4 min, 41 sec	
22	0	1.000	521.273	16.000	0	18 min, 21 sec	0	0.535	0.147	0.567	0.077	1.326	4 min, 33 sec	
22	0	1.000	512.000	16.000	0	17 min, 34 sec	0	0.516	0.148	0.510	0.056	1.230	4 min, 37 sec	
22	0	1.000	519.136	16.000	0	18 min, 09 sec	0	0.484	0.149	0.484	0.057	1.174	4 min, 28 sec	
22	0	1.000	512.000	16.000	0	17 min, 13 sec	0	0.497	0.148	0.522	0.082	1.250	4 min, 42 sec	
22	0	1.000	615.045	16.000	0	17 min, 19 sec	0	0.522	0.148	0.537	0.064	1.271	4 min, 30 sec	
22	0	1.000	615.045	16.000	0	17 min, 28 sec	0	0.520	0.148	0.516	0.058	1.241	4 min, 44 sec	
22	0	1.000	615.045	16.000	0	17 min, 22 sec	0	0.540	0.147	0.554	0.071	1.312	5 min, 09 sec	
22	0	2.000	801.500	32.000	0	18 min, 09 sec	0	0.473	0.149	0.501	0.136	1.259	4 min, 41 sec	
22	0	1.000	512.000	16.000	0	18 min, 24 sec	0	0.506	0.148	0.505	0.047	1.207	4 min, 34 sec	
22	0	1.000	719.000	16.000	0	17 min, 31 sec	0	0.484	0.149	0.516	0.069	1.219	4 min, 46 sec	
22	0	1.000	512.000	16.000	0	17 min, 22 sec	0	0.533	0.147	0.553	0.059	1.293	4 min, 46 sec	
22	0	2.000	821.500	32.000	0	17 min, 31 sec	0	0.432	0.150	0.519	0.216	1.318	4 min, 37 sec	
22	0	1.955	802.045	31.273	1	15 min, 55 sec	0	0.517	0.148	0.534	0.143	1.341	4 min, 40 sec	
22	0	1.000	512.000	16.000	0	18 min, 04 sec	0	0.522	0.148	0.528	0.059	1.257	4 min, 40 sec	
22	0	1.000	512.000	16.000	0	18 min, 04 sec	0	0.531	0.147	0.535	0.065	1.278	4 min, 25 sec	
22	0	2.000	775.273	32.000	0	18 min, 21 sec	0	0.461	0.150	0.484	0.115	1.208	4 min, 54 sec	
22	0	1.000	512.000	16.000	0	18 min, 09 sec	0	0.515	0.148	0.511	0.061	1.235	4 min, 36 sec	
22	0	1.000	512.000	16.000	0	17 min, 55 sec	0	0.543	0.147	0.598	0.052	1.340	4 min, 40 sec	
22	0	2.000	809.273	32.000	0	18 min, 09 sec	0	0.482	0.149	0.510	0.123	1.264	4 min, 35 sec	
22	0	1.000	621.455	16.000	0	17 min, 58 sec	0	0.506	0.148	0.497	0.055	1.205	4 min, 25 sec	
22	0	2.000	783.000	32.000	0	17 min, 16 sec	0	0.449	0.150	0.502	0.144	1.245	4 min, 30 sec	
22	0	1.000	615.045	16.000	0	17 min, 58 sec	0	0.521	0.148	0.531	0.048	1.247	4 min, 52 sec	
22	0	2.000	825.091	33.011	0	18 min, 21 sec	0	0.515	0.148	0.523	0.167	1.352	4 min, 43 sec	
22	0	1.000	512.000	16.000	0	17 min, 34 sec	0	0.539	0.147	0.565	0.060	1.311	4 min, 31 sec	
22	0	1.000	512.000	16.000	0	17 min, 28 sec	0	0.549	0.147	0.577	0.065	1.338	4 min, 38 sec	
22	0	2.000	812.955	32.398	1	13 min, 44 sec	0	0.465	0.149	0.515	0.167	1.296	4 min, 38 sec	
22.060	0.000	1.235	608.397	19.819	0.100	17 min, 35 sec	0.000	0.512	0.148	0.530	0.081	1.271	4 min, 39 sec	

Fonte: Resultados obtidos da simulação realizada no Cooja pelo autor.

### 3.4.1.1 Métrica de entrada número médio de saltos

A primeira métrica a ser analisada é o número médio de saltos realizados pelo nó até alcançar o sink. O modelo de atributos de entrada da contagem de saltos são apresentados nas Tabela 2 e 3, originado a partir de nossos estudos de simulação de RPL, apresentado em (BACCOUR, 2009) e fortemente relacionada com a área de implantação. A contagem média de saltos pertence ao intervalo de 0 a 4000 em relação a OF0, (zero representa proximidade e 4000 longe da raiz DAG) e pertence ao intervalo de 0 a 2000, em relação a MRHOF (zero é próximo e 2000, longe).

### 3.4.1.2 Métrica de entrada da energia restante

Por último, o nível da bateria, que foi ajustada de acordo com os requisitos da aplicação para o valor 2000, corresponde à bateria do cheia. A energia da bateria varia, quando seu valor for 0 para as duas funções objetivo como mostras nas Tabelas 2 e 3. Por exemplo, para aplicações com preocupações de eficiência energética, pode-se argumentar que o nível da bateria começa a ser cheio a 70%. Isso terá um impacto sobre a escolha do melhor nó pai, nesse caso, dando prioridade para o nó vizinho, que tem a maior energia remanescente.

### 3.4.1.3 Métrica de entrada da qualidade do *link* (ETX)

A métrico número esperado de transmissões (ETX) (GNAWALI, 2010), que se refere à qualidade do *link*, é uma importante métrica de encaminhamento, que indica a viabilidade de um caminho. Como mostras nas Tabelas 2 e 3. O ETX pertence ao intervalo de 0 a 64000, sendo o valor zero considerado uma qualidade baixa de link e o valor 64000 em relação a OF0, uma grande qualidade. Já, em MRHOF, o intervalo é de 0 a 34000, sendo zero equivalente à baixa qualidade do *link* e o valor 34000, à grande qualidade. Concluimos esse intervalo a partir de um conjunto de simulações realizadas com diferentes cenários (BACCOUR, 2009).

### 3.4.1.4 Métrica de saída da qualidade nó vizinho

Considerando cada uma das métricas mencionadas na seção anterior como uma variável paraconsistente diferente, uma métrica de entrada do nosso sistema paraconsistente, nível de energia do nó dentro de seus parâmetros, é tomada como evidência favorável. Portanto, a métrica de nível de bateria pode ser considerada uma grandeza diretamente proporcional. Esse argumento também pode ser aplicado à métrica qualidade do *link*, pois indica que os nós estão tendo um bom desempenho na seleção do nó pai preferido. No que diz respeito à métrica contagem média de saltos, ocorre o oposto; um nó mais distante (longe) da raiz DAG tende a percorrer um caminho maior, ocasionando uma demora na entrega da mensagem ao sink. Portanto, pode ser considerado uma grandeza inversamente proporcional.

Em ambos cenários avaliados, os valores das métricas devem ser normalizados com base nos valores dos resultados obtidos nas simulações. Esses valores devem ser utilizados como graus de evidência favorável para a ETX e o nível da energia, como grandezas

diretamente proporcionais. O oposto deve ser aplicado à métrica número médio de saltos. Nesse caso, a prova favorável deve ser definida como sua negação. As evidências de grau favorável ( $\mu$ ) e desfavorável ( $\lambda$ ) para a seleção do nó pai preferido são retiradas dos valores normalizados das métricas e apresentadas na Tabela 4:

### 3.4.2 Normalização

Uma vez que todas as métricas são estabelecidas, o passo seguinte é a normalização, que consiste na produção de uma métrica com valor de saída, estabelecendo o grau de crença e o grau de descrença para produzir uma ação única de controle. Nesse caso, todo o valor de uma métrica precisa ser normalizado, no universo ( $\tau$ ), para um valor real no intervalo de 0 a 1, antes de ser compilado no para-analizador, que gera o Reticulado QUCP.

Tabela 4 – Valores normalizados e evidências favoráveis ( $\mu$ ) e desfavoráveis ( $\lambda$ ) das métricas de seleção do nó pai preferido

MÉTODO DE ANÁLISE DE MÉTRICAS PARA TOMADAS DE DECISÕES NO PROTOCOLO DE ROTEAMENTO RPL									
Cenários	Normalização das Métricas			Base de Dados do Para-analizador					
	Hops	Power	ETX	Hops		Power		ETX	
				$\mu$	$\lambda$	$\mu$	$\lambda$	$\mu$	$\lambda$
OF0	1000	1596	16000	0,25	0,25	0,58	0,70	0,25	0,25
	1500	1389	19050	0,25	0,33	0,64	0,71	0,30	0,29
	1800	1732	22580	0,50	0,44	0,65	0,71	0,35	0,44
	2000	1561	33500	0,50	0,53	0,72	0,72	0,52	0,51
	2400	1374	38750	0,50	0,65	0,73	0,73	0,61	0,56
	2900	1655	45700	0,75	0,75	0,75	0,74	0,71	0,73
	3200	1213	49580	0,75	0,78	0,82	0,78	0,77	0,77
	3500	1437	56905	0,75	0,93	0,84	0,82	0,89	0,83
	3750	1238	61000	1,00	0,96	0,87	0,84	0,95	0,96
	4000	1103	63500	1,00	0,98	0,91	0,91	0,99	0,99
MRHOF	1000	1307	16000	0,50	0,50	0,96	0,89	0,48	0,48
	1200	1295	17000	0,60	0,53	0,96	0,96	0,54	0,51
	1456	1247	18500	0,81	0,60	0,86	0,99	0,63	0,58
	1620	1332	20750	0,73	0,58	0,90	0,90	0,63	0,56
	1780	1174	22850	0,89	0,93	0,89	0,92	0,71	0,77
	1850	1259	24009	0,93	0,94	0,99	0,97	0,79	0,81
	1900	1207	27888	0,95	0,97	0,93	0,95	0,87	0,88
	1925	1326	29750	0,96	0,99	1,00	1,00	0,91	0,93
	1985	1235	31605	0,99	1,00	0,99	0,99	0,96	0,97
	2000	1311	32505	1,00	1,00	0,98	0,96	1,00	0,99

Fonte: Elaborada pelo autor.

Após a parametrização das métricas obtidas por meio das simulações realizadas no Cooja, serão analisadas as proposições: "Quais os efeitos da aplicação da Lógica Paraconsistente Evidencial Et sobre os dados obtidos das métricas analisada das funções

objetivos *default*, OF0 e MRHOF, do protocolo de roteamento RPL? Será que a OF-BPL gerada pelo para-analisador proporcionará a otimização da performance de desempenho da Internet das Coisas?". Para isso, o Para-analisador será aplicado nas bases de dados representas nos cenários 1 (OF0) e 2 (MRHOF), respectivamente na Tabela 5 e Tabela 6:

Tabela 5 – Base de dados formada pelas métricas obtidas nas simulações de Cooja com a OF0

RESULTADOS DA PESQUISA DAS SIMULAÇÕES COM A OF0, APLICAÇÃO DO MÉTODO E RESULTADOS											
Simulação 1			Simulação 2			Simulação 3			Simulação 4		
Hops	Power	ETX	Hops	Power	ETX	Hops	Power	ETX	Hops	Power	ETX
0,25	0,95	0,25	0,25	0,84	0,25	0,25	0,57	0,25	0,25	0,78	0,25
0,25	0,56	0,25	0,38	0,73	0,30	0,33	0,84	0,34	0,32	0,71	0,29
0,50	1,00	0,50	0,45	0,91	0,35	0,44	0,84	0,46	0,46	0,91	0,44
0,50	0,94	0,50	0,50	0,82	0,52	0,53	0,69	0,50	0,51	0,82	0,51
0,50	0,77	0,50	0,60	0,72	0,61	0,65	0,61	0,57	0,58	0,70	0,56
0,75	0,76	0,75	0,73	0,87	0,71	0,75	0,89	0,73	0,74	0,84	0,73
0,75	0,73	0,75	0,80	0,64	0,77	0,78	0,77	0,78	0,78	0,71	0,77
0,75	0,70	0,75	0,88	0,75	0,89	0,93	0,76	0,86	0,85	0,74	0,83
1,00	0,70	1,00	0,94	0,65	0,95	0,96	0,84	0,94	0,97	0,73	0,96
1,00	0,63	1,00	1,00	0,58	0,99	0,98	0,94	0,98	0,99	0,72	0,99

Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 6 – Base de dados formada pelas métricas obtidas nas simulações de Cooja com a MRHOF

RESULTADOS DA PESQUISA DAS SIMULAÇÕES COM A MRHOF, APLICAÇÃO DO MÉTODO E RESULTADOS											
Simulação 1			Simulação 2			Simulação 3			Simulação 4		
Hops	Power	ETX	Hops	Power	ETX	Hops	Power	ETX	Hops	Power	ETX
0,50	0,86	0,48	0,50	0,97	0,48	0,50	0,99	0,48	0,50	0,94	0,48
0,50	0,89	0,48	0,60	0,96	0,51	0,50	0,92	0,54	0,53	0,92	0,51
0,50	0,93	0,48	0,73	0,92	0,56	0,50	0,95	0,63	0,58	0,93	0,56
0,50	0,96	0,48	0,81	0,99	0,63	0,50	0,89	0,63	0,60	0,95	0,58
0,95	0,98	0,92	0,89	0,87	0,69	0,95	0,96	0,71	0,93	0,94	0,77
0,95	0,99	0,92	0,93	0,93	0,72	0,95	0,97	0,79	0,94	0,97	0,81
0,98	0,99	0,94	0,95	0,89	0,84	0,98	0,99	0,87	0,97	0,96	0,88
1,00	0,96	0,98	0,96	0,98	0,90	1,00	0,96	0,91	0,99	0,97	0,93
1,00	1,00	0,99	0,99	0,91	0,95	1,00	1,00	0,96	1,00	0,97	0,97
1,00	0,90	1,00	1,00	0,97	0,98	1,00	0,90	1,00	1,00	0,92	0,99

Fonte: Elaborada pelo autor.

A análise das métricas foi calculada considerando as evidências favoráveis ( $\mu$ ), multiplicadas por seus respectivos pesos (tendo suas diferenças de acordo com o cenário, pois são funções objetivo diferentes) e finalmente adicionados. O mesmo é feito para a evidência desfavorável ( $\lambda$ ) (ABE, 2015).

Nas Tabelas 7, 8 e 9, mostradas a seguir, exibe os resultados das métricas que compõem a proposta da nova função objetiva (OF-BPL).



Tabela 7 – Resultado da métrica número médio de saltos analisado pelo para-analizador para gerar na OF-BPL

RESULTADOS DA PESQUISA DO NÚMERO MÉDIO DE SALTOS, APLICAÇÃO DO MÉTODO E RESULTADOS								
A		B		A AND B		Nível de Exigência >		0,500
E1 OR E2		E3 OR E4				Conclusões		
$\mu_{13}$	$\mu_{24}$	$\mu_{57}$	$\mu_{68}$	$\mu_{1R}$	$\mu_{2R}$	Hcert	Gcontr	Decisão
0,25	0,25	0,50	0,30	0,25	0,75	-0,50	0,00	
0,33	0,38	0,60	0,30	0,30	0,70	-0,40	0,00	
0,50	0,45	0,73	0,35	0,35	0,65	-0,30	0,00	
0,53	0,50	0,81	0,52	0,50	0,50	0,00	0,00	
0,65	0,60	0,89	0,59	0,59	0,41	0,18	0,00	
0,75	0,69	0,93	0,65	0,65	0,35	0,30	0,00	
0,78	0,80	0,95	0,71	0,71	0,29	0,42	0,00	
0,93	0,88	0,96	0,75	0,75	0,25	0,50	0,00	
1,00	0,94	0,99	0,76	0,76	0,24	0,52	0,00	
1,00	1,00	1,00	0,78	0,78	0,22	0,56	0,00	
Baricentro				0,56	0,44	0,13	0,00	

Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 8 – Resultado da energia residual analisado pelo para-analizador para gerar na OF-BPL

RESULTADOS DA PESQUISA DA ENERGIA RESIDUAL APLICAÇÃO DO MÉTODO E RESULTADOS								
A		B		A AND B		Nível de Exigência >		0,500
E1 OR E2		E3 OR E4				Conclusões		
$\mu_{13}$	$\mu_{24}$	$\mu_{57}$	$\mu_{68}$	$\mu_{1R}$	$\mu_{2R}$	Hcert	Gcontr	Decisão
0,95	0,84	0,99	0,91	0,99	0,01	0,98	0,00	
0,84	0,73	0,96	0,40	0,96	0,04	0,92	0,00	
1,00	0,91	0,95	0,84	1,00	0,00	1,00	0,00	
0,94	0,82	0,99	0,89	0,99	0,01	0,98	0,00	
0,77	0,72	0,96	0,87	0,96	0,04	0,92	0,00	
0,89	0,87	0,97	0,73	0,97	0,03	0,94	0,00	
0,77	0,64	0,99	0,82	0,99	0,01	0,98	0,00	
0,76	0,75	0,98	0,65	0,98	0,02	0,96	0,00	
0,84	0,65	1,00	0,58	1,00	0,00	1,00	0,00	
0,94	0,58	0,97	0,70	0,97	0,03	0,94	0,00	
Baricentro				0,98	0,02	0,96	0,00	

Fonte: Elaborada pelo autor.

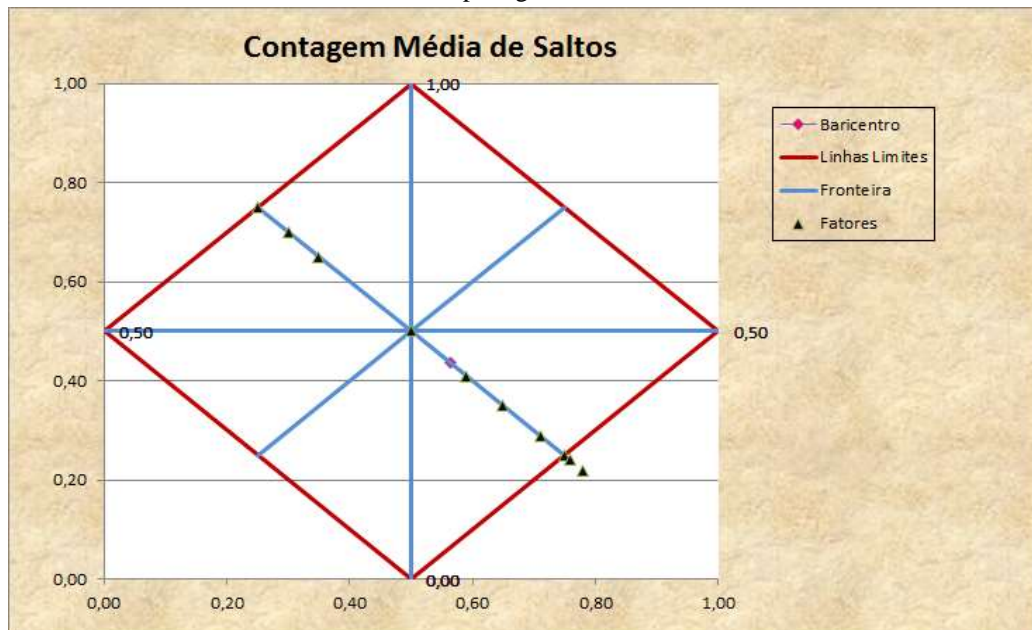
Tabela 9 – Resultado da qualidade do *link* analisado pelo para-analizador para gerar na OF-BPL.

RESULTADOS DA PESQUISA DA QUALIDADE DO LINK, APLICAÇÃO DO MÉTODO E RESULTADOS								
A		B		A AND B		Nível de Exigência >		0,500
E1 OR E2		E3 OR E4				Conclusões		
$\mu_{13}$	$\mu_{24}$	$\mu_{57}$	$\mu_{68}$	$\mu_{1R}$	$\mu_{2R}$	Hcert	Gcontr	Decisão
1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,00	1,00	0,00	
1,00	1,00	0,99	0,99	1,00	0,00	1,00	0,00	
1,00	1,00	0,98	0,98	1,00	0,00	1,00	0,00	
1,00	0,92	0,96	0,96	1,00	0,00	1,00	0,00	
1,00	0,75	0,96	0,96	1,00	0,00	1,00	0,00	
1,00	0,75	0,96	0,95	1,00	0,00	1,00	0,00	
0,75	0,75	0,96	0,95	0,96	0,04	0,92	0,00	
0,75	0,75	0,94	0,94	0,94	0,06	0,88	0,00	
0,75	0,75	0,93	0,93	0,93	0,07	0,86	0,00	
0,75	0,75	0,92	0,92	0,92	0,08	0,84	0,00	
Baricentro				0,98	0,03	0,95	0,00	

Fonte: Elaborada pelo autor.

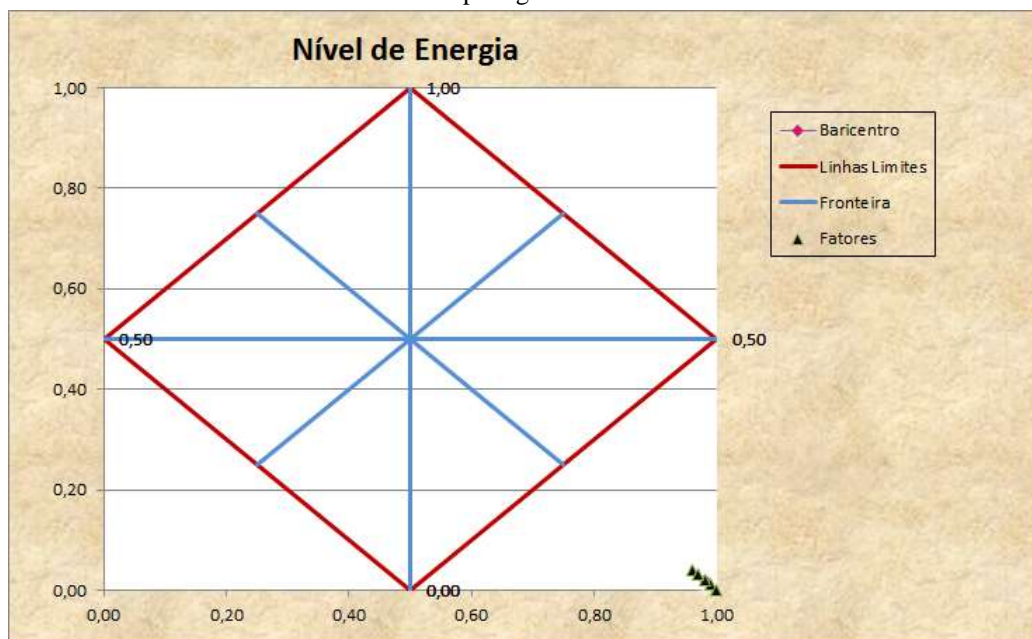
A análise global é calculada considerando as evidências favoráveis ( $\mu$ ), multiplicadas por seus respectivos pesos (todos iguais, em ambos os cenários) e finalmente adicionados. O mesmo é feito para a evidência desfavorável ( $\lambda$ ) (ABE, 2010). A Figura 21, 22 e 23, a seguir, mostram os reticulados formados com os resultados obtidos das métricas analisadas pelo para-analizador para a OF-BPL.

Figura 21 – Reticulado formado com o resultado métrica da contagem média de saltos analisada pelo para-analizador para gerar na OF-BPL



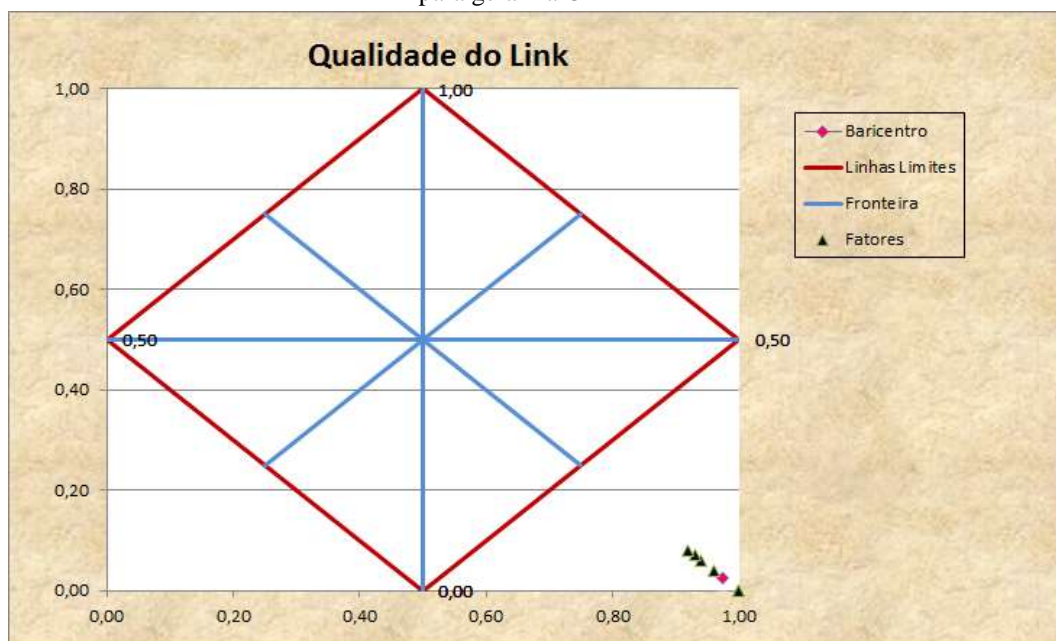
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 22 – Reticulado formado com o resultado da métrica nível de bateria residual analisada pelo para-analizador para gerar na OF-BPL



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 23 – Reticulado formado com o resultado da métrica qualidade do *link* analisada pelo para-analizador para gerar na OF-BPL



Fonte: Elaborada pelo autor.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

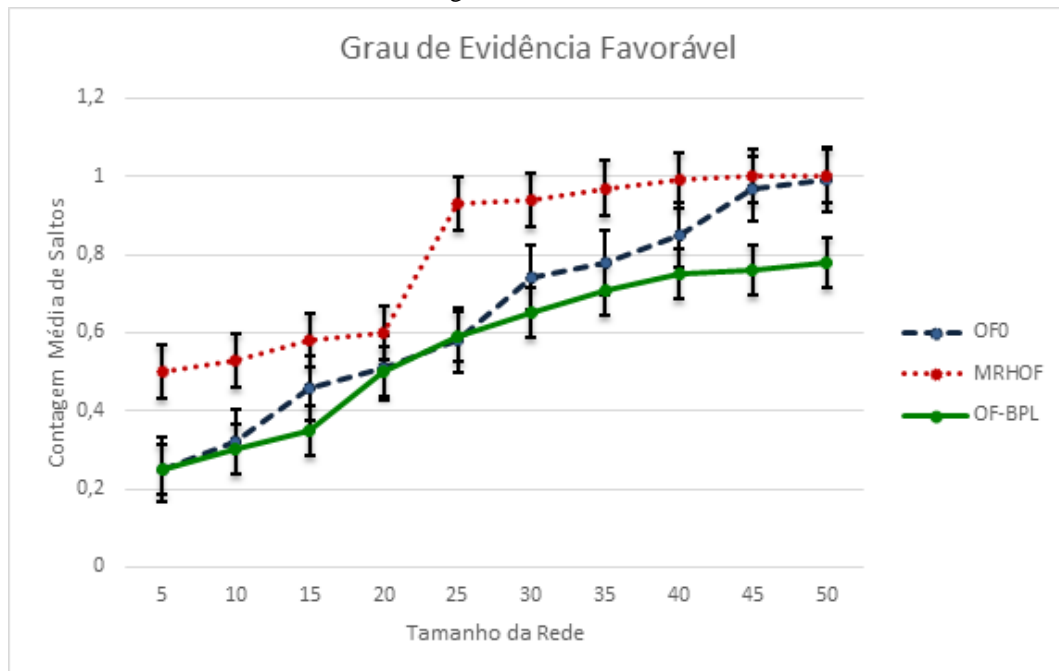
Como vimos na Figura 22 e 23, os reticulados das métricas nível de energia residual e qualidade do *link* na análise global de OF-BPL apresentam um resultado verdadeiro para o melhor desempenho da IoT. Sendo assim, possuem graus de evidências favoráveis altas.

No entanto, a Figura 21 mostra o reticulado da métrica da contagem média de saltos, cujo resultado vai de quase-falso, tendendo a paracompletar e inconsistente, passando pelo quase-verdadeiro, tendendo a para completar e inconsistente e chegando a verdadeiro, com grau de evidência favorável fraca. Porém, quando relacionada com as outras duas métricas em comparação com as funções objetivo default, OF0 e MRHOF, os resultados obtidos pela OF-BPL desenvolvida foram similares aos resultados analíticos e de simulação apresentados por Gaddour et al. (2014).

### 4.1 Contagem média de saltos

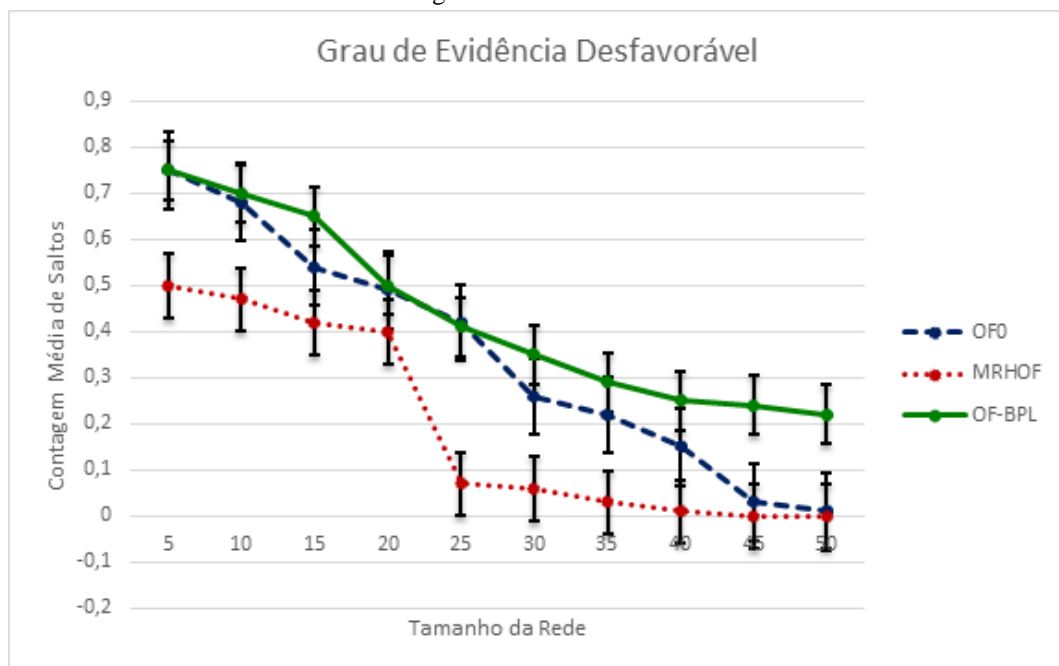
A comparação da média de contagem de saltos da OFBPL, MRHOF com ETX e OF0, como exibimos na Figura 24 e 25 mostra que as três redes são quase idênticas no caso de uma rede pequena, composta de menos de 50 nós. Isso pode ser justificado pelo número relativamente limitado de vizinhos, que torna a escolha de um outro pai muito restrita. No entanto, é distintamente permitida uma contagem média de saltos na OF-BPL com grau de evidência favorável baixa, como em comparação com MRHOF com ETX, no caso de redes densas compostas por mais de 50 roteadores RPL. Obviamente a contagem média de saltos em OF-BPL torna-se mais próxima da OF0 sob uma alta densidade de nó. Isso confirma o grau de evidência favorável de OF-BPL para minimizar o número de saltos dentro do DAG.

Figura 24 – Gráfico de comparação entre OF0, MRHOF com ETX e OFBPL no termo da contagem média de saltos com grau de evidência favorável



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 25 – Gráfico de comparação entre OF0, MRHOF com ETX e OFBPL no termo da contagem média de saltos com grau de evidência desfavorável



Fonte: Elaborada pelo autor.

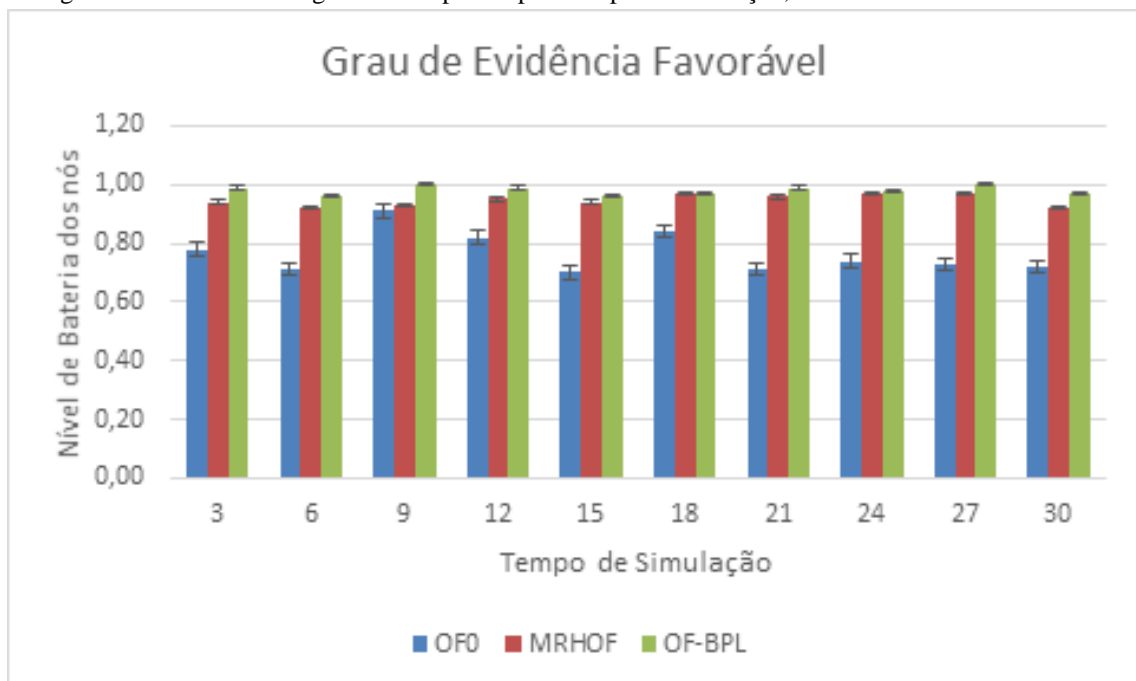
## 4.2 Tempo de vida da rede (consumo de energia)

Nesse cenário, consideramos um DAG composto por uma raiz DAG e 50 roteadores RPL. Por meio dos dados gerados nas simulações, observamos que o efeito da função objetivo

sobre o consumo médio de energia é menos importante. Por essa razão, temos observado a energia restante de todos os nós da rede, para comparar com o tempo de vida dos roteadores RPL na rede LLN. Executamos essas simulações por quatro vezes consecutivas.

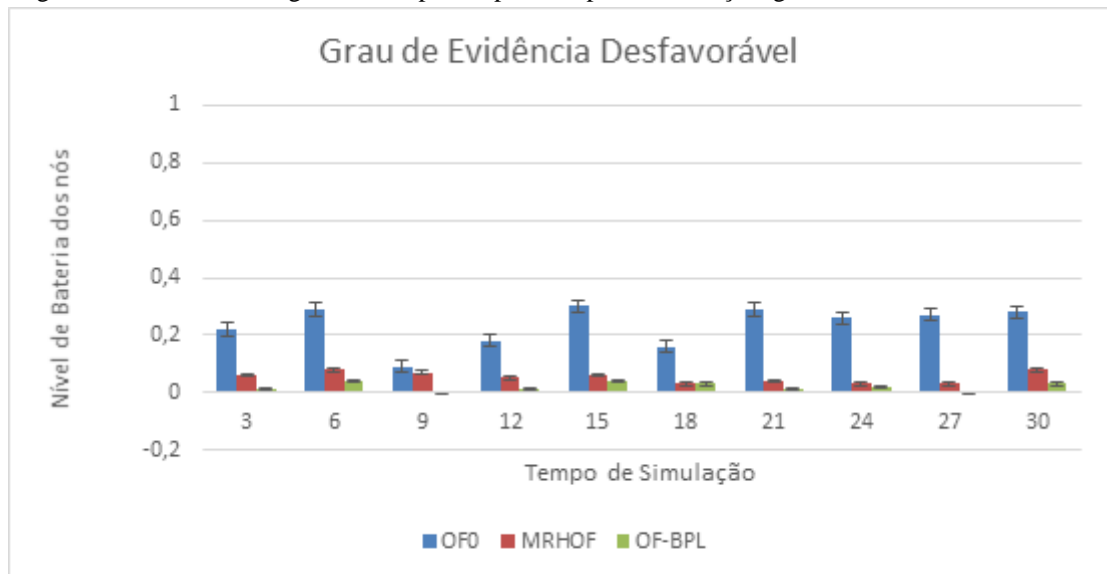
Nas funções objetivo observadas, com OF0 e MRHOF com ETX, nas quais a distribuição de energia restante não é equilibrada, notamos, por exemplo, que, para OF0, a simulação com duração de 30 minuto (Figuras 26 e 27) tem uma média de 23% dos nós, com uma energia restante com grau de evidência desfavorável e 77% dos nós têm uma energia residual grau de evidência favorável. Já na MRHOF, o resultado da simulação foi registrado com uma média de 5% dos nós, com uma energia restante com grau de evidência desfavorável e 95% dos nós têm uma energia residual grau de evidência favorável. Esse resultado terá um impacto sobre a sobrevivência da rede, como alguns nós irá sofrer um esgotamento precoce da bateria completamente. Os resultados dos dados das comparações das métricas das OFs também demonstram que, no caso de OF-BPL, a experiência dos nós tem uma energia remanescente com o grau de evidência favorável em 98%, contra o grau de evidência desfavorável com 2%, propriedade importante para a vida útil da rede. É claro, também, que, nos casos de OF0 e nos regimes MRHOF baseados em ETX, houve nós com menos potência, quando comparados com aqueles na rede baseada em OF-BPL. Assim, estimamos que OF-BPL atrasará o esgotamento da bateria dos primeiros nós.

Figura 26 – Gráficos energia residual por nó pelo tempo de simulação, Grau de Evidência Favorável



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 27 – Gráficos energia residual por nó pelo tempo de simulação, grau de evidência desfavorável

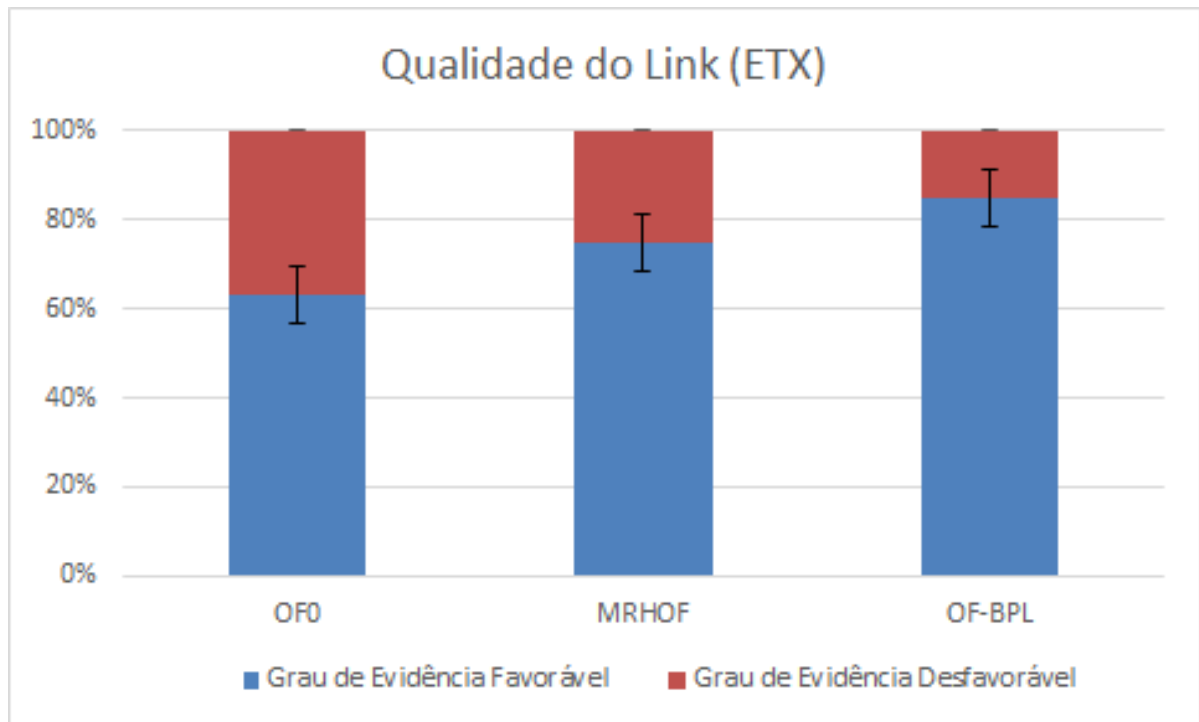


Fonte: Elaborada pelo autor.

### 4.3 Qualidade do *Link* (ETX)

Há elevada troca de pacotes na rede com padrão OF0, apesar de ele não promover conexões de alta qualidade e apresentar grau de evidência favorável de 63% e grau de evidência desfavorável de 37%. Portanto, ao escolher um novo pai preferido com a classificação mínima sem fazer nenhuma análise, esse pai pode estar congestionado e, assim, cair a taxa de transferência de pacotes de dados. Já uma rede com MRHOF baseada em ETX tem uma proporção da qualidade do *link* comparável ao OF-BPL devido ao uso do mesmo estimador, que é ETX, com grau de evidência favorável de MRHOF de 75% e grau de evidência desfavorável de 25%. O ETX selecionará o próximo salto, minimizando o direcionamento de um caminho que apresente melhor qualidade, por exemplo, taxa baixa de perda de pacotes, nível de energia alto e menos número de saltos até o nó raiz. Esses resultados levantam a pergunta sobre a eficácia da ETX e sua real necessidade para promover a confiabilidade em sua qualidade de conexão. Seria melhor utilizar outras ferramentas para essa métrica? Quando as taxas de transmissão do sensor tornam-se maiores, a taxa de perda de pacotes aumenta. Esse resultado deve-se principalmente ao congestionamento da rede e aos pacotes de colisão. Notamos também que o desempenho do OF-BPL se torna melhor do que com MRHOF baseado em ETX, como exibe a Figura 28, pois permite uma queda menor no número de pacotes de dados perdidos. Assim, OF-BPL supera o MRHOF com ETX, quando a quantidade de pacotes de dados é elevada, sendo o grau de evidência favorável muito superior a de outras duas funções objetivo, de 85% e o grau de evidência desfavorável de 15%, o que demonstra a eficácia da OF-BPL no alto rendimento.

Figura 28 – Gráficos exibe nível de qualidade do *link* das funções objetivo e seus graus de evidência favorável e desfavorável



Fonte: Elaborada pelo autor.

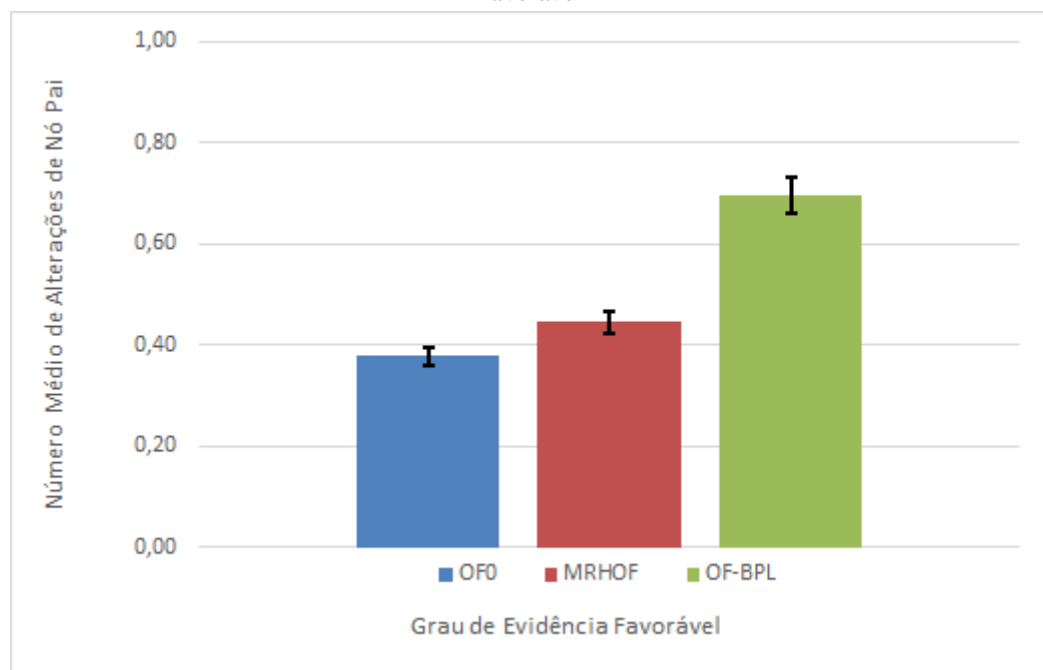
#### 4.4 Número de médio de alterações de pais

Visando registrar a estabilidade da rede, o número médio de alterações de pais de OF-BPL foi medido e comparado a de OF0 e MRHOF com métrica ETX. As figuras abaixo representam o número de alterações de pais nas três funções objetivo. A primeira observação é que as redes baseadas em RPL, com OF0 e MRHOF com ETX, alcançaram um grau de evidência favorável (Figura 29) no número médio de 0,38 e 0,45 e um grau de evidência desfavorável (Figura 30) no número médio de 0,62 e 0,55, respectivamente, para cada nó a cada hora, o que é considerado baixo. Esse resultado é esperado para essas OFs, pois tem objetivo de minimizar a posição (*rank*), sem considerar qualquer otimização no processo de seleção de outros pais.

Notamos também que a rede com base em OF-BPL alcançou um número ligeiramente maior de mudanças pais por nó por hora, que obteve um grau de evidência favorável (Figura 29) igual a 0,70 e um grau de evidência desfavorável (Figura 30) de 0,30. Esse número, relativamente, elevado de mudanças de pais é um indicador de instabilidade na topologia, mesmo sendo aleatório. Dessa forma, conseguiremos as vantagens, para melhorar a qualidade das rotas e o desempenho da IoT.

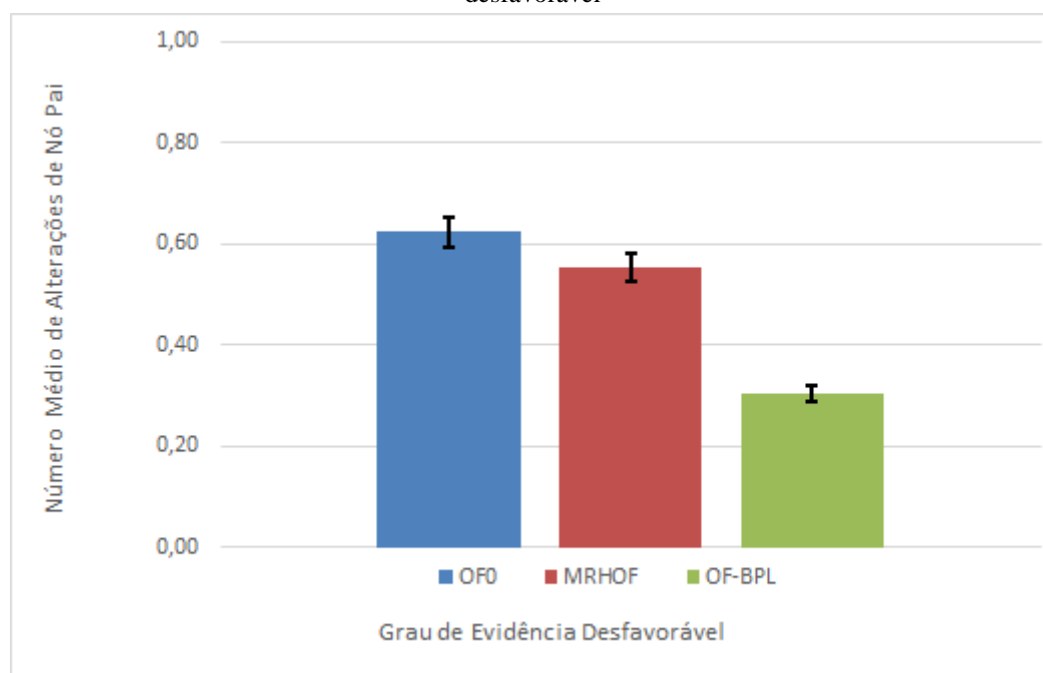


Figura 29 – Gráfico com o índice de alteração de nós (pai) com a melhor qualidade da rede, grau de evidência favorável



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 30 – Gráfico com o índice de alteração de nós (pai) com a pior qualidade da rede, grau de evidência desfavorável



Fonte: Elaborada pelo autor.

## 5 CONCLUSÃO

Esse trabalho apresenta Função Objetivo de RPL baseada na Lógica  $E\tau$ , uma nova função objetivo para Redes com Perdas e Baixo Consumo de Energias baseados em RPL. Em comparação com as funções objetivo existentes nas configurações padrões do Simulador Cooja do Sistema Operacional Contiki, que dependem apenas de uma ou duas métricas e, portanto, não consideram os requisitos de aplicações no processo da otimização do caminho de rotas em uma LLN entre o nó inicial da mensagem até o nó de destino que será o nó sorvedouro. Já na função objetiva proposta, OF-BPL, aborda-se uma combinação de três métricas de ligação (contagem de saltos, qualidade do ligação em ETX e nível de bateria) usando Lógica  $E\tau$ , provando que essa técnica é uma estratégia adequada para combinar diferentes métricas e atributos heterogêneos no processo de roteamento RPL. O melhor pai é especificado como um conjunto de métricas, que são combinadas com as suas grandezas de proporcionalidade. A avaliação dos dados das métricas das funções objetivo obtidas nas simulações e gerando a OF-BPL auxiliadas pelo para-analizador da lógica  $E\tau$  retorna à composição do nó vizinho com as métricas de resultado de quais nós vizinhos apresentam boas qualidades para o roteamento RPL. Nesse caso, o nó vizinho com a maior qualidade será selecionado como o nó pai preferido. OF-BPL foi implementado com apenas pequenos complementos, assegurando a compatibilidade com o padrão especificado no roteamento RPL. Assim, nossa função objetiva tem a intenção de solucionar e suportar múltiplas aplicações de IoT com base no protocolo de roteamento RPL, com requisitos antagônicos simultaneamente.

## 6 RECOMENDAÇÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Para um trabalho futuro, propomos a utilização do tratamento de incertezas e contradições pela Lógica  $E\tau$  (ABE, 2015), auxiliando na fusão de duas ou mais métricas em uma só função objetivo e posterior simulação e obtenção de resultados. Por exemplo, a métrica ETX, juntamente com a métrica RSSI, é importante, quando se trata de avaliar as condições e qualidade dos *links* (FERRO et al., 2012). Com essa fusão, podemos ajudar a diminuir a latência ponto-a-ponto e o tempo de convergência, ao mesmo tempo que, com um número aceitável de pacotes de sonda partilhados. Por um lado, o ETX seleciona as ligações mais fiáveis em termos de débito binário, por outro, o RSSI ajuda a escolher, de um conjunto de ligações fiáveis, aquela que apresenta melhor qualidade do sinal.

Outro estudo importante relacionado ao protocolo RPL é seu comportamento em face a cenários de mobilidade elevada, isto é, onde os nós estão em movimento, com trajetos aleatórios ou constantes. Muitas aplicações requerem que os nós não estejam fixos em um só local, mas movam-se livremente. A mobilidade é uma característica que provoca profundas dinâmicas e alterações no estado dos nós e das ligações entre eles. Portanto, é importante verificar quais são as métricas mais eficazes nesse tipo de cenários e associá-las à Lógica  $E\tau$ , em busca da melhoria nas decisões de comunicação, estratégias de manutenção e resolução de problemas de encaminhamento para uma melhor adaptação as RSSF móveis.

Outra proposta interessante seria de implementar Sistema de Controle, fazendo tratamento de inconsistências nas métricas analisadas nessa dissertação sobre o protocolo RPL, embasando-as na Lógica Paraconsistente e na Lógica Fuzzy. Portanto, essa análise paraconsistente pode ser feita nos dados das métricas aplicadas nas entradas do Sistema, utilizando os conceitos da Lógica Paraconsistente Anotada Evidencial  $E\tau$ . Os dados resultantes da análise da Lógica  $E\tau$  são definidos como; Grau de Certeza (Gce) e Grau de Incerteza (Gin). Recebem um tratamento conforme a teoria das Lógicas Fuzzy, resultando em uma métrica única própria para controlar e otimizar as métricas utilizadas em novas simulações do protocolo de roteamento RPL em Cooja no Sistema Operacional Contiki. O resultado dessa análise Paraconsistente-Fuzzy permitirá identificar os pontos onde ocorrem situações consideradas de inconsistência, verdade, falsidade, indeterminação e as tratadas usualmente com as lógicas Fuzzy (DA SILVA FILHO, 2010), permitindo ao simulador Cooja monitorar e agir, principalmente, no sentido de aumentar o tempo de vida útil das LLNs por meio das contradições.

## REFERÊNCIAS

- ABE, J. M. et al. **Lógica paraconsistente anotada evidencial Et.** Comunnicar, Santos, p. 38-39, 2011
- ABE, Jair Minoro. **Paraconsistent Intelligent Based-Systems.** Springer, Heidelberg, 2015.
- AKKAYA, K.; YOUNIS, M. A survey on routing protocols for wireless sensor networks. *Ad hoc networks*, **Elsevier**, v. 3, n. 3, p. 325–349, 2005.
- AKYILDIZ, I. F. et al. Wireless sensor networks: a survey. *Computer networks*, **Elsevier**, v. 38, n. 4, p. 393–422, 2002.
- AKYILDIZ, Ian F. et al. Wireless sensor networks: a survey. **Computer networks**, v. 38, n. 4, p. 393-422, 2002.
- AL-FUQAHA, Ala et al. Internet of things: A survey on enabling technologies, protocols, and applications. **IEEE Communications Surveys & Tutorials**, v. 17, n. 4, p. 2347-2376, 2015.
- ALI, Hazrat. **A Performance Evaluation of RPL in Contiki.** Tese de Doutorado. MS thesis, Blekinge Institute of Technology, 2012.
- ALSHAWI, Imad S. et al. Lifetime enhancement in wireless sensor networks using fuzzy approach and A-star algorithm. **IEEE Sensors journal**, v. 12, n. 10, p. 3010-3018, 2012.
- ASHTON, Kevin. That ‘Internet of things’ thing. **RFID Journal**, v. 22, n. 7, p. 97-114, 2009.
- ATZORI, Luigi; IERA, Antonio; MORABITO, Giacomo. The Internet of things: **A survey.** **Computer networks**, v. 54, n. 15, p. 2787-2805, 2010.
- BACCOUR, Nouha et al. **A comparative simulation study of link quality estimators in wireless sensor networks.** In: 2009 IEEE International Symposium on Modeling, Analysis & Simulation of Computer and Telecommunication Systems. IEEE, 2009. p. 1-10.
- BACCOUR, Nouha et al. **F-lqe: A fuzzy link quality estimator for wireless sensor networks.** In: European Conference on Wireless Sensor Networks. Springer Berlin Heidelberg, p. 240-255, 2010.
- BACCOUR, Nouha et al. **Radio link quality estimation in wireless sensor networks: a survey.** *ACM Transactions on Sensor Networks (TOSN)*, v. 8, n. 4, p. 34, 2012.
- BAGUETE. **SC desponta como polo de Indústria 4.0.** Disponível em <<http://www.baguete.com.br/noticias/19/12/2016/sc-desponta-como-polo-de-industria-4-0>> . Acesso em: 5 janeiro 2017.
- BIGMAN. **70% dos prestadores de serviços de TI ainda não sabem como capitalizar a Internet das Coisas.** Disponível em <<http://www.bitmag.com.br/2014/12/70-dos-prestadores-de-servicos-de-ti-ainda-nao-sabem-como-capitalizar-internet-das-coisas/>>. Acesso em: 16 novembro 2016.

BITENCOURT, Hugo Vinícius. **Implementação de um Estimador de Consumo e Energia Disponível para Simuladores de RSSF**. 132 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Instituto de Ciências Exatas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013.

BRADEN, Robert. **Requirements for Internet hosts-communication layers**. 1989.

CANSADO, Jacinto Carlos Ascencio. **Instrumentalização de redes de sensores sem fio**. 2011. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

CHANG, Kuor-Hsin; MASON, Bob. **The IEEE 802.15. 4g standard for smart metering utility networks**. In: Smart Grid Communications (SmartGridComm), 2012 IEEE Third International Conference on. IEEE, p. 476-480, 2012.

CHAOUCHI, Hakima (Ed.). **The Internet of things: connecting objects**. John Wiley & Sons, 2013.

CHAQFEH, Moumena A.; MOHAMED, Nader. **Challenges in middleware solutions for the internet of things**. In: Collaboration Technologies and Systems (CTS), 2012 International Conference on. IEEE, p. 21-26, 2012.

CHEN, Zhikui et al. A context-aware routing protocol on Internet of things based on sea computing model. **Journal of Computers**, v. 7, n. 1, p. 96-105, 2012.

CONTIKI: **The Open Source OS for the Internet of Things**. Disponível em: <<http://www.contiki-os.org/index.html>>. Acesso em: 21 novembro 2016.

CORDERO, J. et al. **Enabling multihop communication in spontaneous wireless networks**. ACM SIGCOMM eBook on" Recent Advances in Networking, v. 1, p. 413-457, 2013.

CORDERO, J. et al. **Enabling multihop communication in spontaneous wireless networks**. ACM SIGCOMM eBook on" Recent Advances in Networking, v. 1, p. 413-457, 2013.

DA SILVA FILHO, J.I., G.L. TORRES & J.M. ABE, **Uncertainty Treatment Using Paraconsistent Logic - Introducing Paraconsistent Artificial Neural Networks**, IOS Press, Holanda, Vol. 211, ISBN 978-1-60750-557-0, doi: 10.3233/978-1-60750-558-7-I, 328pp., 2010.

DARGIE, Waltenegus; POELLABAUER, Christian. **Fundamentals of wireless sensor networks: theory and practice**. John Wiley & Sons, 2010.

DAVIES, R. Industry 4.0. **Digitalisation for productivity and growth**. European Parliamentary Research Service, Briefing, 2015.

DWIVEDI, Anuj Kumar et al. An exploratory study of experimental tools for wireless sensor networks. **Wireless Sensor Network**, v. 3, n. 07, p. 215, 2011.

ELIPSESOFTWARE SQUARESPACE. **Soluções para automação de Data Centers.** Disponível em <<https://elipsesoftware.squarespace.com/?offset=1409075609413>> . Acesso em: 5 janeiro 2017.

EVANS, Dave. **The Internet of things: How the next evolution of the Internet is changing everything.** CISCO white paper, v. 1, p. 14, 2011.

FALL, Kevin R.; STEVENS, W. Richard. **TCP/IP illustrated, volume 1: The protocols.** addison-Wesley, 2011.

FERRO, João M.; VELEZ, Fernando J. **Combined Hop Count and Received Signal Strength Routing Protocol for Mobility-Enabled WSNs.** In: Vehicular Technology Conference (VTC Fall), 2012 IEEE. IEEE, 2012. p. 1-6.

GADDOUR, Olfa et al. **OF-FL: QoS-aware fuzzy logic objective function for the RPL routing protocol.** In: **Modeling and Optimization in Mobile, Ad Hoc, and Wireless Networks (WiOpt)**, 2014 12th International Symposium on. IEEE, 2014. p. 365-372.

GNAWALI, Omprakash. **The minimum rank with hysteresis objective function.** 2012.

GNAWALI, Omprakash; LEVIS, P. **The ETX objective function for RPL.** 2010.

GOUVEIA, Paulo Renato Neves Torres. **Convergência de redes sem fios para comunicações M2M e Internet das coisas em ambientes inteligentes.** 2013.

GOUVEIA, Paulo Renato Neves Torres. **Convergência de redes sem fios para comunicações M2M e internet das coisas em ambientes inteligentes.** 2013. Tese de Doutorado. Universidade da Beira Interior.

GUBBI, J. et al. Internet of things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions. *Future Generation Computer Systems*, Elsevier, v. 29, n. 7, p. 1645–1660, 2013.

HERBERG, Ulrich et al. **Observations of RPL: IPv6 Routing Protocol for Low power and Lossy Networks.** 2014.

HINRICHSSEN, Sven; JASPERNEITE, Jürgen. **Industrie 4.0—Begriff, Stand der Umsetzung und kritische Würdigung.** *Betriebspraxis & Arbeitsforschung*, v. 216, 2013.

IPv6.br. **ZigBee usa agora 6LoWPAN! Sua próxima lâmpada terá IPv6?** Disponível em <<http://ipv6.br/post/zigbee-usa-agora-6lowpan-sua-proxima-lampada-tera-ipv6/>>. Acesso em: 16 novembro 2016.

JAVAID, Nadeem et al. **Performance study of ETX based wireless routing metrics.** In: *Computer, Control and Communication*, 2009. IC4 2009. 2nd International Conference on. IEEE, 2009. p. 1-7.

KARL, H.; WILLIG, A. **Architectures and Protocols for Wireless Sensor Networks.** Chichester, 2005.

KEJIAN, Y. H. J. F. Z. Military application analysis of iot. **Command Information System and Technology**, v. 5, p. 005, 2011

KHAN, Rafiullah et al. **Future Internet: the Internet of things architecture, possible applications and key challenges**. In: Frontiers of Information Technology (FIT), 2012 10th International Conference on. IEEE, p. 257-260, 2012.

KULKARNI, Raghavendra V.; FORSTER, Anna; VENAYAGAMOORTHY, Ganesh Kumar. Computational intelligence in wireless sensor networks: A survey. **IEEE communications surveys & tutorials**, v. 13, n. 1, p. 68-96, 2011.

LEE, Jay; BAGHERI, Behrad; KAO, Hung-An. **Recent advances and trends of cyber-physical systems and big data analytics in industrial informatics**. In: International Proceeding of Int Conference on Industrial Informatics (INDIN), p. 1-6, 2014.

LEVIS, Philip et al. **The trickle algorithm**. 2011.

LIU, Nan; SEAH, Winston KG. **Performance evaluation of routing metrics for community Wireless Mesh Networks**. In: Intelligent Sensors, Sensor Networks and Information Processing (ISSNIP), 2011 Seventh International Conference on. IEEE, 2011. p. 556-561.

MACHADO, Kássio et al. A routing protocol based on energy and link quality for Internet of things applications. **Sensors**, v. 13, n. 2, p. 1942-1964, 2013.

MARTOCCI, Jerry et al. **Building automation routing requirements in low power and lossy networks**. 2010.

MCEWEN, Adrian; CASSIMALLY, Hakim. **Designing the Internet of things**. John Wiley & Sons, 2013.

NARTEN, Thomas et al. **Neighbor discovery for IP version 6 (IPv6)**. 2007.

ÖSTERLIND, F.; DUNKELS, A.; ERIKSSON, J.; FINNE, N.; VOIGT, T. **Cross-Level Sensor Network Simulation with COOJA**. In: 31st Annual IEEE Conference on Local Computer Networks, LCN '06, 2006.

PALATTELLA, Maria Rita et al. Standardized protocol stack for the Internet of (important) things. **IEEE Communications Surveys & Tutorials**, v. 15, n. 3, p. 1389-1406, 2013.

PIMENTA JR, Avelino Palma; ABE, Jair Minoru; DE OLIVEIRA, Cristina Corrêa. **An Analyzer of Computer Network Logs Based on Paraconsistent Logic**. In: IFIP International Conference on Advances in Production Management Systems. Springer International Publishing, p. 620-627, 2015.

PISTER, Kris et al. **Industrial routing requirements in low-power and lossy networks**. 2009.

POTTIE, Gregory J. **Wireless sensor networks**. In: Information Theory Workshop, 1998. IEEE, 1998. p. 139-140.

POTTIE, Gregory J.; KAISER, William J. Wireless integrated network sensors. **Communications of the ACM**, v. 43, n. 5, p. 51-58, 2000.

PRESS, Gil. Internet of Things by the numbers: Market estimates and forecasts. **Forbes**, Forbes Media, Jersey City, NJ, 2014.

PRO.TECMUNDO.COM.BR. **45% dos americanos planejam investir em Smart Homes em 2016**. Disponível em <<https://pro.tecmundo.com.br/casas/92352-45-americanos-planejam-investir-smart-homes-em-2016.htm>>. Acesso em: 7 janeiro 2017.

RADOI, Ion Emilian. **Performance Evaluation of Routing Protocols in Lossy Links for Smart Building Networks**. 2011. 83 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Computer Science, Departamento de School Of Informatics, University Of Edinburgh, Edinburgh, 2011.

RAMOS, Heitor S. et al. **Topology-related metrics and applications for the design and operation of wireless sensor networks**. ACM Transactions on Sensor Networks (TOSN), v. 10, n. 3, p. 53, 2014.

RUCKEBUSCH, Peter et al. An evaluation of link estimation algorithms for RPL in dynamic wireless sensor networks. In: Internet of Things. IoT Infrastructures: Second International Summit, IoT 360° 2015, Rome, Italy, October 27-29, 2015, Revised Selected Papers, Part II. **Springer International Publishing**, p. 349-361, 2016.

SANTOS, Ivairton Monteiro. **Protocolo de roteamento de dados para redes de sensores sem fio com nó coletor móvel para controle da deriva em pulverização agrícola**. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, 2013.

SHELBY, Z.; CHAKRABARTI, S.; NORDMARK, E. **Neighbor discovery optimization for low power and lossy networks (6LoWPAN)**. Work in progress, IETF draft-ietf-6lowpan-nd-18, 2011.

SOBRAL, Jose et al. A Framework for Improving the Performance of IoT Applications. In: **Proceedings of the International Conference on Wireless Networks (ICWN)**. The Steering Committee of The World Congress in Computer Science, Computer Engineering and Applied Computing (WorldComp), p. 134, 2015.

STANKOVIC, John A. **When sensor and actuator networks cover the world**. ETRI journal, v. 30, n. 5, p. 627-633, 2008.

STANKOVIC, John A. Wireless sensor networks. **Computer**, v. 41, n. 10, 2008.

THUBERT, P. et al. **RPL: IPv6 routing protocol for low power and lossy networks**. RFC 6550, 2012.

THUBERT, Pascal. **Objective function zero for the routing protocol for low-power and lossy networks (RPL)**. 2012.



TRIPATHI, J.; DE OLIVEIRA, J.; VASSEUR, J. P. **Performance evaluation of the routing protocol for low-power and lossy networks (RPL)**. 2012.

TSVETKOV, Tsvetko; KLEIN, Alexander. RPL: IPv6 routing protocol for low power and lossy networks. **Network**, v. 59, 2011.

TSVETKOV, Tsvetko; KLEIN, Alexander. RPL: IPv6 routing protocol for low power and lossy networks. **Network**, v. 59, 2011.

TUBAISHAT, Malik; MADRIA, Sanjay. Sensor networks: an overview. **IEEE potentials**, v. 22, n. 2, p. 20-23, 2003.

VASSEUR, J. et al. **RPL: The IP routing protocol designed for low power and lossy networks**. Internet Protocol for Smart Objects (IPSO) Alliance, v. 36, 2011.

VASSEUR, Jean-Philippe et al. **Routing metrics used for path calculation in low-power and lossy networks**. 2012.

VIEIRA, Marcos Augusto M. et al. **Survey on wireless sensor network devices**. In: Emerging Technologies and Factory Automation, 2003. Proceedings. ETFA'03. IEEE Conference. IEEE, 2003. p. 537-544.

VOIGT, Thiemo. **Contiki COOJA Hands-on Crash Course: Session Notes**. 2009. Disponível em: <<https://www.sics.se/~thiemo/seniot09cccc-notes.pdf>>. Acesso em: 13 ago. 2014.

WANG, Feng et al. A survey from the perspective of evolutionary process in the Internet of things. **International Journal of Distributed Sensor Networks**, v. 11, n. 3, p. 462752, 2015.

WINTER, T. et al. Networks, D. Struik, R., and J. Vasseur. **RPL: IPv6 Routing Protocol for Low power and Lossy Networks**, draft-ietf-roll-rpl-13 (work in progress), 2010.

WINTER, Tim. **RPL: IPv6 routing protocol for low-power and lossy networks**. 2012.

WOOD, A.; STANKOVIC, J. A. Denial of service in sensor networks. Computer, **IEEE**, v. 35, n. 10, p. 54–62, 2002

ZANELLA, Andrea et al. Internet of things for smart cities. **IEEE Internet of Things Journal**, v. 1, n. 1, p. 22-32, 2014.

## **APENDICE**

### **APENDICE 1 – An Analysis of the Metrics of RPL routing protocol for Internet of Things Based on Paraconsistent Logic**

# An Analysis of the Metrics of RPL routing protocol for Internet of Things Based on Paraconsistent Logic

Alysson R. F. Santos<sup>1</sup>, Jair M. Abe<sup>1,2</sup>, Marcello A. M. Buonafina<sup>1</sup>, Antônio A. Junior<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Graduate Program in Production Engineering, ICET - Paulista University  
R. Dr. Bacelar, 1212, CEP 04026-002 São Paulo – SP – Brazil

<sup>2</sup> Institute For Advanced Studies – University of São Paulo, Brazil

<sup>3</sup> Graduate Program in Computer Science, Federal University of Piauí, Piauí, Brazil Campus  
Universitário Ministro Petrônio Portella CEP 64049-550  
{alyssonramirez@gmail.com, jairabe@uol.com.br, tenenteanderson@ig.com.br,  
junioraraujo03@gmail.com}

**Abstract.** In this paper, we applied the Paraconsistent Annotated Evidential Logic  $E\tau$  (Logic  $E\tau$ ) in the Internet of Things (IoT). Our proposal is focused on the Routing Protocol for Low-power and Lossy Networks (RPL), which was designed for Low-power and Lossy Networks (LLNs), developed and standardized by the ROLL Working Group in the Internet Engineering Task Force (IETF) since March 2012, RFC 6550. The RPL has two default objective functions, OF0 and MRHOF, which will have two metrics analyzed in order to obtain the data and then processed in the parser algorithm based on the  $E\tau$  logic. Thus, two metrics based on Logic  $E\tau$ , Power-BPL and Hop-BPL will be generated, which will be compared to the OF0 and MRHOF metrics. Power-BPL and Hop-BPL show results that can achieve remarkable performance in LLNs compared to existing objective functions and satisfy the quality of different service applications and the extended service life of IoT.

**Keywords:** paraconsistent logic, IoT, RPL, Cooja, Contiki.

## 1 Introduction

The Artificial Neural Network has been extensively studied in AI so it has interesting applications. Today a great deal of effort is focussed on the development of neural networks for applications such as pattern recognition and classification, data compression and optimisation. For instance, it has turned out to be an effective tool for pattern recognition. Several theories of artificial neural networks have been proposed with different characteristics. In this paper we discuss a new theory of artificial neural network based on a paraconsistent annotated logic  $E\tau$ .

The atomic formulas of the paraconsistent annotated logic  $E\tau$  is of the type  $p_{(\mu, \lambda)}$ , where  $(\mu, \lambda) \in [0, 1]^2$  and  $[0, 1]$  is the real unitary interval ( $p$  denotes a propositional variable). An order relation is defined on  $[0, 1]^2$ :  $(\mu_1, \lambda_1) \leq (\mu_2, \lambda_2) \Leftrightarrow \mu_1 \leq \mu_2$  and  $\lambda_2 \leq \lambda_1$ , constituting a lattice that will be symbolized by  $\tau$ . A detailed account of annotated logics is to be found in [1][2][3].

$p(\mu, \lambda)$  can be intuitively read: "It is assumed that  $p$ 's belief degree (or favorable evidence) is  $\mu$  and disbelief degree (or contrary evidence) is  $\lambda$ ." Thus, (1.0, 0.0) intuitively indicates total belief, (0.0, 1.0) indicates total disbelief, (1.0, 1.0) indicates total inconsistency, and (0.0, 0.0) indicates total paracompleteness (absence of information). The operator  $\sim : |\tau| \rightarrow |\tau|$  defined in the lattice  $\sim[(\mu, \lambda)] = (\lambda, \mu)$  works as the "meaning" of the logical negation of  $E\tau$ .

The consideration of the values of the belief degree and of disbelief degree is made, for example, by specialists who use heuristics knowledge, probability or statistics.

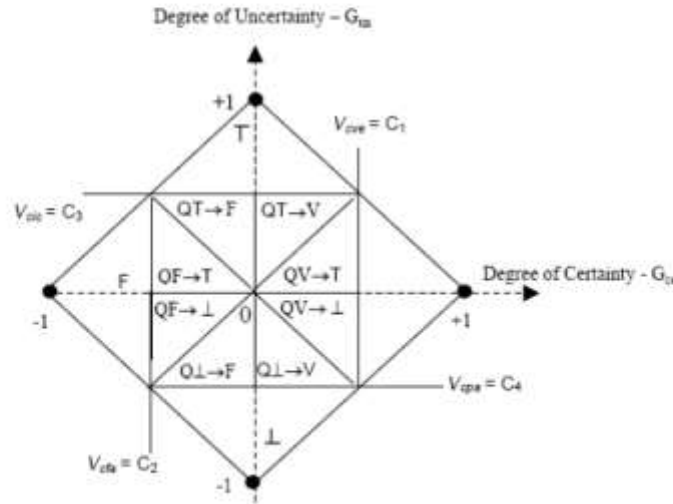
We can consider several important concepts (all considerations are taken with  $0 \leq \mu, \lambda \leq 1$ ):

Segment DB - segment perfectly defined:  $\mu + \lambda - 1 = 0$

Segment AC - segment perfectly undefined:  $\mu - \lambda = 0$

Uncertainty Degree:  $G_{un}(\mu, \lambda) = \mu + \lambda - 1$ ; Certainty Degree:  $G_{ce}(\mu, \lambda) = \mu - \lambda$ ;

With the uncertainty and certainty degrees we can get the following 12 regions of output: *extreme states* that are, False, True, Inconsistent and Paracomplete, and *non-extreme states*. All the states are represented in the lattice of the next figure: such lattice  $\tau$  can be represented by the usual Cartesian system.



**Fig. 1** - Representation of the certainty degrees and of contradiction degrees.

These states can be described with the values of the certainty degree and uncertainty degree by means of suitable equations. In this work we have chosen the resolution 12 (number of the regions considered according to the Figure 1), but the resolution is totally dependent on the precision of the analysis required in the output and it can be externally adapted according to the applications.

So, such limit values called Control Values are:

$V_{cic}$  = maximum value of uncertainty control =  $C_3$

$V_{cve}$  = maximum value of certainty control =  $C_1$

$V_{cpa}$  = minimum value of uncertainty control =  $C_4$

$V_{cfa}$  = minimum value of certainty control =  $C_2$

For the discussion in the present paper we have used:  $C_1 = C_3 = \frac{1}{2}$  and  $C_2 = C_4 = -\frac{1}{2}$ .

**Table 1.** Extreme and Non-extreme states.

Extreme States	Symbol	Non-extreme states	Symbol
True	V	Quasi-true tending to Inconsistent	$QV \rightarrow T$
False	F	Quasi-true tending to Paracomplete	$QV \rightarrow \perp$
Inconsistent	T	Quasi-false tending to Inconsistent	$QF \rightarrow T$
Paracomplete	$\perp$	Quasi-false tending to Paracomplete	$QF \rightarrow \perp$
		Quasi-inconsistent tending to True	$QT \rightarrow V$
		Quasi-inconsistent tending to False	$QT \rightarrow F$
		Quasi-paracomplete tending to True	$Q\perp \rightarrow V$
		Quasi-paracomplete tending to False	$Q\perp \rightarrow F$

## 2 RPL overview

RPL is a distance-vector and a source routing protocol that is designed to operate on top of several link layer mechanisms including IEEE 802.15.4 PHY and MAC layers [4][6][15]. It mainly targets collection-based networks, where nodes periodically send measurements to a collection point. A key feature of RPL is that it represents a specific routing solution for low power and lossy networks[15]. The protocol was designed to be highly adaptive to network conditions and to provide alternate routes, whenever default routes are inaccessible. RPL is based on the topological concept of Directed Acyclic Graphs (DAGs). The DAG defines a tree-like structure that specifies the default routes between nodes in the LLN. However, a DAG structure is more than a typical tree in the sense that a node might associate to multiple parent nodes in the DAG, in contrast to classical trees where only one parent is allowed. More specifically, RPL organizes nodes as Destination-Oriented DAGs (DODAGs), where most popular destination nodes (i.e. sinks) or those providing a default route to the Internet (i.e. gateways) act as the roots of the DAGs. In the construction process of the network topology, each router identifies a stable set of parents on a path towards the DODAG root, and associates itself to a preferred parent, which is selected based on the Objective Function. The Objective Function defines how RPL nodes translate one or more metrics into ranks, and how to select and optimize routes in a DODAG [15]. It is responsible for rank computation based on specific routing metrics (e.g. delay, link quality, connectivity, etc.) and specifying routing constraints and optimization objectives [5][6].

## 3 Methodology

In this work will be realized an experimental research, in which the standard objective functions will be investigated in the configuration of the Cooja [9], OF0 and MRHOF [12][14], that are used by the RPL routing protocol [4][15]. Will use the OF0 and MRHOF as scenarios, in which we will analyze two variables as metrics that are able to influence for a better route in a LLN that is part of the IoT [11][13], the metric



used will be: average number of jumps, energy level of the route. In this way, the metrics will be analyzed in the para-analyzer based on Et Logic, which will be compared with the objective functions default of the RPL routing protocol [4][15].

### 3.1 Establishing a good route

Each metric describes an important property of the neighbor node, helping to form a route to the sink node. We consider sensor node metrics that will be used to express whether the route to a particular neighbor is of good quality.

- Minimum distance: a route is chosen with the least number of jumps to reach the sink node, this route being the same that will have a minimum energy expenditure.
- Energy Efficiency: A route is efficiently energetic if you use nodes that have more energy than others, thus performing network load balancing.

### 3.2 Performance metrics used

The performance metrics discussed in this article are as follows:

- Average number of jumps: this metric refers to the number of jumps between the neighboring node (ie, the preferred parent candidate) and the root. However, the number of jumps depends mainly on the metric that is specified by the OF result.
- Route energy level: represents the lowest energy level between the nodes that make up the LLN routed by the RPL protocol [4][15]. If a route has a very low energy level, there is a great possibility that this route fails due to the energy depletion of one of the nodes. For this reason, OFs update this information whenever a DIO message is received [6].

### 3.3 Simulation scenario

For this implementation proposal, we used the Cooja simulator [9], which belongs to the environment of the Contiki Operating System [10]. It is characterized by being a java-based simulator and uses the C program language as the software design language in wireless sensor networks[12]. It will provide an appropriate method for defining the environmental needs of an IoT [11][13]. We chose Contiki as an open source, highly portable and multitasking operating system for systems with efficient memory embedded in wireless sensor networks [8]. In this way, it provides precision in its simulation in the behavior and implementation of a real LLN. It also allows users to quickly add functionality and customize specific simulations, as both interfaces and plug-ins can easily be added to Cooja [9].

The simulation scenario was constructed, to allow the evaluation of the proposed OFs. The topology of the scenario used consists of 49 sensor nodes and a sink node. There are, therefore, 50 devices in a random network topology, sufficient for the formation of multiple routes in each node of the network, in order to support the validation of the proposed approach in the scenarios with OF0 and MRHOF [12][14].

The total simulation time (30 minutes) allowed an observation of the behavior of the protocol. Using the objective functions evaluated, the simulations were repeated four times, resulting in the metrics that will be analyzed in the para-analyzer of the Et

logic. In this way the initial energy of the nodes was adjusted to 2000 joules for the maximum power, which corresponds to the maximum value of energy in this simulation to be used in the IoT devices [11][13].

### 3.3.1 Metrics data

In this section, we propose an analysis in the RPL routing protocol using the global objective functions combining the results of the metrics mentioned above with a logical approach Et.

Generating output results from objective functions based on Logic Et. In the proposal of this output metrics, we consider the metrics mentioned above: hop count and the remaining battery level for each node in the OF-BPL design. Each metric describes an important link or node property, as previously discussed.

The use of artificial intelligence techniques to support the decision-making process is, in fact, widely used in recent works research regarding lossy and low-power networks for wireless sensors (LLNs). Some techniques, such as artificial intelligence, reinforce the efficiency and performance of routing protocols by combining node data and their interactions, searching for a system capable of making decisions for an improvement in performance for wireless sensor network [8].

Our objective is to compare the abstention results in the para-analyzer by means of the metrics resulting from the OF0 and MRHOF [12][14]simulations with the results generated by the para-analyzer according to the requirements of the application in a more efficient output metric. Thus, we propose the use of Logic Et through its para-analyzer algorithm, which plays an important role in decision making. There are many advantages of logic Et [1][2][3]:

- Provides a rigorous algebra to deal with inaccurate in training;
- Can be implemented with low complexity algorithms.

From the Data Collect (Sensor Data Collect) of the Simulator Cooja of the Contiki OS [9][10], it was possible to extract the values of the metrics under analysis of the OF0 and of the MRHOF shown in Table 2:

#### 3.3.1.1 Input Metric Average number of jumps

The first metric to be analyzed is the average number of jumps performed by the node until it reaches the sink. The mean hop count is in the range of 0 to 4000, relative to OF0 in which zero represents proximity and 4000 away from the DAG root and belongs to the range 0 to 2000, in relation to MRHOF, being zero proximity and 2000 far.

#### 3.3.1.2 Remaining energy input metric

Finally, the battery level, which has been adjusted according to the requirements of the application to the value 2000, corresponding to the battery of the full sensor, the battery power varying when its value is 0, for the two objective functions as shown in



Table 4. For example, for applications with energy efficiency concerns, it can be argued that the battery level starts to be full at 70%. This will have an impact on the choice of the best neighbor node, in this case, giving priority to the neighbor node that has the highest remaining energy.

In both scenarios evaluated, the values of the metrics should be normalized based on the values of the results obtained from the simulations. These values should be used as degrees of evidence favorable to the energy level, as directly proportional magnitude. The opposite must be applied to the metric number of jumps, as an inverse proportional quantity. In this case, favorable proof must be defined as its negation. The evidence of favorable ( $\mu$ ) and unfavorable ( $\lambda$ ) for the selection of the neighboring node is taken from the normalized values of the metrics and are presented in Table 4:

### 3.4 Normalization

Once all metrics are established, the next step is normalization, which consists of producing a metric with output value, establishing the degree of belief and degree of disbelief to produce a single control action. In this case, the entire value of a metric has to be normalized in the universe ( $t$ ) to an actual value in the range of 0 to 1, before being compiled in the para-analyzer, which generates the QUCP lattice.

**Table 2** - Values of the metrics obtained from a simulation in Cooja of the OF0 and of the MRHOF. Normalized values and favorable ( $\mu$ ) and unfavorable evidence ( $\lambda$ ) of the best neighbor selection metrics.

METHOD OF ANALYSIS OF METRICS FOR DECISION MAKES IN THE RPL ROUTING PROTOCOL						
Scenarios	Normalization of Metrics		Para-analyzer database			
	Hops	Power	Hops		Power	
			$\mu$	$\lambda$	$\mu$	$\lambda$
OF0	1000	1596	0,25	0,25	0,58	0,70
	1500	1389	0,25	0,33	0,64	0,71
	1800	1732	0,50	0,44	0,65	0,71
	2000	1561	0,50	0,53	0,72	0,72
	2400	1374	0,50	0,65	0,73	0,73
	2900	1655	0,75	0,75	0,75	0,74
	3200	1213	0,75	0,78	0,82	0,78
	3500	1437	0,75	0,93	0,84	0,82
	3750	1238	1,00	0,96	0,87	0,84
	4000	1103	1,00	0,98	0,91	0,91
MRHOF	1000	1307	0,50	0,50	0,96	0,89
	1200	1295	0,60	0,53	0,96	0,96
	1456	1247	0,81	0,60	0,86	0,99
	1620	1332	0,73	0,58	0,90	0,90
	1780	1174	0,89	0,93	0,89	0,92
	1850	1259	0,93	0,94	0,99	0,97
	1900	1207	0,95	0,97	0,93	0,95
	1925	1326	0,96	0,99	1,00	1,00
	1985	1235	0,99	1,00	0,99	0,99
	2000	1311	1,00	1,00	0,98	0,96



After the parameterization of the metrics obtained through the simulations performed in Cooja, the following propositions will be analyzed: "What are the effects of the application of the Paraconsistent Evidential Logic  $E\tau$  on the data obtained from the metrics analyzed of the objective functions, OF0 and MRHOF [12][14], of the protocol of Routing RPL, will the metrics generated by the para-analyzer provide optimization of the performance of the Internet of Things compared to the metrics of OFs default? ". For this, the Para-analyzer will be applied with the value of the standard metrics OF0 (Table 3) and MRHOF (Table 4):

**Table 3** - Database formed by the metrics obtained in the Cooja simulations with the OF0.

RESULTS OF THE RESEARCH OF THE SIMULATIONS WITH THE OF0, APPLICATION OF THE METHOD AND RESULTS							
Simulation 1		Simulation 2		Simulation 3		Simulation 4	
Hops	Power	Hops	Power	Hops	Power	Hops	Power
0,50	0,86	0,50	0,97	0,50	0,99	0,50	0,94
0,50	0,89	0,60	0,96	0,50	0,92	0,53	0,92
0,50	0,93	0,73	0,92	0,50	0,95	0,58	0,93
0,50	0,96	0,81	0,99	0,50	0,89	0,60	0,95
0,95	0,98	0,89	0,87	0,95	0,96	0,93	0,94
0,95	0,99	0,93	0,93	0,95	0,97	0,94	0,97
0,98	0,99	0,95	0,89	0,98	0,99	0,97	0,96
1,00	0,96	0,96	0,98	1,00	0,96	0,99	0,97
1,00	1,00	0,99	0,91	1,00	1,00	1,00	0,97
1,00	0,90	1,00	0,97	1,00	0,90	1,00	0,92

**Table 4** - Database formed by the metrics obtained in the simulations of Cooja with the MRHOF

RESULTS OF THE RESEARCH OF THE SIMULATIONS WITH THE MRHOF, APPLICATION OF THE METHOD AND RESULTS							
Simulation 1		Simulation 2		Simulation 3		Simulation 4	
Hops	Power	Hops	Power	Hops	Power	Hops	Power
0,25	0,95	0,25	0,84	0,25	0,57	0,25	0,78
0,25	0,56	0,38	0,73	0,33	0,84	0,32	0,71
0,50	1,00	0,45	0,91	0,44	0,84	0,46	0,91
0,50	0,94	0,50	0,82	0,53	0,69	0,51	0,82
0,50	0,77	0,60	0,72	0,65	0,61	0,58	0,70
0,75	0,76	0,73	0,87	0,75	0,89	0,74	0,84
0,75	0,73	0,80	0,64	0,78	0,77	0,78	0,71
0,75	0,70	0,88	0,75	0,93	0,76	0,85	0,74
1,00	0,70	0,94	0,65	0,96	0,84	0,97	0,73
1,00	0,63	1,00	0,58	0,98	0,94	0,99	0,72

The analysis of the metrics was calculated considering the favorable evidences ( $\mu$ ) multiplied by their respective weights (having their differences according to the scenario, since they are different objective functions), and finally added. The same is done for the unfavorable evidence ( $\lambda$ ) [1][2][3]. In Tables 7 and 8 which are shown below, we can detail the results obtained for each metric based on the Et Logic, where Hop-BPL is the average number of jumps based on the Logic Et and the Power-BPL metric the residual energy metric Base on Logic Et.

**Table 7** - Results of the metric number of jumps analyzed by the para-analyzer

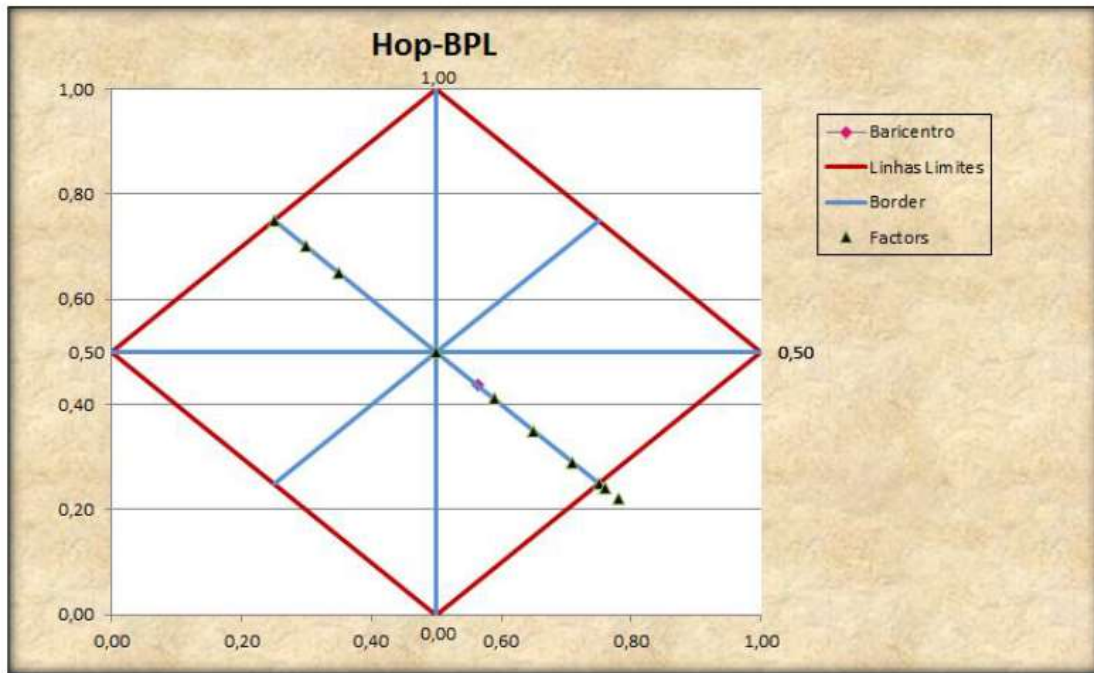
RESULTS OF THE SEARCH OF THE AVERAGE HOP COUNT, APPLICATION OF THE METHOD AND RESULTS								
A		B		A AND B		Level of Requirement >		0,500
E1 OR E2		E3 OR E4				Conclusions		
$\mu^1$	$\lambda^2$	$\mu^3$	$\lambda^4$	$\mu^5$	$\lambda^6$	Gce	Gunf	Decision
0,25	0,25	0,50	0,30	0,25	0,75	-0,50	0,00	
0,33	0,38	0,60	0,30	0,30	0,70	-0,40	0,00	
0,50	0,45	0,73	0,35	0,35	0,65	-0,30	0,00	
0,53	0,50	0,81	0,52	0,50	0,50	0,00	0,00	
0,65	0,60	0,89	0,59	0,59	0,41	0,18	0,00	
0,75	0,69	0,93	0,65	0,65	0,35	0,30	0,00	
0,78	0,80	0,95	0,71	0,71	0,29	0,42	0,00	
0,93	0,88	0,96	0,75	0,75	0,25	0,50	0,00	
1,00	0,94	0,99	0,76	0,76	0,24	0,52	0,00	
1,00	1,00	1,00	0,78	0,78	0,22	0,56	0,00	
	Baricentro			0,56	0,44	0,13	0,00	

**Table 8** - Residual energy result analyzed by the para-analyzer.

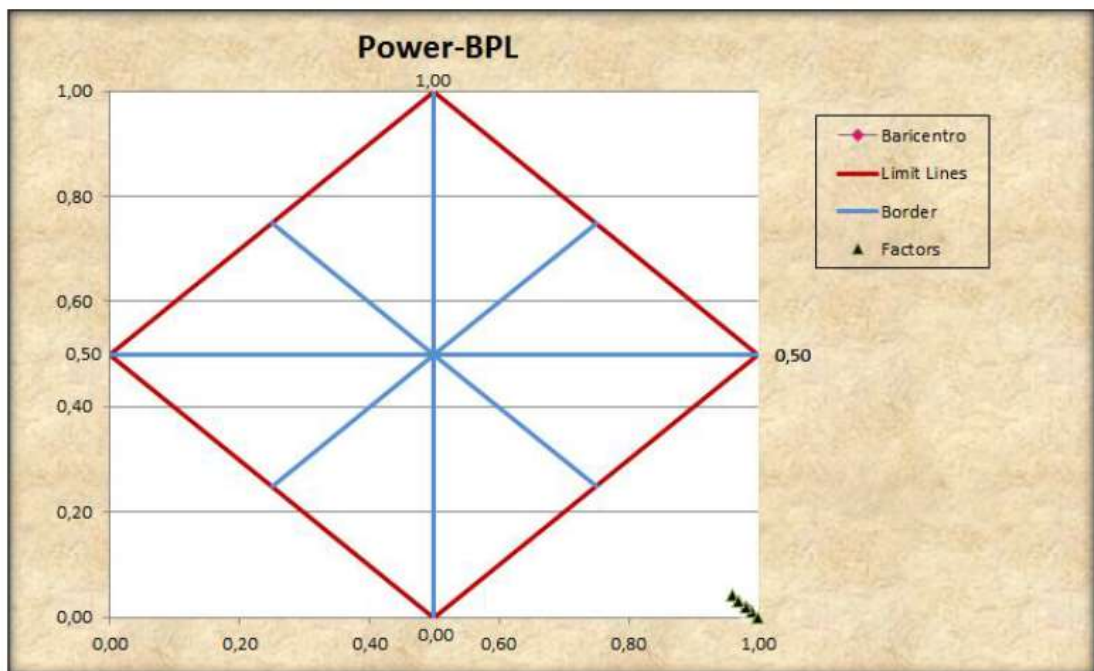
RESULTS OF RESIDUAL ENERGY RESEARCH APPLICATION OF THE METHOD AND RESULTS								
A		B		A AND B		Level of Requirement >		0,500
E1 OR E2		E3 OR E4				Conclusions		
$\mu^1$	$\lambda^2$	$\mu^3$	$\lambda^4$	$\mu^5$	$\lambda^6$	Gce	Gunf	Decision
0,95	0,84	0,99	0,91	0,99	0,01	0,98	0,00	
0,84	0,73	0,96	0,40	0,96	0,04	0,92	0,00	
1,00	0,91	0,95	0,84	1,00	0,00	1,00	0,00	
0,94	0,82	0,99	0,89	0,99	0,01	0,98	0,00	
0,77	0,72	0,96	0,87	0,96	0,04	0,92	0,00	
0,89	0,87	0,97	0,73	0,97	0,03	0,94	0,00	
0,77	0,64	0,99	0,82	0,99	0,01	0,98	0,00	
0,76	0,75	0,98	0,65	0,98	0,02	0,96	0,00	
0,84	0,65	1,00	0,58	1,00	0,00	1,00	0,00	
0,94	0,58	0,97	0,70	0,97	0,03	0,94	0,00	
	Baricentro			0,98	0,02	0,96	0,00	



The global analysis is calculated considering the favorable evidences ( $\mu$ ) multiplied by their respective weights (all the same, in both scenarios), and finally added. The same is done for the unfavorable evidence ( $\lambda$ ) [1][2][3]. Fig 2 and 3 show the lattices formed from the results of the metrics analyzed by the para-analyzer.



**Fig 2** - Reticulate formed with the metric result of the average hop count analyzed by the para-analyzer (Hop-BPL).



**Fig 3** - Reticulate formed with the result of the metric residual battery level analyzed by the para-analyzer (Power-BPL).

## 4 Analysis of the results

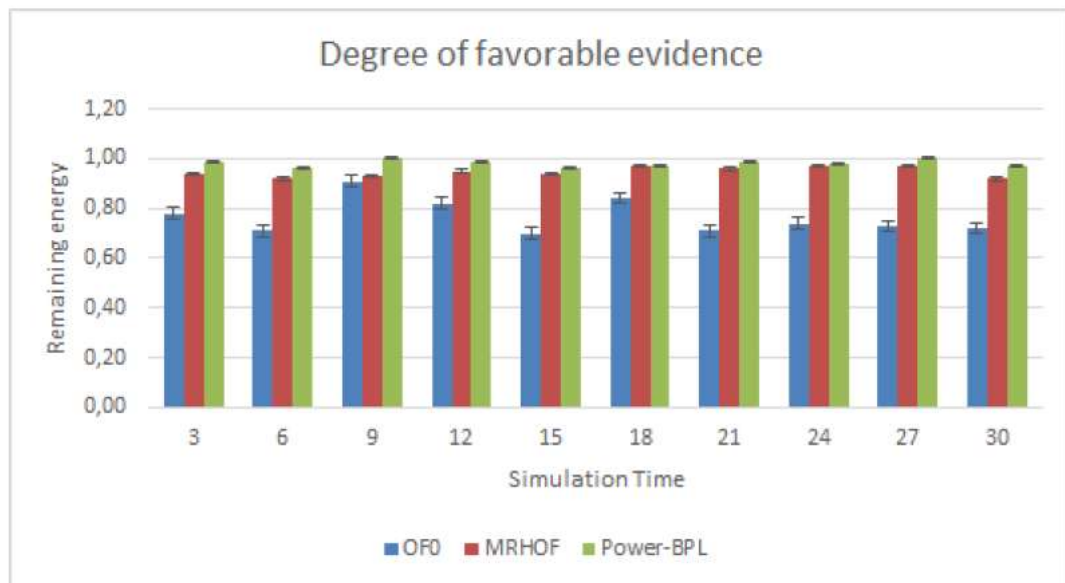
As we saw in Fig 4, the Power-BPL grid lattice of the global analysis presents a true result for the better IoT performance. Thus, it has a high favorable degree of evidence.

However, Fig 5 shows the Hop-BPL metric lattice, whose result goes from near-false, tending to complete and inconsistent, passing through the quasi-true, tending to complete and inconsistent and reaching true, with degree of Favorable evidence. However, when related to the other two metrics compared to the default objective functions, OF0 and MRHOF, the results obtained by Hop-BPL were similar to the analytical and simulation results presented.

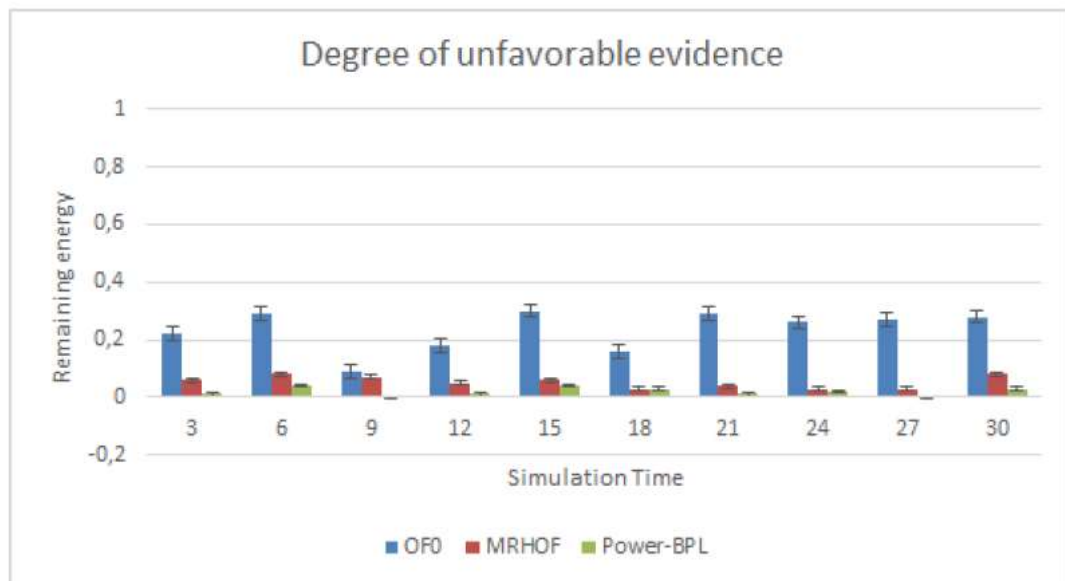
### 4.1 Network life (power consumption)

In this scenario, we consider a DAG consisting of a DAG root and 50 RPL routers. Through the data generated in the simulations, we observed that the effect of the objective function on average energy consumption is less important. For this reason, we have observed the remaining power of all the nodes of the network, to compare with the lifetime of the RPL routers in the LLN network [4][15]. We run these simulations four consecutive times.

In the observed objective functions, with OF0 and MRHOF with ETX [7][12][14], in which the remaining energy distribution is not balanced, we note, for example, that for OF0, the simulation with duration of 30 minutes (Fig 4 and 5) has an average of 23% of nodes with a remaining energy with unfavorable degree of evidence and 77% of nodes have a residual energy degree of evidence favorable. In the MRHOF, the result of the simulation was registered with an average of 5% of the nodes, with a remaining energy with an unfavorable degree of evidence and 95% of the nodes have a residual energy degree of favorable evidence. This result will have an impact on the survival of the network, as some nodes will suffer an early exhaustion of the battery completely. The data from the comparisons of the OFs metrics also show that, in the case of Power-BPL, the nodes experience has a remaining energy with a favorable degree of evidence of 98% against the unfavorable degree of evidence with 2% property Important for the life of the network. It is also clear that in the cases of OF0 and in the MRHOF based ETX regimes [8], there were nodes with less power when compared to those in the Power-BPL based network. Thus, we estimate that Power-BPL will delay the exhaustion of the battery of the first nodes.



**Fig 4** - Graphs residual energy per node by simulation time, degree of favorable evidence.



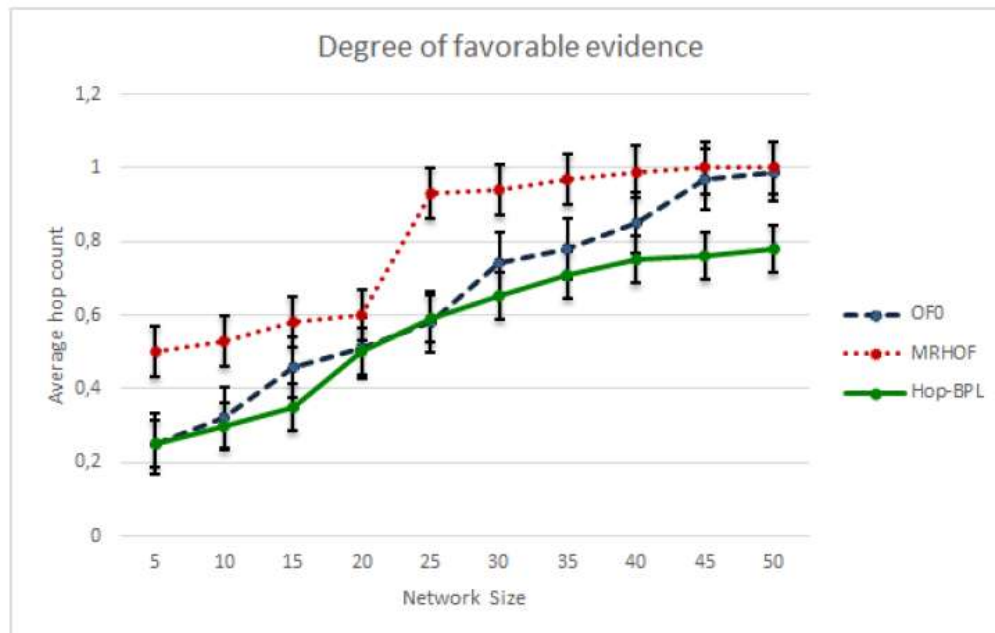
**Fig 5** - Residual energy graphs per node by time of simulation, degree of unfavorable evidence.

## 4.2 Average hop count

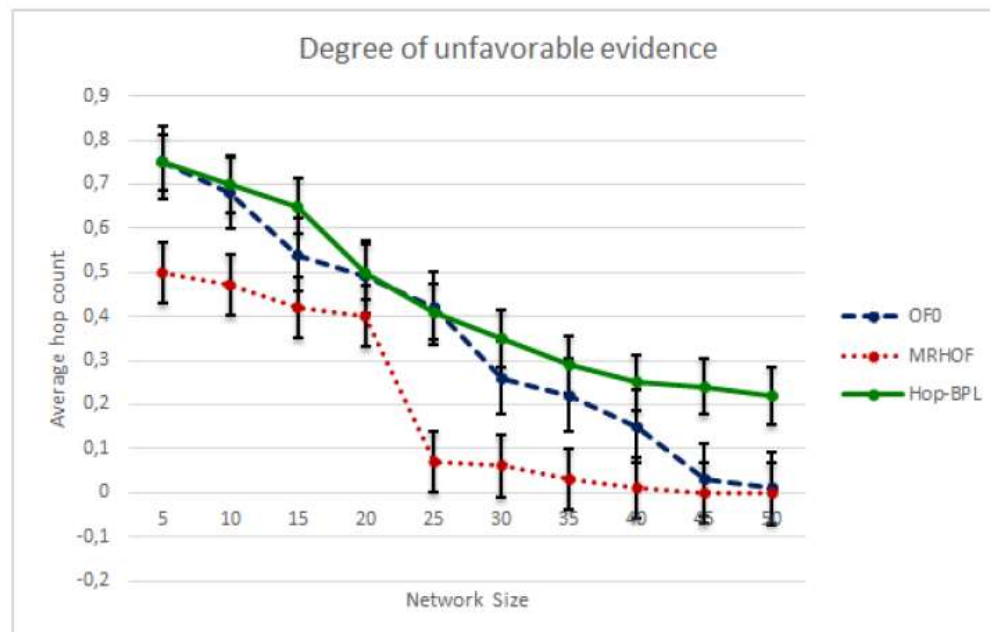
The comparison of the Hop-BPL hop count, MRHOF with ETX and OF0, as shown in Fig 6 and 7, show that the three networks are almost identical in the case of a small network, consisting of a maximum of 50 nodes. This can be justified by the relatively limited number of neighbors, which makes the exchange for another very restricted neighbor node. However, it is distinctly permissible to have an average hop count in Hop-BPL with a favorable low degree of evidence, as compared to MRHOF with ETX,



in the case of dense networks composed of more than 50 RPL routers. Obviously, the hop count in Hop-BPL becomes closer to OF0 under a high node density. This confirms the degree of favorable Hop-BPL evidence to minimize the number of jumps within the DAG.



**Fig 6** - Graph of comparison of OF0, MRHOF with ETX and Hop-BPL in the term of the average hop count with degree of favorable evidence.



**Fig 7** - Graph of comparison of OF0, MRHOF with ETX and Hop-BPL in the term of the average hop count with degree of unfavorable evidence.

## 5 Conclusions

Based on the survey of the data of this research to propose an analysis of performance in Internet of Things based on Paraconsistent Logic. The use of two energy level metrics and jumping count for analysis in order to present a true result for the best IoT performance. Thus, the results of Hop-BPL and battery-level (Power-BPL) metrics based on Logic  $E\tau$  have high favorable degrees of evidence and unfavorable degrees of evidence compared to objective functions.

## 6 References

1. Abe, J. M., Akama, S., Nakamatsu K. Introduction to Annotated Logics - Foundations for Paracomplete and Paraconsistent Reasoning, Series Title Intelligent Systems Reference Library, Volume 88, Publisher Springer International Publishing, Copyright Holder Springer International Publishing Switzerland, eBook ISBN 978-3-319-17912-4, DOI 10.1007/978-3-319-17912-4, Hardcover ISBN 978-3-319-17911-7, Series ISSN 1868-4394, Edition Number 1, 190 pages, 2015.
2. Pimenta Jr., A.P., J.M. Abe, Oliveira, C.C., An analyzer of computer network logs based on Paraconsistent Logic, IFIP International Federation for Information Processing, IFIP AICT 459, ISSN 1868-4238 pp 620-627, Springer International Publishing 2015.
3. Pimenta Jr., A.P., J.M. Abe, Silva, G.C., Determination of operating parameters and performance analysis of computer networks with Paraconsistent Annotated Evidential Logic  $E\tau$ , IFIP Advances in Information and Communication Technology, Series ISSN 1868-4238, Volume 488, Springer International Publishing, Number of Pages XXII, 917, 2016, to appear.
4. Winter, T. RPL: IPv6 routing protocol for low-power and lossy networks, RFC 6550, March 2012.
5. O. Gaddour and A. Koubaa, "Survey RPL in a nutshell: A survey," Computer Networks, vol. 56, no. 14, pp. 3163–3178, 2012.
6. Gaddour, O., Koubaa, A., Baccour, N., & Abid, M. Of-fl: Qos-aware fuzzy logic objective function for the rpl routing protocol. In Modeling and Optimization in Mobile, Ad Hoc, and Wireless Networks (WiOpt), 12th International Symposium on (pp. 365-372). IEEE, 2014.
7. Gnawali, O., & Levis, P. The ETX objective function for RPL, 2010.
8. Baccour, N., Koubaa, A., Mottola, L., Zúñiga, M. A., Youssef, H., Boano, C. A., & Alves, M. Radio link quality estimation in wireless sensor networks: A survey. ACM Transactions on Sensor Networks (TOSN), v. 8, n. 4, p. 34, 2012.
9. Osterlind, F., Dunkels, A., Eriksson, J., Finne, N., e Voigt, T. Cross-level sensor network simulation with cooja. In Proceedings. 31st IEEE Conference on Local Computer Networks, pages 641–648, 2006.
10. Dunkels, A., Osterlind, F., Tsiftes, N., e He, Z. Software-based on-line energy estimation for sensor nodes. In Proceedings of the 4th Workshop on Embedded Networked Sensors, EmNets '07, pages 28–32, New York, NY, USA. ACM, 2007.
11. Atzori, L., Iera, A., e Morabito, G. The internet of things: A survey. Computer Networks, 54(15):2787–2805, 2010.
12. Levis, P. e Gnawali, O. The Minimum Rank with Hysteresis Objective Function. RFC 6719, 2012.

13. Sobral, J., Rabêlo, R., Oliveira, D., Lima, J., Araújo, H., e Holanda, R. A framework for improving the performance of iot applications. In *The 14th International Conference on Wireless Networks*, pages 134–140, Las Vegas, NV, USA. 2015.
14. Thubert, P. Objective Function Zero for the Routing Protocol for Low-Power and Lossy Networks (RPL). RFC 6552, 2012.
15. Tsvetkov, T. e Klein, A. RPL: IPV6 routing protocol for low power and lossy networks. *Network*, 59, 2011.



**APENDICE 2 – OF-BPL: Qualidade do Serviço do Protocolo de Roteamento RPL  
Paraconsistente para Internet das Coisas**

# OF-BPL: Qualidade do Serviço do Protocolo de Roteamento RPL Paraconsistente para Internet das Coisas

Alysson Ramirez de Freitas Santos

Santos, A. R. F.

Email: alyssonramirez@gmail.com

UNIP – Pós-graduação em Engenharia de Produção, ICET  
R. Dr. Bacelar, 1212 - Vila Clementino,  
São Paulo - SP, 04026-002

**Resumo** — Neste artigo tecem-se alguns comentários a Lógica Paraconsistente Anotada Evidencial Et (Lógica Et) em Internet das Coisas (do Inglês, *Internet of Things*, IoT), nossa proposta está concentrada no Protocolo de Roteamento para Redes com Perdas e Baixo Consumo de Energia (do inglês, *Routing Protocol for Low-power and Lossy Networks*, RPL), que foi projetado para Redes com Perdas e Baixo Consumo de Energias (do inglês, *Low-power and Lossy Networks*, LLNs), desenvolvido e padronizado pelo ROLL *Working Group* no *Internet Engineering Task Force* (IETF desde março de 2012, RFC 6550). O RPL possui duas funções objetivo como *default*, a OF0 e a MRHOF, que terão seus dados processados de acordo com o algoritmo Para-analizador que baseia-se na Lógica Et, que permite manipular dados incertos, contraditórios e para-completos de modo não trivial. A proposta deste artigo é gerar uma nova função objetivo, a OF-BPL, que será comparada com a OF0 e a MRHOF. A OF-BPL apresentou um surpreendente desempenho em relação as outras funções objetivo. Seus resultados revelam que pode alcançar um desempenho notável nas LLNs, satisfazendo a qualidade das diferentes aplicações de serviço e no prolongamento da vida útil da IoT.

**Palavras chave:** Lógica Paraconsistente, Internet das Coisas, RPL, Contiki, Cooja.

**Abstract** — In this paper we make a few comments on the Paraconsistent Logic Annotated Evidential Et in Internet of Things (IoT), our proposal is focused on Routing Protocol for Low-power and Lossy Networks (RPL), which was designed for Low-power And Lossy Networks (LLNs), developed and standardized by the ROLL Working Group on the Internet Engineering Task Force (IETF) since March 2012 (RFC 6550). The RPL has two objective functions as default, OF0 and MRHOF, which will have their data processed according to the Para-analyzer algorithm that is based on the Logic Et, which allows manipulating uncertain, contradictory and full-length data in a non-trivial way. The purpose of this article is to generate a new objective function, OF-BPL, which will be compared to OF0 and MRHOF. OF-BPL presented a surprising performance compared to the other objective functions. Its results show that it can achieve remarkable performance in LLNs, satisfying the quality of different service applications and extending IoT service life.

**Keywords:** Paraconsistent Logic, Internet of Things, RPL, Contiki, Cooja.

## 1 INTRODUÇÃO

Neste artigo será utilizada a lógica Et, por ser uma lógica não-clássica e capaz de tratar informações inconsistentes, para-completas e incertezas. Também estudaremos a estrutura da Internet das Coisas, bem como suas funções e os objetos inteligentes que a compõem, como as redes de sensores sem fio e o protocolo de roteamento RPL, que será simulado no Cooja do Sistema Operacional Contiki, proporcionando os resultados das métricas que serão analisadas de suas duas funções objetivo default, OF0 e MRHOF, para alcançar uma performance melhor no desempenho de comunicação entre os nós sensores da IoT. Depois que os dados das métricas forem processados pelo para-analizador da Lógica Et, será gerada uma nova Função Objetivo, baseada em Lógica Et (do inglês,

Objective Function-Based on Logic Paraconsistente, OF-BPL), que será comparada com as métricas de desempenho em estudo das OF0 e MRHOF [2] contagem média de salto, média de energia remanescente e qualidade do link (ETX).

## II LÓGICA PARACONSISTENTE ANOTADA EVIDENCIAL ET

Iniciamos nossa exposição de modo coloquial, incrementando-a até atingir uma apresentação com o rigor que o tema necessita. A Lógica Paraconsistente Anotada Evidencial Et (Lógica Et) possui uma linguagem Et. Suas proposições atômicas são do tipo  $p(\mu, \lambda)$ :  $p$  é uma proposição e  $\mu, \lambda \in [0, 1]$  (intervalo real unitário fechado). Intuitivamente,  $\mu$  indica o grau de evidência favorável de  $p$  e

$\lambda$ , o grau de evidência desfavorável de  $p$ . A leitura dos valores  $\mu$ ,  $\lambda$  dependem das aplicações consideradas e podem sofrer mudanças. Com efeito,  $\mu$  pode ser o grau de crença favorável e  $\lambda$  poder ser o grau de crença contrária da proposição  $p$ ;  $\mu$  também, pode indicar a probabilidade expressa por  $p$  ocorrer e  $\lambda$ , a improbabilidade expressa por  $p$  de ocorrer. As proposições atômicas  $p(\mu, \lambda)$  da Lógica Et podem, intuitivamente, ser lidas como: creio em  $p$  com o grau de crença favorável  $\mu$  e o grau de crença contrária  $\lambda$ , ou o grau de evidência favorável de  $p$  é  $\mu$  e o grau de evidência desfavorável de  $p$  é  $\lambda$  [1][9].

As fórmulas atômicas da Lógica Et são do tipo  $p(\mu, \lambda)$ , onde  $(\mu, \lambda) \in [0, 1] \times [0, 1]$  ( $P$  denota uma variável proposicional).  $p(\mu, \lambda)$  pode ser intuitivamente ler: "Supõe-se evidência favorável desse  $p$  é  $\mu$  e evidência desfavorável é  $\lambda$ ". Assim;

- $p(1,0, 0,0)$  pode ser lido intuitivamente como uma proposição verdadeira.
- $p(0,0, 1,0)$  pode ser lido intuitivamente como uma proposição falsa.
- $p(1,0, 1,0)$  pode ser lido intuitivamente como uma proposição inconsistente.
- $p(0,0, 0,0)$  pode ser lido intuitivamente como uma proposição indefinida.

Introduzimos os seguintes conceitos (considerações são tomadas com  $0 \leq \mu, \lambda \leq 1$ ):

- Grau de incerteza:  $G_{in}(\mu, \lambda) = \mu + \lambda - 1$
- Grau certeza:  $G_{ce}(\mu, \lambda) = \mu - \lambda$ .

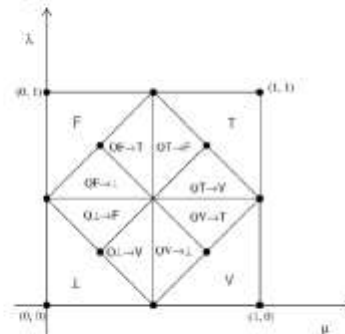
Intuitivamente,  $G_{in}(\mu, \lambda)$  mostra-nos quão perto (ou longe) a constante de anotação  $(\mu, \lambda)$  é de inconsistente ou paracompleta Estado. Da mesma forma,  $G_{ce}(\mu, \lambda)$  aponta o quão perto (ou longe) a constante de anotação  $(\mu, \lambda)$  é de estado verdadeiro ou falso. Dessa forma, podemos manipular a informação dada pela constante de anotação  $(\mu, \lambda)$ . Note-se que esses não são graus distância métrica.

Com a incerteza e a certeza graus, podemos obter os seguintes 12 estados de saída (Tabela 1): estados extremos e estados não-extremos, como mostra a Figura 1.

Tabela 1 – Estados extremos e estados não-extremos

Estados Não-Extremos	Símbolo
Quase-verdadeiro tendendo ao Inconsistente	$QV \rightarrow T$
Quase-verdadeiro tendendo ao Paracompleto	$QV \rightarrow \perp$
Quase-falso tendendo ao Inconsistente	$QF \rightarrow T$
Quase-falso tendendo ao Paracompleto	$QF \rightarrow \perp$
Quase-inconsistente tendendo ao Verdadeiro	$QT \rightarrow V$
Quase-inconsistente tendendo ao Falso	$QT \rightarrow F$
Quase-paracompleto tendendo ao Verdadeiro	$QL \rightarrow V$
Quase-paracompleto tendendo ao Falso	$QL \rightarrow F$

Figura 1 – Estados extremos e não-extremos



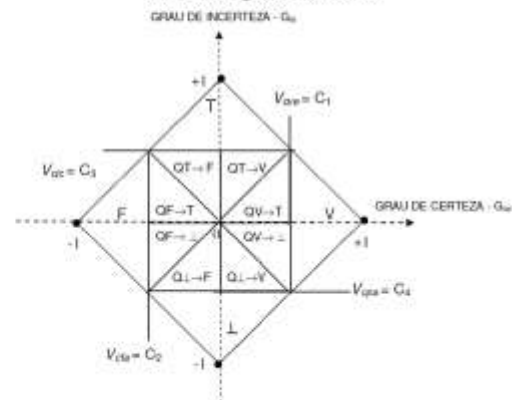
Alguns valores de controle adicionais são:

- $V_{scct}$  = valor máximo de controle de incerteza =  $F_{tun}$
- $V_{scc}$  = valor máximo de controle certeza =  $F_{tce}$
- $V_{icct}$  = valor mínimo de controle incerteza =  $-F_{tun}$
- $V_{icc}$  = valor mínimo de controle certeza =  $-F_{tce}$

Tais valores são determinados pelo conhecimento engenheiro, dependendo de cada aplicação encontrar os valores de controle apropriadas para cada um deles.

Todos os estados são representados na Figura 2, inclusive a relação entre com certeza e de incerteza graus.

Figura 2 – Diagrama com os graus de incerteza e de certeza, com valores ajustáveis de controle limite indicados nos eixos. Observe também as regiões consideradas



Dadas as entradas  $\mu$  favorável e  $\lambda$  contrário como provas de evidência, não é o algoritmo para-analizador (abaixo), que descobrir uma saída conveniente [1][9].

### III TRABALHOS RELACIONADOS

Em [5] uma função objetivo baseada na lógica fuzzy foi proposta. Denominada OF-FL, a função combina um conjunto de métricas incluindo delay ponto-a-ponto, ETX, número de saltos e nível energético da bateria, provendo



decisões de roteamento aos nós da rede durante a seleção de pais preferidos. As métricas escolhidas pelos autores foram utilizadas como entradas em um sistema de inferência fuzzy resultando em um valor indicativo da qualidade dos nós vizinhos na saída do sistema. Os resultados obtidos evidenciaram que a OF-FL é capaz de melhorar o delay ponto-a-ponto, a taxa de perda de pacotes e o tempo de vida da rede.

Uma função objetivo sensível ao contexto denominada CAO (Context Aware Objective Function) foi proposta por [15] e projetada para as redes de sensores sem fio, se baseando nos recursos residuais e na mudança de estado do nó sensor ao longo do tempo. A função objetivo proposta (CAOF) realiza uma soma ponderada das métricas: grau de conectividade do nó, nível energético da bateria e posição do nó na árvore de roteamento em relação ao progenitor. O objetivo final da função proposta por este autor é encontrar uma probabilidade de entrega para cada nó sensor.

#### IV. METODOLOGIA

Neste trabalho será realizada uma pesquisa experimental, no qual o objeto de estudo será as funções objetivas padrões existentes na configuração do simulador Cooja, OF0 e a MRHOF, que são utilizadas pelo protocolo de roteamento RPL. Iremos utilizar as OF0 e MRHOF como cenários, no qual analisaremos duas variáveis como métricas que são capazes de influenciar para uma melhor seleção do nó pai preferido, as métricas utilizadas serão: número médio de saltos, nível de energia da rota. Desta forma, as métricas serão analisadas no para-analisador baseado em Lógica Et, que irá gerar uma nova função objetivo, denominada OF-BPL.

##### Estabelecendo uma boa rota

Cada métrica descreve uma propriedade importante para a rota e contribui para formar um melhor caminho para a raiz. Consideramos as métricas de nós sensores que serão usadas para expressar se a rota até um determinado vizinho apresenta uma boa qualidade de serviço.

•Distância mínima: uma rota é escolhida com menor número de saltos para chegar ao nó sink, sendo esta rota a mesma que terá um gasto mínimo de energia.

•Confiabilidade: uma rota é confiável, se ela fornece uma alta taxa de entrega. Esta propriedade é muito correlacionada com a qualidade do link que formam o percurso.

•Eficiência Energética: uma rota é eficientemente energética se usar os nós que têm mais energia do que os outros, realizando assim o balanceamento de carga da rede.

Para essa proposta de implementação, foi utilizado simulador Cooja, que pertence ao ambiente do Sistema Operacional Contiki. Caracteriza-se por ser um simulador baseado em Java e usa a linguagem de programação C como a linguagem de design de software em redes de sensores sem fio. Fornecerá um método adequado para definir as necessidades ambientais de uma IoT. Optamos pelo Contiki, por ser um sistema operacional *open source*, altamente portátil e multitarefa para sistemas, com memória eficiente

embutido em redes de sensores sem fio. Dessa forma, fornece precisão em sua simulação no comportamento e implementação de uma LLN real. Também permite que os usuários adicionem, rapidamente, uma funcionalidade e personalizem simulações específicas, pois tanto as interfaces como os plug-ins podem ser facilmente adicionados ao COOJA.

O cenário de simulação foi construído, para permitir a avaliação de desempenho da abordagem proposta. A topologia do cenário utilizado consiste em 49 nós sensores e um nó sink. Há, portanto, 50 dispositivos em uma topologia de rede aleatória, suficientes para a formação de múltiplas rotas em cada nó da rede, de modo a oferecer suporte para a validação da abordagem proposta no cenário que utiliza a OF0 e o cenário com a MRHOF.

O tempo total de simulação (30 minutos) permitiu uma observação do comportamento do protocolo. Utilizando as funções objetivo avaliadas, as simulações foram repetidas quatro vezes distintas, resultado nas métricas que serão analisadas no para-analisador da Lógica Et. Dessa forma a energia inicial dos nós foi ajustada para 2000 joules para a potência máxima, que corresponde ao valor máximo de energia nesta simulação própria para ser utilizada nos dispositivos de IoT.

##### Normalização

Uma vez que todas as métricas são estabelecidas, o passo seguinte é a normalização (Tabela 2), que consiste na produção de uma métrica com valor de saída, estabelecendo o grau de crença e o grau de descrença para produzir uma ação única de controle. Nesse caso, todo o valor de uma métrica precisa ser normalizado, no universo ( $\tau$ ), para um valor real no intervalo de 0 a 1, antes de ser compilado no para-analisador, que gera o Reticulado QUCP.

Tabela 2 – Valores normalizados e evidências favoráveis ( $\mu$ ) e desfavoráveis ( $\lambda$ ) das métricas de seleção do nó pai preferido

MÉTODO DE ANÁLISE DE MÉTRICAS PARA TOMADAS DE DECISÕES NO PROTOCOLO DE ROTEAMENTO RPL									
Cenário	Normalização das Métricas			Base de Dados do Para-analisador					
	Hops	Power	ETX	Hops		Power		ETX	
				$\mu$	$\lambda$	$\mu$	$\lambda$	$\mu$	$\lambda$
OF0	1000	3596	18000	0,25	0,25	0,58	0,70	0,25	0,25
	1500	1889	18050	0,25	0,83	0,64	0,71	0,30	0,28
	1800	2732	22580	0,50	0,84	0,65	0,71	0,35	0,44
	2000	2561	33500	0,50	0,52	0,72	0,72	0,52	0,51
	2400	1874	88750	0,50	0,68	0,73	0,73	0,61	0,56
	2900	1655	45700	0,75	0,75	0,75	0,74	0,71	0,73
	3200	1213	49500	0,75	0,78	0,82	0,78	0,77	0,77
	3500	1437	50000	0,75	0,93	0,84	0,82	0,80	0,82
	3750	1238	61000	1,00	0,96	0,87	0,84	0,95	0,96
	8000	1104	63500	1,00	0,98	0,91	0,91	0,99	0,99
MRHOF	1000	1307	16000	0,50	0,50	0,56	0,69	0,48	0,48
	1200	1295	17000	0,60	0,53	0,56	0,68	0,54	0,51
	1450	1247	18000	0,61	0,60	0,68	0,69	0,63	0,58
	1620	1332	20750	0,73	0,58	0,80	0,80	0,88	0,56
	1780	1174	22850	0,80	0,63	0,80	0,92	0,71	0,77
	1850	1256	24000	0,82	0,64	0,80	0,97	0,78	0,82
	1900	1207	27888	0,96	0,97	0,93	0,95	0,87	0,88
	1925	1326	29750	0,96	0,98	1,00	1,00	0,91	0,93
	1985	1235	31600	0,99	1,00	0,99	0,99	0,96	0,97
	2000	1311	32500	1,00	1,00	0,98	0,98	1,00	0,99

Após a parametrização das métricas obtidas por meio das simulações realizadas no Cooja, serão analisadas as

proposições: "Quais os efeitos da aplicação da Lógica Paraconsistente Evidencial Et sobre os dados obtidos das métricas analisada das funções objetivos default, OF0 e MRHOF, do protocolo de roteamento RPL? Será que a OF-BPL gerada pelo para-analisador proporcionará a otimização da performance de desempenho da Internet das Coisas?". Para isso, o Para-analisador será aplicado nas bases de dados representas nos cenários 1 (OF0) e 2 (MRHOF).

A análise global é calculada considerando as evidências favoráveis ( $\mu$ ), multiplicadas por seus respectivos pesos (todos iguais, em ambos os cenários) e finalmente adicionados. O mesmo é feito para a evidência desfavorável ( $\lambda$ ) (ABE, 2010). A Figura 3, 4 e 5, a seguir, mostram os reticulados formados com os resultados obtidos das métricas analisadas pelo para-analisador para a OF-BPL.

Figura 3 – Reticulado formado com o resultado métrica da contagem média de saltos analisada pelo para-analisador para gerar na OF-BPL



Figura 4 – Reticulado formado com o resultado da métrica nível de bateria residual analisada pelo para-analisador para gerar na OF-BPL

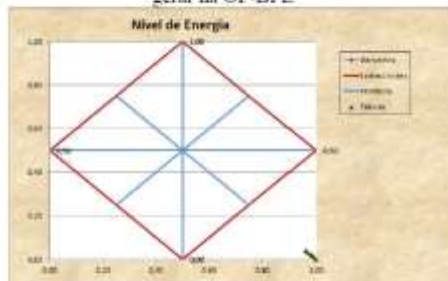
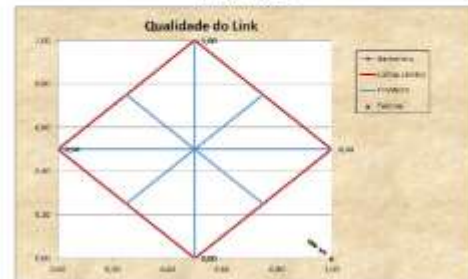


Figura 5 – Reticulado formado com o resultado da métrica qualidade do link analisada pelo para-analisador para gerar na OF-BPL



## V RESULTADOS E DISCUSSÃO

Como vimos na Figura 4 e 5, os reticulados das métricas nível de energia residual e qualidade do link na análise global de OF-BPL apresentam um resultado verdadeiro para o melhor desempenho da IoT. Sendo assim, possuem graus de evidências favoráveis altas.

No entanto, a Figura 3 mostra o reticulado da métrica da contagem média de saltos, cujo resultado vai de quase-falso, tendendo a para-completar e inconsistente, passando pelo quase-verdadeiro, tendendo a para-completar e inconsistente e chegando a verdadeiro, com grau de evidência favorável fraca. Porém, quando relacionada com as outras duas métricas em comparação com as funções objetivo default, OF0 e MRHOF, os resultados obtidos pela OF-BPL desenvolvida foram similares aos resultados analíticos e de simulação apresentados por Gaddour et al. (2014).

### Contagem média de saltos

A comparação da média de contagem de saltos da OFBPL, MRHOF com ETX e OF0, como exibimos na Figura 6 e 7 mostra que as três redes são quase idênticas no caso de uma rede pequena, composta de menos de 50 nós. Isso pode ser justificado pelo número relativamente limitado de vizinhos, que torna a escolha de um outro pai muito restrita. No entanto, é distintamente permitida uma contagem média de saltos na OF-BPL com grau de evidência favorável baixa, como em comparação com MRHOF com ETX, no caso de redes densas compostas por mais de 50 roteadores RPL. Obviamente a contagem média de saltos em OF-BPL torna-se mais próxima da OF0 sob uma alta densidade de nó. Isso confirma o grau de evidência favorável de OF-BPL para minimizar o número de saltos dentro do DAG.



Figura 6 – Gráfico de comparação entre OF0, MRHOF com ETX e OFBPL no termo da contagem média de saltos com grau de evidência favorável

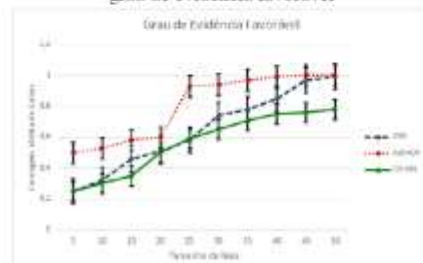
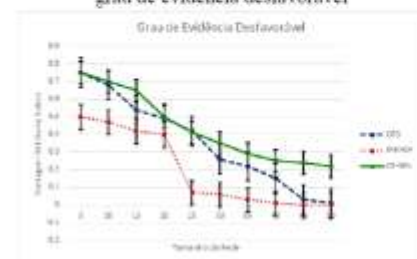


Figura 7 – Gráfico de comparação entre OF0, MRHOF com ETX e OFBPL no termo da contagem média de saltos com grau de evidência desfavorável



#### Tempo de vida da rede (consumo de energia)

Nesse cenário, consideramos um DAG composto por uma raiz DAG e 50 roteadores RPL. Por meio dos dados gerados nas simulações, observamos que o efeito da função objetivo sobre o consumo médio de energia é menos importante. Por essa razão, temos observado a energia restante de todos os nós da rede, para comparar com o tempo de vida dos roteadores RPL na rede LLN. Executamos essas simulações por quatro vezes consecutivas.

Nas funções objetivo observadas, com OF0 e MRHOF com ETX, nas quais a distribuição de energia restante não é equilibrada, notamos, por exemplo, que, para OF0, a simulação com duração de 30 minuto (Figuras 8 e 9) tem uma média de 23% dos nós, com uma energia restante com grau de evidência desfavorável e 77% dos nós têm uma energia residual grau de evidência favorável. Já na MRHOF, o resultado da simulação foi registrado com uma média de 5% dos nós, com uma energia restante com grau de evidência desfavorável e 95% dos nós têm uma energia residual grau de evidência favorável. Esse resultado terá um impacto sobre a sobrevivência da rede, como alguns nós irão sofrer um esgotamento precoce da bateria completamente. Os resultados dos dados das comparações das métricas das OFs também demonstram que, no caso de OF-BPL, a experiência dos nós tem uma energia remanescente com o grau de evidência favorável em 98%, contra o grau de evidência desfavorável com 2%, propriedade importante para a vida útil da rede. É claro, também, que, nos casos de OF0 e nos

regimes MRHOF baseados em ETX, houve nós com menos potência, quando comparados com aqueles na rede baseada em OF-BPL. Assim, estimamos que OF-BPL atrasará o esgotamento da bateria dos primeiros nós.

Figura 8 – Gráficos energia residual por nó pelo tempo de simulação, Grau de Evidência Favorável

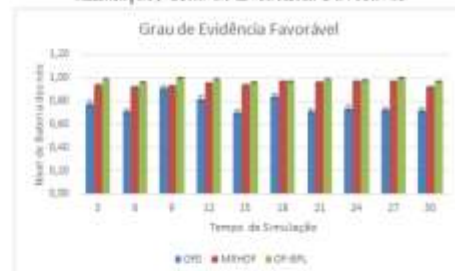


Figura 9 – Gráficos energia residual por nó pelo tempo de simulação, grau de evidência desfavorável

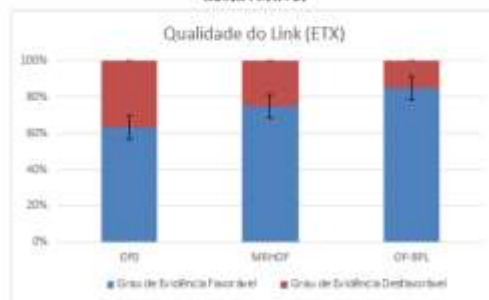


#### Qualidade do Link (ETX)

Há elevada troca de pacotes na rede com padrão OF0, apesar de ele não promover conexões de alta qualidade e apresentar grau de evidência favorável de 63% e grau de evidência desfavorável de 37%. Portanto, ao escolher um novo pai preferido com a classificação mínima sem fazer nenhuma análise, esse pai pode estar congestionado e, assim, cair a taxa de transferência de pacotes de dados. Já uma rede com MRHOF baseada em ETX tem uma proporção da qualidade do link comparável ao OF-BPL devido ao uso do mesmo estimador, que é ETX, com grau de evidência favorável de MRHOF de 75% e grau de evidência desfavorável de 25%. O ETX selecionará o próximo salto, minimizando o direcionamento de um caminho que apresente melhor qualidade, por exemplo, taxa baixa de perda de pacotes, nível de energia alto e menos número de saltos até o nó raiz. Esses resultados levantam a pergunta sobre a eficácia da ETX e sua real necessidade para promover a confiabilidade em sua qualidade de conexão. Seria melhor utilizar outras ferramentas para essa métrica? Quando as taxas de transmissão do sensor tomam-se maiores, a taxa de perda de pacotes aumenta. Esse resultado deve-se principalmente ao congestionamento da rede e aos pacotes de colisão. Notamos também que o desempenho do OF-BPL se torna melhor do que com MRHOF baseado em ETX, como

exibe a Figura 10, pois permite uma queda menor no número de pacotes de dados perdidos. Assim, OF-BPL supera o MRHOF com ETX, quando a quantidade de pacotes de dados é elevada, sendo o grau de evidência favorável muito superior a de outras duas funções objetivo, de 85% e o grau de evidência desfavorável de 15%, o que demonstra a eficácia da OF-BPL no alto rendimento.

Figura 10 – Gráficos exibe nível de qualidade do link das funções objetivo e seus graus de evidência favorável e desfavorável



## VIII CONCLUSÃO

Esse artigo apresenta uma nova Função Objetivo de RPL baseada na Lógica Et. Em comparação com as funções objetivo existentes nas configurações padrões do Simulador Cooja do Sistema Operacional Contiki, que dependem apenas de uma ou duas métricas e, portanto, não consideram os requisitos de aplicações no processo da otimização do caminho de rotas em uma LLN entre o nó inicial da mensagem até o nó de destino que será o nó sorvedouro. Já na função objetiva proposta, OF-BPL, aborda-se uma combinação de três métricas de ligação (contagem de saltos, qualidade do ligação em ETX e nível de bateria) usando Lógica Et, provando que essa técnica é uma estratégia adequada para combinar diferentes métricas e atributos heterogêneos no processo de roteamento RPL. O melhor pai é especificado como um conjunto de métricas, que são combinadas com as suas grandezas de proporcionalidade. A avaliação dos dados das métricas das funções objetivo obtidas nas simulações e gerando a OF-BPL auxiliadas pelo para-analizador da Lógica Et retorna a composição do nó vizinho com as métricas de resultado de quais nós vizinhos apresentam boas qualidades para o roteamento RPL. Nesse caso, o nó vizinho com a maior qualidade será selecionado como o nó pai preferido. OF-BPL foi implementado com apenas pequenos complementos, assegurando a compatibilidade com o padrão especificado no roteamento RPL. Assim, nossa função objetiva tem a intenção de solucionar e suportar múltiplas aplicações de IoT com base no protocolo de roteamento RPL, com requisitos antagônicos simultaneamente.

## IX BIBLIOGRAFIA

- [1] Abe, J. M., Akama, S., Nakamatsu K. Introduction to Annotated Logics - Foundations for Paraconsistent and Paraconsistent Reasoning. Series Title Intelligent Systems Reference Library, Volume 88, Publisher Springer International Publishing, Copyright Holder Springer International Publishing Switzerland, eBook ISBN 978-3-319-17912-4, DOI 10.1007/978-3-319-17912-4, Hardcover ISBN 978-3-319-17911-7, Series ISSN 1868-4394, Edition Number 1, 190 pages, 2015.
- [2] Atzori, L., Iera, A., e Morabito, G. The internet of things: A survey. *Computer Networks*, 54(15):2787–2805, 2010.
- [3] Baccour, N., Koubaa, A., Mottola, L., Zúñiga, M. A., Youssef, H., Boano, C. A., & Alves, M. Radio link quality estimation in wireless sensor networks: A survey. *ACM Transactions on Sensor Networks (TOSN)*, v. 8, n. 4, p. 34, 2012.
- [4] Dunkels, A., Osterlind, F., Tsiftes, N., e He, Z. Software-based on-line energy estimation for sensor nodes. In *Proceedings of the 4th Workshop on Embedded Networked Sensors, EmNets '07*, pages 28–32. New York, NY, USA, ACM, 2007.
- [5] Gaddour, O., Koubaa, A., Baccour, N., & Abid, M. Of-fl: Qos-aware fuzzy logic objective function for the rpl routing protocol. In *Modeling and Optimization in Mobile, Ad Hoc, and Wireless Networks (WiOpt)*, 12th International Symposium on (pp. 365-372). IEEE, 2014.
- [6] Gnawali, O., & Levis, P. The ETX objective function for RPL, 2010.
- [7] O. Gaddour and A. Koubaa, "Survey RPL in a nutshell: A survey," *Computer Networks*, vol. 56, no. 14, pp. 3163–3178, 2012.
- [8] Osterlind, F., Dunkels, A., Eriksson, J., Finne, N., e Voigt, T. Cross-level sensor network simulation with cooja. In *Proceedings, 31st IEEE Conference on Local Computer Networks*, pages 641–648, 2006.
- [9] Pimenta Jr., A.P., J.M. Abe, Silva, G.C., Determination of operating parameters and performance analysis of computer networks with Paraconsistent Annotated Evidential Logic Et, *IFIP Advances in Information and Communication Technology*, Series ISSN 1868-4238, Volume 488, Springer International Publishing, Number of Pages XXII, 917, 2016, to appear.
- [10] Sobral, J., Rabêlo, R., Oliveira, D., Lima, J., Araújo, H., e Holanda, R. A framework for improving the performance of iot applications. In *The 14th International Conference on Wireless Networks*, pages 134–140. Las Vegas, NV, USA, 2015.
- [11] Thubert, P. Objective Function Zero for the Routing Protocol for Low-Power and Lossy Networks (RPL). RFC 6552, 2012.
- [12] Tsvetkov, T. e Klein, A. RPL: IPv6 routing protocol for low power and lossy networks. *Network*, 59, 2011.
- [13] Winter, T. RPL: IPv6 routing protocol for low-power and lossy networks, RFC 6550, March 2012.
- [14] Brandt, A., Vasseur, J., Hui, J., Pister, K., Thubert, P., Levis, P., Struik, R., Kelsey, R., Clausen, T. H., e

- Winter, T. (2012). RPL: IPv6 Routing Protocol for Low-Power and Lossy Networks. RFC 6550.
- [15] Sharkawy, B., Khattab, A., e Elsayed, K. M. F. (2014). Fault-tolerant rpl through context awareness. In 2014 IEEE World Forum on Internet of Things (WF-IoT), pages 437– 441.



**Alysson Ramirez de Freitas Santos**

É graduado em Tecnologia em Processamento de Dados pela ASSOCIAÇÃO DE ENSINO SUPERIOR DO PIAUÍ - AESPI (2002). Possui pós-graduação em Redes de Computadores pela FACULDADE DE TECNOLOGIA DO PIAUÍ - FATEPI. Tem experiência na área de Gestão de Redes de Computadores, com ênfase em Rede de Cabeamento Estruturado, Servidores com Sistema Linux e Sistemas Linux Desktop. Possui o Posto de 1º Tenente e cargo Chefe da Seção de Tecnologia da Informação da 26ª Circunscrição de Serviço Militar - Exército Brasileiro, Teresina - Piauí. Atualmente cursando Mestrado em Engenharia de Produção pela Universidade Paulista - UNIP.