

# Monitoramento da tripulação de máquinas industriais com Low Energy Beacons aplicando Lógica Fuzzy

Diogo Floriano<sup>1</sup>, Cristiano R. Franco<sup>1</sup>, Márcio G. Jasinski<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Senior Sistemas S/A  
Departamento de Pesquisa Aplicada  
Blumenau – SC – Brasil.

{diogo.floriano,cristiano.franco,marcio.jasinski}@senior.com.br

**Abstract.** *The use of technologies related to Internet of Things (IoT) and Artificial Intelligence (AI) has grown significantly in the past few years, it has been increasingly applied to solve daily problems. This article propose the combination of this technologies to monitor crew of heavy machines. The monitoring is done through the proximity calculation of the workers using Bluetooth Low Energy (BLE) to treat the signal and Fuzzy Logic mixed with Kalman Filter to process the results of that. On the experiments, this solution shown to be capable of increase the precision of the calculated proximity, even in environments that are hostile to the BLE signal.*

**Resumo.** *O uso das tecnologias ligadas à Internet das Coisas (Internet of Things - IoT) e a Inteligência Artificial (IA) cresceu consideravelmente nos últimos anos, sendo cada vez mais aplicadas na resolução de problemas do cotidiano. Este artigo propõe a combinação destas tecnologias na implementação de uma solução para o monitoramento da tripulação de máquinas pesadas. O monitoramento é feito através do cálculo da proximidade de seus operadores, utilizando Bluetooth Low Energy (BLE) para o tratamento do sinal e Lógica Fuzzy combinada com filtro de Kalman para o processamento dos resultados. Nos experimentos realizados a solução foi capaz de melhorar a acurácia da proximidade calculada, inclusive em ambientes hostis ao sinal BLE.*

## 1. Introdução

A evolução dos dispositivos capazes de identificar a posição de um objeto em ambientes fechados vem abrindo portas para novas aplicações na indústria. Estima-se que o mercado de sistemas de posicionamento interno (IPS) movimente em 2019 mais de \$4.4 bilhões de dólares [IndoorAtlas 2016]. No entanto, para adoção em ambiente industrial há uma série de questões que precisam ser validadas, como interferência de sinal e a precisão das soluções.

As tecnologias mais difundidas para localização interna em meio industrial são RFID e Wi-fi. Porém, essas opções são mais complexas de serem implantadas a ponto de identificar a localização de cada funcionário com precisão e um custo aceitável. Uma das principais alternativas para contornar essas limitações é a tecnologia BLE, comumente utilizada nos *beacons*, que permite o envio de sinal *bluetooth* com baixo consumo de energia. O BLE tem autonomia de funcionamento de até 2 anos e alcance de até 50 metros [Yankai Wang 2016].

Através de discussões com responsáveis junto à empresa parceira do projeto, percebeu-se que no ambiente industrial os *beacons* podem ser associados à funcionários, pois são dispositivos portáteis facilmente acoplados ao Equipamento de Proteção Individual (EPI). Assim, é possível fazer a gestão da capacidade de trabalho com o apoio da localização interna. É neste cenário que este trabalho se insere, através da utilização de *beacons* para o controle de tripulação de máquinas industriais. Vale salientar que os funcionários são monitorados somente nas proximidades das máquinas e os *beacons* não são vinculados a eles, ou seja, não se sabe qual funcionário está próximo à máquina, só se sabe a quantidade.

E ainda através desta discussão foi identificado que, no ambiente industrial a configuração de funcionários e responsabilidades para operação de uma máquina é denominada tripulação. A tripulação é composta por diferentes cargos, onde cada um é responsável por ocupar uma posição específica sobre uma ou mais máquinas. Alguns cargos tem flexibilidade para assumir atividades associadas à cargos com menor complexidade, porém o inverso não é verdadeiro. Assim, quando uma máquina é operada sem a quantidade mínima de funcionários capazes de ocupar todas as posições, diz-se que a tripulação está desbalanceada. A consequência de atuar com esse cenário é, em geral, queda na produção, aumento na quantidade de erros e diminuição da qualidade. Fica sob responsabilidade dos encarregados, identificar desfalques na operação e manter a tripulação balanceada. No entanto, esse desafio é raramente bem acompanhado, pois é comum que os funcionários se desloquem para apoiar outras atividades, e devido às proporções do ambiente industrial, não há como identificar de forma rápida quais máquinas estão desbalanceadas.

Para simplificar a gestão da tripulação das máquinas, esse trabalho propõe um sistema de localização interna com BLEs instalados sobre o EPI dos funcionários. Assim, cada *beacon* fica alocado à uma pessoa, com sua respectivas funções e maquinário onde o funcionário deve atuar. O BLE funciona como um dispositivo vestível (*wearable*) que emite sinal para um sensor instalado na máquina que registra a proximidade de toda a tripulação. Assim, o encarregado tem uma visão clara e rápida sobre a situação do balanceamento de cada máquina.

O método proposto, utiliza Filtro de Kalman e Lógica Fuzzy para aprimorar a indicação de proximidade em relação a máquina de referência, uma vez que o sinal BLE oscila consideravelmente [Vicente Cantón Paterna 2017], se faz necessário o uso de recursos para minimizar essas flutuações de sinal. Assim, a solução infere a proximidade de cada funcionário conforme três classificações: perto, próximo e distante.

O presente artigo está organizado da seguinte maneira: a seção 2 trata os trabalhos correlatos, seguida da solução proposta na seção 3, onde são abordados os temas IoT e Lógica Fuzzy. Na seção 4 estão os experimentos realizados e seus resultados e por fim, na seção 5, encontram-se a conclusão e as referências utilizadas.

## 2. Trabalhos relacionados

O uso de BLE para soluções de posicionamento interno se tornou popular com os avanços das tecnologias de IoT. Contudo, existem diversas abordagens possíveis e formatos diferentes para se trabalhar com os *beacons*, podendo alterar consideravelmente o comportamento do sistema. A seleção da abordagem a ser adotada está diretamente relacionada ao

problema específico que se deseja resolver. A seguir estão os trabalhos relacionados que utilizaram técnicas diferentes para resolver problemas similares.

Em [Alessandro Baldini 2016], é proposta uma solução onde o objetivo é identificar a ocupação de cômodos com o auxílio da força do sinal recebido, ou *Received Signal Strength Indication* (RSSI). A ideia parte do princípio de mapear todos os cômodos com um receptor para construir uma matriz de distâncias. De cada espaço mapeado, se obtém uma “âncora” que é posicionada no centro do comodo. Em cada uma das âncoras, é capturado o RSSI por um período de tempo para estimar a força do sinal e construir uma matriz com esses valores. O sinal também passa pelo processo de fuzzificação, classificando-o em “Near”, “Mean” e “Far”. Para estimar a localização, é feito o cálculo da similaridade entre os quartos e as matrizes de distâncias das “âncoras”. O resultado alcançado nesta solução é interessante embora demande um processo detalhado de mapeamento do ambiente, acompanhado de testes de campo para calibrar o funcionamento.

Já [Menegotto 2015] teve por objetivo criar um aplicativo para celular capaz de inferir o posicionamento de agentes móveis em edifícios. Para isso, foram utilizados *beacons* e celulares, sendo que os *beacons* ficam fixos e são cadastrados em um grafo de continuidade para auxiliar no cálculo de inferência. Neste caso, também foi utilizado o sinal RSSI, passando-o por dois filtros: a matriz de continuidade baseada nas leituras capturadas pelo grafo de continuidade; e a continuidade reforçada no cálculo da estimativa de distância. A pesquisa atingiu bons resultados, com uma taxa de acerto de 90%, considerando que a solução tenta estimar o posicionamento aproximado do elemento móvel com uma taxa de erro de 3 a 5 metros.

O trabalho proposto por [Vicente Cantón Paterna 2017] é mais complexo pois busca alcançar a menor taxa de erro no posicionamento interno, diminuindo os custos de soluções convencionais sem depender de mais recursos de hardware. Dentre as técnicas utilizadas estão a trilateração ponderada, o filtro de Kalman e a diversificação de canais. O filtro e a diversificação trabalham juntos para mitigar os problemas com a oscilação do sinal RSSI. Já a técnica de trilateração ponderada busca melhorar os resultados demonstrados em trabalhos correlatos. A pesquisa conseguiu melhorar em até 40% a precisão dos resultados alcançados em outros trabalhos.

Embora a literatura seja rica em trabalhos utilizando BLE como solução de localização interna, existem diversas limitações que precisam ser contornadas, como falta de precisão, necessidade de calibração e até mesmo a utilização de equipamentos mais caros, como *smartphones*. Neste trabalho, o método proposto não exige calibração em ambientes com baixa interferência de sinal, pois utiliza uma abordagem com Filtro de Kalman e Lógica Fuzzy que amenizam o impacto das oscilações. Além disso, o trabalho não foca em indicar posições precisas, pois a proximidade do funcionário em relação à máquina é suficiente para assegurar o bom andamento da produtividade. Finalmente, a solução proposta é aplicada e validada em ambiente industrial, onde a interferência de sinais pode comprometer soluções menos robustas.

### 3. Solução proposta

Para realizar o controle da tripulação das máquinas, a solução proposta utiliza uma arquitetura composta de três camadas distintas. A primeira camada captura o sinal dos *beacons* instalados nos EPIs dos colaboradores, enquanto a segunda camada é composta por um

servidor *Message Queue Telemetry Transport* (MQTT). A terceira camada, por sua vez, é responsável pela aplicação do usuário final, armazenando e recuperando as informações das demais camadas.

Nas seções 3.1 e 3.2 serão detalhadas as tecnologias ligadas à IoT e IA utilizadas nas camadas 1 e 2, respectivamente. A camada 3 não será detalhada neste trabalho, pois não possui cunho científico, tratando-se apenas de uma interface gráfica para apresentar dados ao usuário final.

### 3.1. Internet das Coisas

O termo Internet das Coisas não trata exatamente de uma nova tecnologia, mas sim de uma nova abordagem para Internet, onde ela abrange outros equipamentos eletrônicos, além de computadores [Filho 2016]. Desta forma, ela se torna onipresente e dispersa nos mais diversos locais, pois objetos ou artefatos ligados a IoT se tornam capazes de se comunicar e interagir, atuando de forma autônoma ou sendo influenciados por agentes humanos [Julio Cezar Rutke 2017].

Para este projeto foram utilizados *beacons* enviando sinais via BLE a cada 1 mili segundo. Esse sinal é posteriormente capturado pelo Raspberry Pi, onde um script desenvolvido em Python faz a conversão deste sinal em mensagens que sejam compreensíveis para o aplicativo do usuário final. Estas mensagens contêm o valor para o RSSI referente à força do sinal que o *beacon* está enviando.

Para converter o sinal RSSI em metros, o método utiliza uma fórmula baseada em testes realizados pela comunidade da Estimote, que obtém a melhor relação entre o sinal RSSI em uma distância real [Shane 2016]. Neste trabalho as constantes utilizadas na fórmula foram atribuídas de forma empírica, podendo ser ajustadas para melhorar a precisão dependendo do ambiente a ser trabalhado. A Equação 1, apresenta a fórmula completa utilizada na solução. Os valores RSSI e o Tx Power (força do sinal à 1 metro de distância) são enviadas pelo *beacon* através do sinal BLE.

$$Distancia = \frac{\left(\frac{TxPower - RSSI}{15}\right)^{10}}{10} \quad (1)$$

Após calcular a distância, é utilizado o filtro de Kalman, um método matemático criado por Rudolf Kalman, que através de valores ruidosos ou incertos adquiridos ao longo do tempo, consegue gerar resultados que tendem a se aproximar da realidade [Kalman 1960]. Neste caso, a ação do filtro tende a suavizar as mudanças bruscas no valor da distância, permitindo que elas se alterem de forma mais gradativa, obedecendo um padrão relativo ao longo do tempo.

Por fim, após o processo passar pelo filtro de Kalman e pelo Lógica Fuzzy (tratada em detalhes na seção 3.2), o seu resultado é enviado via protocolo MQTT a um servidor na nuvem, especificando o endereço MAC que originou o sinal, para ser armazenado e apresentado em um aplicativo *web* criado para a solução.

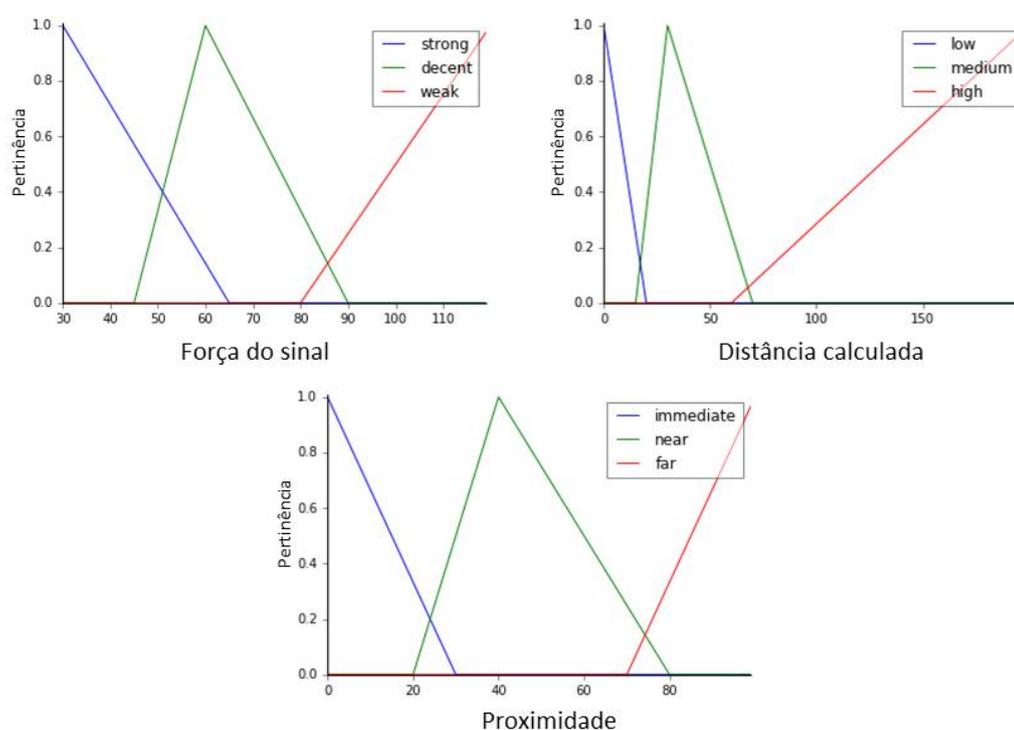
### 3.2. Inteligência Artificial - Transformação da distância em área de proximidade com Lógica Fuzzy

Embora o Filtro de Kalman amenize as oscilações típicas dos BLEs, a precisão da tecnologia ainda é baixa, ficando entre 3 a 5 metros nos melhores casos [Menegotto 2015].

Essa falta de precisão, dificulta analisar a proximidade dos funcionários para calcular a tripulação de cada máquina. Por isso, a solução utiliza a Lógica Fuzzy, que converte os valores numéricos em variáveis linguísticas e facilita a interpretação dos resultados. Essa abordagem, mitiga as incertezas no cálculo da distância e ainda é mais condizente com a demanda da indústria, que apenas necessita gerir a tripulação do maquinário em operação.

Segundo [Vilem Novak 1999], a Lógica Fuzzy é uma lógica onde o valor de saída pode assumir qualquer valor real entre 0 e 1, diferente da lógica clássica que assume apenas valores booleanos, verdadeiro (1) e falso (0). No processo de fuzzificação, existem funções de pertinência, que são criadas para avaliar o grau de pertinência de um resultado, classificando-o no melhor conjunto.

Para este projeto, foram empregadas três variáveis linguísticas: (i) força do sinal, (ii) distância calculada e (iii) proximidade. Os valores para força do sinal foram atribuídos arbitrariamente, enquanto os valores para proximidade e distância calculada foram obtidos com um especialista no domínio. A Figura 1 apresenta os gráficos para as três variáveis linguísticas.



**Figura 1. Variáveis: Força do sinal, Distância calculada e Proximidade**

As funções de pertinência foram criadas sob as variáveis força do sinal e a distância calculada, os valores inseridos nestas regras influenciam diretamente na saída da fuzzificação, que é a proximidade. A força do sinal se refere ao RSSI e está categorizada em *Strong*, *Decent* e *Weak*. A distância calculada é obtida através da fórmula matemática da Equação 1 e é categorizada em *Low*, *Medium* e *High*.

Em um exemplo prático onde a força do sinal for igual a 52 dBm e a distância calculada, já suavizada pelo filtro de Kalman, for igual a 12m, o resultado da aplicação da Lógica Fuzzy mostra que a proximidade é igual a *Immediate* (Figura 2). Isto ocorre

porque a força do sinal ainda é alta (*Strong*) mesmo com a distância sendo quase média (*Medium*).

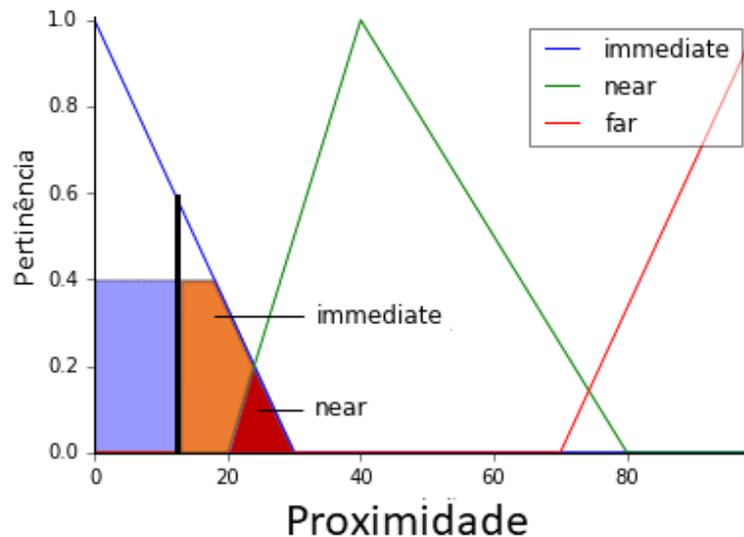


Figura 2. Variável de saída para o cálculo da distância

Neste caso, o grau de pertinência do valor obtido é bastante óbvio, mas se a intersecção ficar entre dois conjuntos, o grau de pertinência é obtido através cálculo da área formada em cada conjunto. Quanto maior a área, maior o grau de pertinência. Na Figura 2 é possível perceber as áreas de cada conjunto destacadas em laranja para *Immediate* e vermelha para *Near*.

#### 4. Experimentos e resultados

Para avaliar a eficácia da metodologia utilizada neste trabalho, foram realizados testes em um ambiente controlado, onde o Raspberry Pi ficou posicionado dentro da sala e um *beacon* foi posicionado em diferentes locais neste ambiente para registrar seu comportamento durante as medições. O *beacon* foi posicionado conforme a representação na Figura 3, nas distâncias de 1.2 metros, 2.4 metros, 3.6 metros, 4.8 metros, 6 metros, 9 metros, 10 metros e 15 metros, sendo monitorado por 1 minuto em cada posição.

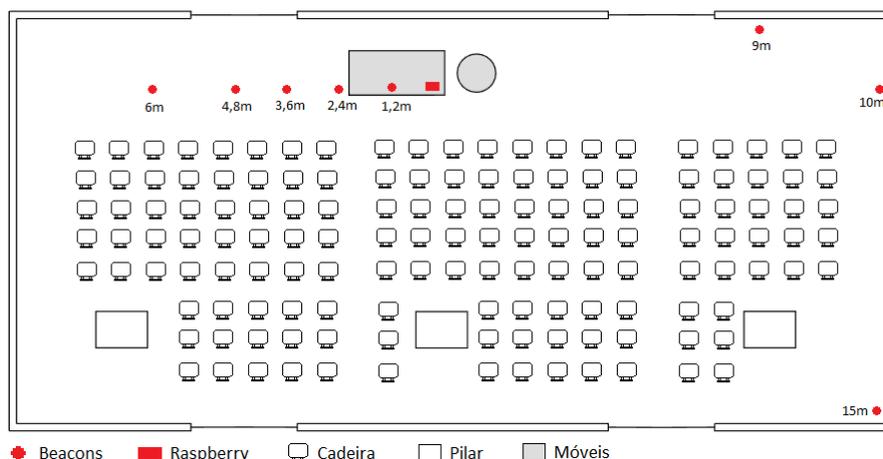


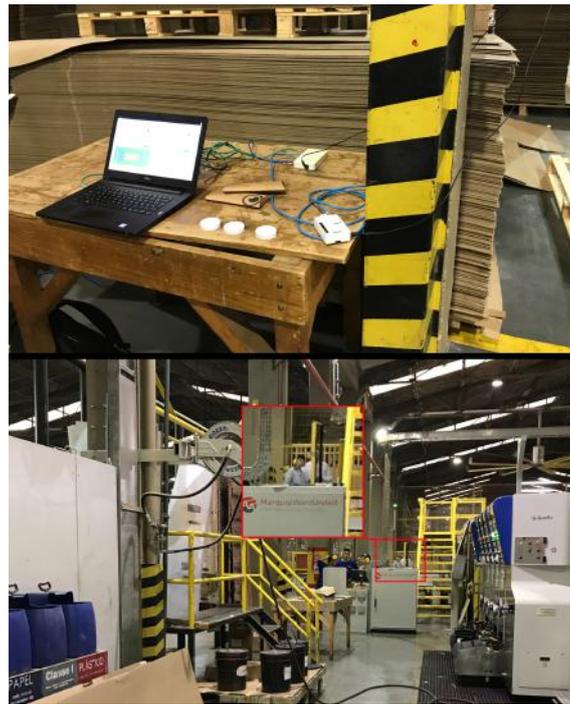
Figura 3. Mapa da representação aproximada das medidas extraídas

No Gráfico 4 está o resultado da aplicação do algoritmo. Pode-se perceber que os sinais recebidos até os 3,6 metros são consistentes e indicam que o *beacon* estaria muito próximo da máquina todo o tempo em que ficou sendo monitorado. Acima dessa distância, começam a aparecer indícios de enfraquecimento do sinal e aos 10 metros percebe-se que pela forma que foi configurada a Lógica Fuzzy, o algoritmo indica que o agente móvel está mais distante e aos 15 metros só se recebe sinais indicando que o mesmo está distante.



Figura 4. Gráfico de proximidade em relação a distância

Esse comportamento pode ser ajustado em testes dentro do ambiente em questão, apenas modificando as funções de pertinência da Lógica Fuzzy. O ambiente tem forte influencia sobre o sinal BLE, fazendo-o oscilar mais do que o normal onde há muita vibração, muitos equipamentos eletrônicos ou muitas paredes entre o *beacon* e o receptor. Por este motivo, é importante avaliar o comportamento do algoritmo no local de implantação (Figura 5).



**Figura 5. Experimentos realizados no ambiente industrial**

Neste ambiente (Figura 5), o algoritmo se comportou da forma esperada. O ruído e a vibração das máquinas não influenciaram suficientemente a força do sinal dos *beacons*, o que permitiu utilizar a solução sem ajustes ou calibração de parâmetros. No quadro destacado em vermelho na Figura 5, o funcionário estava com o *beacon* aproximadamente 20 metros de distância do receptor e o algoritmo continuou a receber o sinal todo o tempo em que ele permaneceu no local, indicando que estava distante. Este comportamento estável se repetiu durante a realização do restante dos testes, o que demonstra a robustez da solução e a aplicabilidade da mesma no ambiente em questão.

## 5. Conclusão

O presente trabalho propôs uma solução capaz estimar a proximidade de agentes móveis com o uso de dispositivos BLE de baixo custo. O objetivo foi aplicar a solução no monitoramento de tripulação de máquinas pesadas para identificar situações de desfalque ou sobrecarga nestas máquinas.

Para conseguir elevar a estabilidade dos valores do RSSI sem se preocupar com sua flutuação, foi utilizado o filtro de Kalman. O cálculo de proximidade foi feito através de Lógica Fuzzy, onde valores numéricos foram transformados em valores linguísticos, combinando a força do sinal e a distância calculada.

Os experimentos realizados em um ambiente controlado, bem como no ambiente industrial, trouxeram bons resultados e indicam que a solução pode ser posta em prática. Percebeu-se que o comportamento do algoritmo é consistente e tende a permanecer desta forma em diversos ambientes e durante longos períodos de tempo.

Ficou comprovada que os resultados obtidos com a aplicação de Kalman e Fuzzy são confiáveis, de modo que é possível também calibrar o cálculo da estimativa de

distância através de testes de campo em ambientes diferentes dos descritos neste trabalho, caso necessário. Isso se aplica especialmente em ambientes hostis para envio do sinal BLE, onde haja muita vibração, obstáculos ou interferência gerada por outras máquinas ou equipamentos.

Como trabalho futuro percebe-se a possibilidade de aumentar a precisão dos resultados e melhorar as orientações aos colaboradores. Estima-se que com o uso de trilateração, através do mapeamento de todas as máquinas do pátio industrial que possuem o receptor, será possível direcionar um colaborador até a máquina mais próxima de sua localização atual.

Por fim, entende-se que o assunto deste trabalho traz margem para avanços tanto na questão da abordagem como na implementação de novas funcionalidades, como por exemplo, transformá-lo em um IPS de fato, incluindo a localização exata do agente móvel. Não obstante, acreditamos que a solução trouxe contribuições para a área de aplicação, sugerindo uma abordagem diferente para a aplicação da Lógica Fuzzy em uma forma de localização interna.

## Referências

- Alessandro Baldini, Lucio Ciabattoni, R. F. F. S. L. A. M. e. A. F. (2016). Room occupancy detection: Combining rss analysis and fuzzy logic. *IEEE*, pages 69–72.
- Filho, M. F. (2016). *Internet das Coisas (Internet of Things)*. UnisulVirtual.
- IndoorAtlas (2016). A 2016 global research report on the indoor positioning market. In *The Rise of Indoor Positioning*. Vanson Bourne.
- Julio Cezar Rutke, J. K. e. M. P. (2017). Localizador de rfids para ambientes internos. *Computer on the Beach*, pages 426–435.
- Kalman, R. E. (1960). *A new approach to linear filtering and prediction problems*. Journal of Fluids Engineering.
- Menegotto, J. L. (2015). Sensoriamento da edificação: Um sistema de localização baseado em beacons ble. *VII Encontro de Tecnologia de Informação e Comunicação na Construção*.
- Shane, A. (2016). Determine accurate distance of signal. Disponível em: <<https://forums.estimote.com/t/determine-accurate-distance-of-signal/2858/5>>. Acessado em: 28 de Março de 2018.
- Vicente Cantón Paterna, Anna Calveras Augé, J. P. A. e. M. A. P. B. (2017). A bluetooth low energy indoor positioning system with channel diversity, weighted trilateration and kalman filtering. *MDPI Open Access Journals*.
- Vilem Novak, I. P. e. J. M. (1999). *Mathematical principles of fuzzy logic*. Kluwer Academic.
- Yankai Wang, Qingyu Yang, G. Z. e. P. Z. (2016). Indoor positioning system using euclidean distance correction algorithm with bluetooth low energy beacon. *IEEE*, pages 243–247.