

Uma solução eficiente para a leitura automática de medidores de energia usando Veículos Aéreos não Tripulados

José R. Torres Neto¹, Daniel L. Guidoni², Jo Ueyama³ e Leandro A. Villas¹

¹ Instituto de Computação – Universidade Estadual de Campinas

² Dept. de Ciência da Computação – Universidade Federal de São João del-Rei

³ Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação – Universidade de São Paulo

jrtorresneto@lrc.ic.unicamp.br, guidoni@ufsj.edu.br

joueyama@icmc.usp.br e leandro@ic.unicamp.br

Abstract. *The most electrical power suppliers to recruit meter readers to carry out collection of power consumption of the consumers. This activity is done manually and can provide error and cause financial and physical losses. Solutions have been proposed in the literature focusing on more efficient routes for meter readers or the use of a car to perform the task remotely, which can increase the cost and have delayed task by problems of transit traffic. To overcome these challenges and constraints, we propose an architecture to automatic meter reading (AMR) system using Unmanned Aerial Vehicles. Two main contributions can be absorbed of this solution: i) the meter readers are no longer needed; ii) reducing the time and distance to carry out the collection of the readings from the power meters. In addition a protocol that ensures wireless communication between the Unmanned Aerial Vehicle and the power meters was designed. The solution was validated and evaluated in an urban environment and the results achieved show a decrease up to 72.6% of time and 45.1% of the distance as compared to the use a car. The communication protocol can avoid at least 98.3% of packet collisions.*

Resumo. *A maioria das empresas fornecedoras de energia elétrica contratam leituristas para realizar a coleta dos consumos de energia dos consumidores. Tal atividade é feita manualmente e pode apresentar erros e causar prejuízos financeiros e físicos. Soluções na literatura têm sido propostas com foco em rotas mais eficientes para os leituristas ou o uso de um carro para realizar a atividade remotamente, o que pode aumentar o custo e ter a atividade atrasada por problemas no trânsito. Para superar estes desafios e limitações, este trabalho apresenta uma arquitetura de sistema automático de leitura de medidores (AMR) utilizando Veículos Aéreos não Tripulados. A solução proposta apresenta duas contribuições fundamentais: i) não é necessário a utilização de leituristas; ii) redução do tempo e da distância para a realização da coleta das leituras dos medidores de energia. Além disso, foi apresentado um protocolo para realizar a comunicação sem fio entre o Veículo Aéreo não Tripulado e os medidores de energia. A solução foi validada e avaliada em um ambiente urbano e obteve uma redução de 72.6% em relação ao tempo necessário para realizar as leituras e 45.1% da distância percorrida em comparação com a solução que utiliza o carro. Além disso, o protocolo de comunicação proposto reduz em 98.3% a colisão de pacotes durante a comunicação de dados.*

1. Introdução

Nos últimos anos, os vários avanços em tecnologias sem fio e sistemas embarcados permitiram o gerenciamento de medição inteligente para medidores das casas dos consumidores. O sistema de leitura automática de medidores (AMR - *Automatic Meter Reading*) corresponde na coleta automática de medidas de medidores de consumo de energia, água ou gás, sem a intervenção humana, com finalidade de analisar dados, faturamento ou identificação de problemas [Khalifa et al. 2011, Li Quan-Xi 2010, Brasek 2004, Siddiqui et al. 2014]. O sistema deve ter um baixo consumo de energia, baixo custo, confiável e seguro, assim pode fornecer medidas com precisão e eficiência [Boukerche et al. 2007, Cao et al. 2008b, Villas et al. 2011, Guidoni et al. 2012a, Guidoni et al. 2012b].

Importantes economias de custos logísticos e operacionais tem sido realidade em empresas distribuidoras de energia [Miao et al. 2009] com o sistema AMR, que não reduz somente os custos operacionais das empresas fornecedoras de energia, gás ou água, como também está ligado diretamente a um eficiente gerenciamento de controle de demandas e monitoramento dos dados [Park et al. 2002]. O sistema AMR tem como objetivo ser utilizado para qualquer tipo de medidor e já vem sendo utilizado em diversos países, e.g., Estados Unidos, Canadá, Austrália, Itália e outros. Conseqüentemente, os sistemas de leitura automática de medidores tem atraído também a atenção de pesquisadores devido a suas vantagens e benefícios [Tuna 2012].

Os sistemas AMR podem ser divididos em três categorias principais [Bittner et al. 2010, Tuna 2012]:

- *à pé*: o leiturista vai em cada casa dos clientes portando um smartphone ou dispositivo similar para a realização da coleta de dados; Esse tipo de sistema também é conhecido como *walk-by*.
- *assistido por veículo*: um funcionário dirige o veículo que possui um coletor de dados que realiza a coleta das leituras por meio de comunicação sem fio entre os medidores e o coletor de dados presente no carro; Esse tipo de sistema também é conhecido como *drive-by*.
- *utilização de redes fixas*: tais redes possuem uma infra-estrutura que conecta os medidores de energia à uma base central, sem a necessidade de intervenção humana. Dessa forma, toda a coleta é feita remotamente;

Os sistemas AMR podem ser com tecnologia com fio ou sem fio quando projetados para funcionar através de uma rede fixa [Li Quan-Xi 2010]. Porém, o sistema AMR sem fio tem um custo menor para planejamento e implantação [Cao et al. 2008b] e pode-se usar uma Rede de Sensores Sem Fio (RSSF) com o objetivo de realizar as leituras e fazer o roteamento de dados [Cao et al. 2008a, Kawai et al. 2008]. O uso de uma rede fixa pode prejudicar os clientes que estão próximos à base central, pois irão receber uma série de leituras para encaminharem, causando o aumento do seu consumo de energia com transmissões e terão um maior custo. Algumas soluções propõem o uso da tecnologia de comunicação *Power Line Carrier* (PLC), porém, ao considerar um meio barulhento, pode ocorrer uma alta atenuação do sinal e susceptibilidade à interferência de dispositivos próximos, resultando em uma alta taxa de perda, além de sua escalabilidade em sistemas AMR ser questionada por trabalhos da literatura [Khalifa et al. 2011, Siddiqui et al. 2014]. Um estudo recente realizado

por [Siddiqui et al. 2014] mostra resultados de sistemas PLC que não conseguiram operar em ambientes com ruídos de alta frequência geradas por dispositivos que utilizam técnica de comutação rápida (e.g., lâmpadas fluorescentes com reator eletrônico, fontes de alimentação chaveadas) afetando seriamente o desempenho do sistema de comunicação, além dos protocolos utilizados não serem documentados publicamente.

A abordagem mais utilizada na maioria dos países é a *walk-by*. Nessa abordagem, o leiturista deve ir em todos os medidores das casas passando por todas as ruas, o que pode demandar bastante tempo, além do tempo para realizar a leitura e o armazenamento manual dos dados dos medidores. Assim como na abordagem *walk-by*, a abordagem *drive-by* também necessita que o carro percorra todas as ruas, estando sujeito a constrangimentos, acidentes e sinais de trânsito. Devido a tais problemas identificados nos sistemas AMR proposto na literatura, este trabalho propõe uma leitura automática de medidores de consumo de energia assistido por um Veículo Aéreo não Tripulado (VANT). O VANT sobrevoa uma determinada área de interesse enviando mensagens de requisição solicitando as leituras de consumo de energia dos medidores. Ao receber a requisição do VANT, o medidor cria um pacote de dados com suas informações e sua leitura atual e responde à solicitação do VANT. Ao receber as informações dos medidores, o VANT armazena as leituras e pode notificar a empresa de energia, usando comunicação via satélite ou infraestrutura 3/4G, ou pode levar os dados para base com seu retorno à origem do voo.

O restante deste trabalho está estruturado da seguinte forma. Na Seção 2, é fornecida uma visão geral dos trabalhos relacionados. A solução proposta é descrita detalhadamente na Seção 3. A Seção 4 apresenta as avaliações de desempenhos e os resultados das simulações. Na Seção 5 é discutido a aplicabilidade da solução proposta. Finalmente a Seção 6 conclui o trabalho com observações e trabalhos futuros.

2. Trabalhos Relacionados

Foram realizados vários estudos propondo metodologias a fim de coletar dados de medidores automaticamente em sistemas AMR, bem como a comunicação de tais medidores [Nhan et al. 2012, Peral et al. 2012, Sharef et al. 2013, Tuna 2012]. Empresas de energia, gás e água possuem esse problema de coleta de dados, por esta razão estes estudos abrangem medidores de todos os serviços e não apenas de um único serviço. Esta Seção relata alguns trabalhos propondo metodologias de coleta de dados de consumo e está dividida em *utilização de redes fixas e assistido por veículo*, categorias do sistema AMR.

2.1. Trabalhos usando redes fixas

Nesta categoria existe uma rede instalada que liga todos os medidores da rede à uma central de dados a fim de realizar a coleta automaticamente dos dados de consumo dos consumidores. Um sistema AMR é proposto e avaliado por Peral et al. [Peral et al. 2012], esse sistema funciona para medidores de água baseado no padrão IEEE 802.15.4 [Han et al. 2008]. O procedimento de balizamento definidos neste protocolo é usado na transmissão e na sincronização dos dados e o sistema é alimentado por baterias. A rede do sistema utiliza uma topologia em árvore usando níveis hierárquicos para diferenciar dispositivos finais e roteadores. Todos os nós (coordenador, roteador ou

dispositivo final) que constituem a rede são equipados pelo mesmo hardware de comunicação, no entanto o nó coordenador possui uma conexão de rede IP a cabo ou sem fio usada para transmitir os dados. Os autores afirmam que a cada rede suporta até 4096 nós e todos os nós apresentam uma autonomia típica de 10 anos. Por outro lado não apresentam alternativas de transmissão de dados quando o nó coordenador perder a conexão com a rede IP, uma vez que o nó coordenador é o principal responsável pelas transmissões.

Em [Sharef et al. 2013] é proposto outro sistema AMR usado para monitorar o consumo de energia, em que é acoplado um leitor analógico emitindo os pulsos do leitor à um módulo transmissor que converte as informações para o sinal digital. Esta monitoração é feita comumente mensal até formar um ciclo, em seguida os dados são transmitidos para uma base de dados central por dispositivos com capacidade de comunicação sem fio. Os experimentos realizados neste estudos apontam que os dados foram transmitidos a uma distância de aproximadamente 91 metros, e os autores afirmam as leituras ainda foram recebidos com precisão pelo módulo receptor quando a distância estava a 200 metros, porém com um leve atraso. No entanto é necessário utilizar alguma metodologia de coleta de dados adicional a esta solução, caso a área seja extensa e exista medidores incapazes de se comunicar diretamente com a estação base.

2.2. Sistemas assistido por veículo

Nesta categoria a coleta dos dados dos consumos dos clientes é feita através de um veículo portando um dispositivo de comunicação sem fio. Um sistema AMR é proposto por [Tuna 2012] a fim de avaliar áreas rurais, onde o veículo utilizado no sistema proposto é um VANT do modelo Hexarotor, que possui asas rotativas e é similar à um helicóptero. Apesar deste modelo apresentar uma baixa autonomia de voo, a decolagem e pouso de forma vertical é uma capacidade que motivou a escolha dos autores, além do VANT poder parar no ar, que é um grande benefício em voos flexíveis. Em contextos rurais é necessário ter uma boa navegação, portanto é obrigatório ter na solução um mapa do ambiente que o VANT sobrevoa e ter também a capacidade de interpretação deste mapa. Desta forma, um sistema de localização e de navegação precisa são muito importantes no sucesso final da solução. O fornecimento de informações precisas de localização e navegação do VANT são os principais foco do artigo, de tal forma que o sistema proposto integra Sistema de Navegação por Inércia (do inglês - INS) e um Sistema de Posicionamento Global (do inglês - GPS). No entanto o artigo não considera o uso de VANTs em áreas urbanas, em que a concentração de nós é maior, e nem citam como é feita a comunicação. Um planejamento de rotas também é importante para a eficiência do VANT na conclusão da coleta de medidores.

Um sistema AMR para a coleta de medidores de energia também é proposto em Nhan et al. [Nhan et al. 2012]. Tal sistema utiliza, acoplado nos medidores, dispositivos de rede sem fio de baixo custo e com um curto alcance de 40 metros, além de sugerirem um nó móvel embutido nos transportes públicos responsável para realizar a coleta de dados dos consumos dos clientes remotamente, assim garante a redução do custo da leitura. O aproveitamento do transporte público motivou os autores, uma vez que o veículo deve se deslocar por um determinado percurso em um itinerário, de modo que não seja necessário ser empregado outro veículo exclusivo para a realização da tarefa (coleta do consumo de energia dos consumidores). Para realizar a leitura dos medidores que não estão localizados no percurso do transporte público, os autores sugerem que seja usado um

nó móvel embutido em motocicletas. Em vários cenários reais mostram que a topologia da rede pode ser desconectada, pois alguns medidores de energia podem estar localizados longe um do outros, excedendo o limite de alcance que é de 40 metros. Portanto [Nhan et al. 2012] foi utilizado na comparação da solução proposta por este trabalho, considerando que todas as ruas do cenário criado serão percorridas pelo veículo.

3. Um Sistema de Leitura Automatizada de Medidores usando VANT

A solução proposta é composta por medidores de energia comunicando-se com o VANT, onde ambos são portadores de um dispositivo com capacidade de comunicação sem fio. Uma determinada área de interesse composta por medidores de energia é sobrevoada pelo VANT que paralelamente envia requisições periódicas solicitando as informações das leituras realizadas pelos medidores. Quando um medidor recebe uma requisição do VANT, ele responde enviando o seu consumo via *unicast*, ou seja, diretamente para o VANT. O VANT envia solicitações *multicast*, pois o VANT carrega um mapa da área de interesse a ser sobrevoada e com isto é possível identificar quais medidores estão ao seu alcance para receber as suas requisições de leitura. Desta forma, também é possível saber quais medidores responderam sua requisição podendo, na próxima requisição *multicast*, enviar uma nova requisição para um nó contido em seu alcance e que não obteve resposta, uma vez que pode existir colisões de mensagens.

O sistema proposto é dividido em duas fases em que a *primeira fase* (Plano de voo) e a *segunda fase* (Protocolo de comunicação) são descritas a seguir:

1. *Plano de voo*: Percurso do VANT para sobrevoar toda a área de medidores de energia.
2. *Protocolo de comunicação*: Comunicação entre o VANT e os medidores de energia

O VANT possui um mapa geográfico que contém uma lista de pontos que o mesmo deve sobrevoar, que são os medidores de energia e suas posições. Ao sobrevoar todos os pontos listados, o VANT terá concluído seu percurso da origem ao destino. Após, o VANT retorna à base. O plano de voo é feito para uma aplicação específica de uma empresa de energia com a finalidade do VANT sobrevoar um número mínimo de pontos abrangendo toda a área de interesse. O plano de voo do VANT considera uma planta (contendo lote e ruas) em um plano cartesiano dos eixos X e Y. Desta forma, o VANT inicia seu voo na base, por exemplo, ponto(0,0), e se move até a posição do próximo ponto(X,Y) listado no mapa. Assim, o VANT se move sempre partindo de sua localização atual até percorrer todos os pontos listados.

Criar um plano de voo otimizado não é uma tarefa fácil e deve-se levar em consideração vários fatores como área de interesse, comunicação utilizada, altitude, velocidade, tempo de vida da bateria instalada no VANT e segurança. Por esse motivo, o foco principal deste trabalho é no problema de comunicação entre o VANT e os medidores de energia. Desta forma, foi utilizado o plano de voo linear nos experimentos realizados. No plano de voo linear, o VANT se move no eixo X (movimento horizontal) e no eixo Y (movimento vertical). O cenário apresentado na Figura 1 mostra a divisão de uma área por quadras (bloco de casas), em que cada quadra é composta por 16 casas, cada casa é composta por um sensor acoplado no medidor de consumo. As setas vermelhas representam a direção em que o VANT se movimenta. O VANT parte da origem (ponto(0,0)) e se move

para direita em linha reta até a extremidade horizontal (ponto $(X_{max},0)$). Em seguida, o VANT se desloca para baixo (eixo Y) e o valor do seu deslocamento será duas vezes o seu raio de comunicação de modo que obedeça o limite de alcance do VANT para os sensores acoplados nos medidores. Ao se deslocar no eixo Y, o VANT se move para esquerda em linha reta até a extremidade horizontal (ponto $(0, Y_{atual})$) e depois novamente no eixo Y, completando um ciclo. O VANT repete o ciclo até chegar na extremidade da área (X_{max}, Y_{max}) e, em seguida, retorna ao ponto de origem.

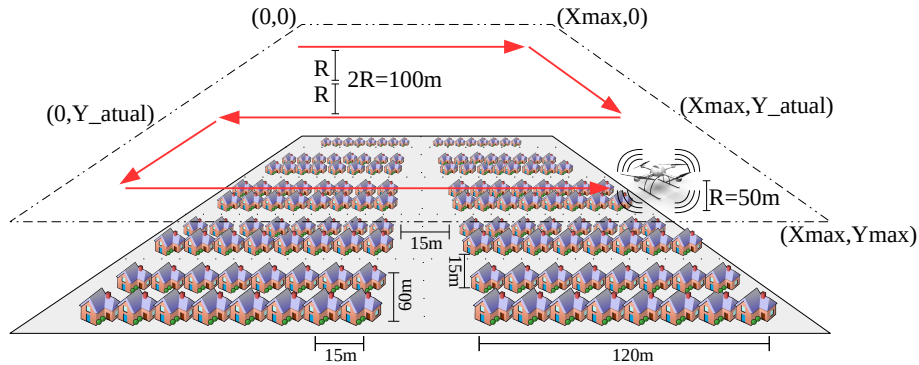


Figura 1. Plano de Voo do VANT no cenário considerado

O Protocolo de Comunicação proposto neste sistema é composto por dois tipos simples de mensagens: i) Mensagem de Requisição: são as mensagens de solicitação do VANT para os medidores, que contém uma lista ID dos medidores que devem responder; e ii) Mensagem de Resposta: são as mensagens que os medidores respondem ao VANT com sua informação de consumo e o ID do medidor.

A figura 2 mostra um fluxograma da solução proposta com os procedimentos realizados no VANT e nos medidores de energia. Os procedimentos acontecem em três ambientes: *Plano de voo*, *VANT* e *medidores*. As setas indicam o sentido do fluxo dos procedimentos. Ao decolar, o VANT agenda uma transmissão para solicitação de leitura dos medidores de acordo com a sua velocidade. Quando o tempo de espera para a transmissão se esgota, o VANT envia uma mensagem de requisição *multicast* com o objetivo de diminuir a quantidade de mensagens transmitidas. As transmissões enviadas pelo VANT são periódicas e paralelas ao seu *plano de voo* sobre o campo de *medidores*. Um temporizador define o intervalo de tempo t das requisições feitas pelo VANT levando em consideração a velocidade média do VANT v e seu raio de comunicação r , como mostra a Equação (1). A cada t o VANT envia mensagens de requisição para os medidores.

$$t = \frac{r}{2v} \quad (1)$$

Nos *medidores de energia*, o nó recebe a requisição do VANT e lê o consumo de energia atual. Em seguida, o nó responde a requisição do VANT. Antes dos *medidores* responderem ao VANT, o nó estima sua distância em relação ao VANT e verifica em qual *slot* está localizado e a janela de tempo do *slot*. Em seguida, o nó computa um valor aleatório dentro da janela de tempo e agenda uma transmissão com o valor obtido (Ver Subseção 3.1). Recebendo as respostas dos medidores, o VANT armazena as leituras de energia com as respectivas informações dos medidores.

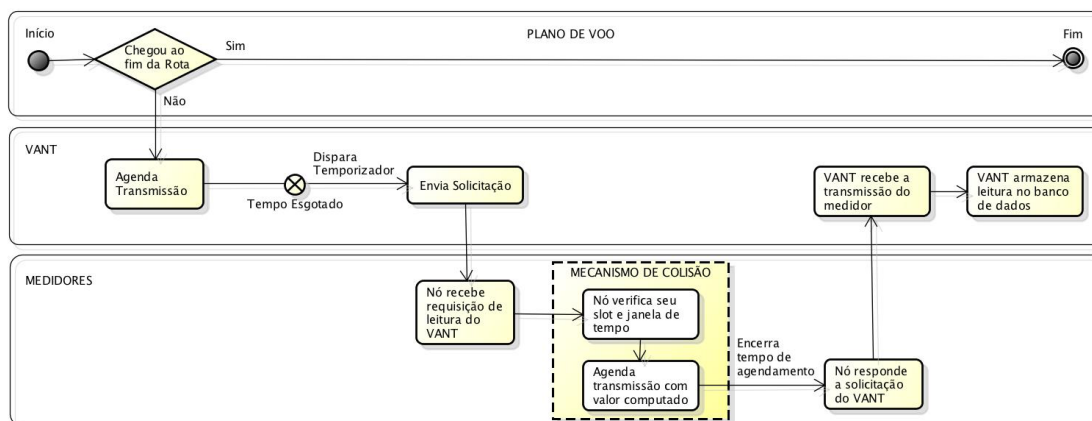


Figura 2. Principais componentes da solução proposta.

3.1. Mecanismo de Colisão

Na forma como ocorrem a troca de mensagens entre o VANT e os medidores, existem desafios que devem ser considerados, e.g. sincronizar o percurso do VANT e o tempo de resposta dos medidores de modo que evite colisões entre pacotes. Diante disso, a velocidade do VANT (nó sink) e o tempo de propagação das mensagens devem ser avaliados [Horácio A.B.F. Oliveira and Loureiro 2010]. O sistema proposto propõe um Mecanismo de Colisão a fim de evitar colisões entre pacotes. Este mecanismo pode ser detalhado da seguinte forma:

- i) *Divisão do campo de alcance* : O raio de comunicação do VANT abrange uma área limitada, que dividimos em 3 slots de tamanho de largura igual.
- ii) *Cálculo da distância estimada*: Ao receber a mensagem de requisição do VANT, cada nó calcula sua distância estimada em relação ao VANT.
- ii) *Agendamento da resposta*: De acordo com a distância estimada encontrada pelo nó, é computado um valor de tempo de espera para que o nó responda a solicitação do VANT.

A *Divisão do campo de alcance* pode ser visualizado na Figura ??, em que separa os nós por slots de acordo com sua distância estimada. Desta forma, cada slot atribui um comportamento diferente para os nós que estão contidos em sua área. Tal comportamento é decisivo no momento de resposta da requisição do VANT. É importante salientar que um nó só pode estar incluído em apenas um slot. Porém, em um primeiro momento, ao receber uma requisição, um nó pode estar em um determinado slot e em um segundo momento, ao receber outra requisição para retransmitir suas informações, o mesmo nó pode estar localizado em outro slot diferente do slot no primeiro momento. Isto acontece porque o VANT transmite requisições periódicas enquanto se desloca pela área de interesse. Além disso, isso acontece porque o VANT reenvia requisições para os nós que não obteve resposta.

Para realizar *Cálculo da distância estimada*, foi usado a técnica do indicador de intensidade do sinal recebido (RSSI) [Wu et al. 2008], que é a técnica mais utilizada para estimar a distância entre dois nós, pois utiliza apenas o rádio transmissor/receptor para a comunicação e nenhum outro hardware. A técnica de RSSI também não utiliza ne-

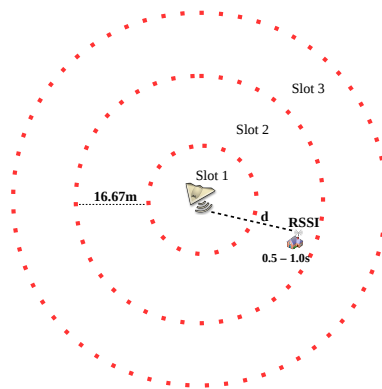


Figura 3. Mecanismos de Tratamento de colisões

nhuma mensagem de controle para estimar a distância, como é feito em outras técnicas de estimativa de distância [Villas et al. 2013, Cardoso et al. 2014]. O VANT envia sua posição atual acoplada em toda mensagem de requisição de leitura dos medidores para que o medidor estime sua distância em relação a posição do VANT usando RSSI. Esta distância estimada encontrada definirá o *slot* que o nó está localizado. A velocidade do VANT, distância estimada e tempo de propagação da mensagem são fatores importantes que precisam ser avaliados para a definição do intervalo em que o medidor responderá a solicitação do VANT. A Equação $t = \frac{d}{3108 \text{ m/s}}$ foi considerada para definir o tempo em que o VANT receberá uma mensagem dos medidores, onde t é o tempo que os medidores enviam suas leituras, d é a distância estimada do medidor em relação ao VANT e 3.108m/s é a velocidade de propagação de uma mensagem utilizando o protocolo IEEE 802.11.

O *Agendamento da resposta* é obtido baseado na tabela 1, onde cada *slot* possui uma janela de tempo. Uma vez obtida a distância estimada, o nó verifica em qual *slot* está localizado para efetuar sua transmissão de resposta. Conhecendo seu *slot*, o nó computa um valor aleatório dentro do intervalo estabelecido pela tabela 1. Para cada *slot*, o valor computado é o tempo em que o nó responderá a requisição do VANT. Em seguida o nó efetua a transmissão de sua leitura no valor de tempo computado.

Intervalo de Tempo	
Slot 1	1.0s - 1.5s
Slot 2	0.5s - 1.0s
Slot 3	0.0s - 0.5s

Tabela 1. Intervalo de Tempo do Mecanismo de Colisão

4. Avaliação de desempenho e Discussão dos Resultados

Os parâmetros de configuração e os resultados da avaliação de desempenho realizada por meio de simulações serão mostrados nesta Seção. É importante que o grupo já realizou experimentos reais com um VANT comunicando-se com uma RSSF no solo, como é apresentado resultados em [Faiçal et al. 2014]. Neste trabalho em particular, foram realizados experimentos com simulações utilizando o simulador Sinalgo [Sinalgo 2014]. É importante salientar que o simulador Sinalgo não simula colisão entre mensagem. Dessa forma, foi implementada uma detecção de colisão no Sinalo.

4.1. Configuração do Cenário

As simulações realizadas foram feitas com o objetivo de realizar estudos de análise do sistema de leitura automática de medidores proposto, em que o VANT sobrevoa uma determinada área de interesse coletando as informações dos medidores de consumo de energia dos clientes. Para isso, o sistema proposto utilizando um VANT foi comparado com outras duas abordagens: i) Abordagem *assistido por veículo* (Carro) - onde o veículo equipado com uma interface de comunicação sem fio passa por todas as ruas coletando as informações de consumo de energia dos clientes; e ii) Abordagem *a Pé* - onde uma pessoa caminha por todas as ruas e passa por todos os medidores da área de interesse portando um *smartphone*, ou dispositivo similar, para coletar as informações dos medidores de consumo de energia dos clientes. A leitura automática de medidores proposta por [Nhan et al. 2012] foi utilizada como base na abordagem do veículo.

No cenário criado para realizar as avaliações, foi considerado um bairro típico no Brasil com medidas 15mx30m de largura e fundo do lote e com ruas de 15m de largura (Ver Figura 1). Foi considerado também diferentes parâmetros reais nas configurações do simulador, tais como o VANT e nós sensores (MicaZ). Os parâmetros utilizados nas simulações são apresentados na Tabela 2.

Parâmetros para o VANT, Carro e a Pé	
Velocidade VANT	14 m/s
Intervalo de Requisição do VANT	1.5 s
Velocidade do Carro	7 m/s
Intervalo de Requisição do Carro	2.4 s
Velocidade da Pessoa	1.3 m/s
Raio de Comunicação (VANT, Carro, Sensor)	50 m
Número de medidores	3000, 6000, 9000, 12000 e 15000

Tabela 2. Valores dos Parâmetros de Simulação

As métricas utilizadas nas avaliações de todas as abordagens foram distância e tempo (Seção 4.2). Analisamos também o desempenho da solução proposta em dois momentos com relação às transmissões efetuadas. No primeiro momento o VANT se comunica com os medidores de energia através de transmissões realizadas sem o uso do mecanismo de colisão, enquanto que no segundo momento utiliza-se o mecanismo de colisão para as transmissões. Os resultados foram obtidos considerando-se 95% de intervalo de confiança.

4.2. Resultados das simulações

A avaliação da distância percorrida por cada abordagem (*VANT, Carro, a Pé*) é apresentada na Figura 4(a), em que foi considerado diferentes tamanhos de bairros e quantidade de clientes. As rotas das abordagens *Carro* e *a Pé* têm suas rotas limitadas pelas ruas da cidade, o que não acontece no plano de voo do VANT. Isso acontece devido ao fato que a rota calculada na abordagem proposta não tem restrições topológicas, uma vez que o VANT sobrevoa a área de interesse considerando apenas os medidores dos clientes. Isto torna a distância percorrida pelo VANT menor em comparação com as outras abordagens. A Figura 4(a) mostra que quando a rede possui 3000 nós (medidores de clientes), a distância percorrida pelo VANT é 1.72 e 5.11 vezes menor quando comparado ao Carro e a Pé, respectivamente. O mesmo comportamento acontece quando comparamos a rede com

15000 nós, em que o VANT apresenta o percurso 1.80 e 5.70 vezes menor que o Carro e a Pé, respectivamente. É importante observar que ao aumentar a quantidade de nós, o tamanho da área de interesse aumenta.

A avaliação de tempo necessário para a realização da coleta dos dados dos medidores de energia feita por cada abordagem (*VANT, Carro, a Pé*) é apresentada na Figura 4(b). Os valores das velocidades utilizadas nos cenários de simulação para cada abordagem são os valores apresentados na Tabela 2. Tais valores são dados reais de um VANT disponível no mercado. O tempo para o Carro percorrer as ruas não considera congestionamento ou sinal. Com relação ao percurso do leiturista, foi considerado uma Caminhada de uma pessoa, onde o leiturista tem 10 segundos para realizar a medição e armazenar o valor. Pode ser observado na Figura 4(b) que o tempo que o VANT leva para percorrer toda a área de interesse é menor em comparação com as outras abordagens. Por exemplo, quando a rede possui 3000 nós o VANT percorre a área de interesse em um tempo 3.43 e 55.03 menor que o Carro e a Pé, respectivamente. Da mesma forma em uma rede de 15000 nós, o VANT leva 3.61 e 61.43 vezes menos tempo necessário para concluir sua rota comparando com as abordagens Carro e a Pé, respectivamente.

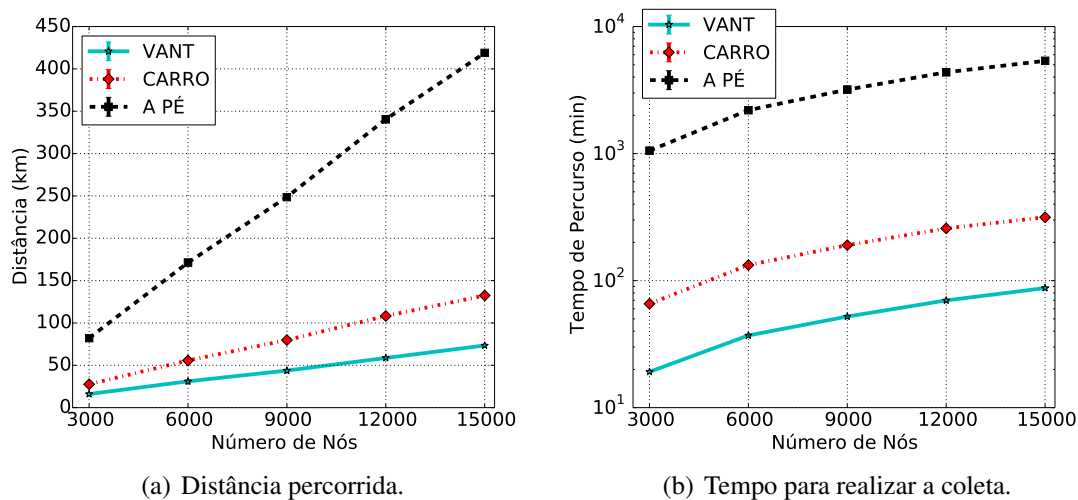


Figura 4. Resultados de Simulação

A abordagem *a Pé* é a mais utilizada na maioria dos países, porém, nesta abordagem, a pessoa faz a coleta das informações dos medidores de energia ao caminhar por todas as ruas. Além do tempo da caminhada, deve-se também considerar o tempo de leitura do medidor e armazenamento das informações para cada medidor. Isto não é necessário nas abordagens do *Carro* e *VANT*, pois a coleta é realizada usando comunicação sem fio. Porém, na abordagem *Carro*, o veículo percorre todas as ruas em sua rota, o que pode existir problemas de tráfego e sinais de trânsito, diferente do VANT que leva em consideração apenas os medidores dos clientes e não as ruas. Portanto, a abordagem do VANT tem a distância percorrida e o tempo de percurso menor que as outras abordagens.

4.2.1. Avaliação do sistema proposto com diferentes configurações

Nas simulações realizadas, foi considerado diferentes parâmetros de velocidades do VANT, e.g. 10, 12, 14, 16 e 18m/s. Na Figura 5 é possível observar que quando aumenta a velocidade, o tempo para sobrevoar toda a área de interesse diminui.

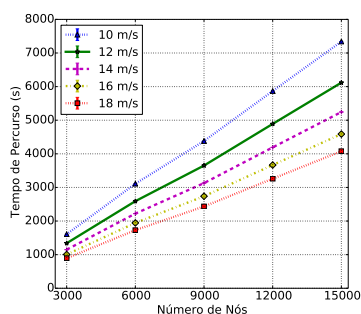


Figura 5. Velocidade do VANT

Um mecanismo de tratamento de colisões foi proposto e avaliado neste trabalho a fim de diminuir a quantidade de perdas de pacotes nas trocas de mensagens entre o VANT e os medidores de energia (ver Figura 6). A quantidade de mensagens transmitidas na solução proposta pode ser visualizada na Figura 6(a). É possível notar que utilizando o mecanismo de tratamento de colisões, a quantidade de mensagens transmitidas no meio diminui drasticamente, uma vez que o VANT transmite menos mensagens de requisição. É importante observar que considerando n o número de medidores, a quantidade de mensagens transmitidas pelo VANT é aproximadamente n quando a solução usa o mecanismo de colisão. Isto acontece porque o mecanismo proposto realmente evita colisões e o VANT precisa fazer menos retransmissões de solicitações. A Figura 6(b) mostra a taxa de cobertura obtida nos resultados com o uso do mecanismo de colisão e sem o mecanismo. Quando o mecanismo de colisão não é usado, houve uma grande perda de mensagens, e.g., cerca de 40% e 50% de cobertura de mensagens entregues. Considerando o mecanismo de controle de colisão, houve uma taxa média de cobertura a cerca de 100% de mensagens entregues. É importante observar que em ambos os casos, temos colisões. Entretanto, quando o mecanismo proposto é utilizado, existe uma maior taxa de entrega (ver Figura 6(b)) com menos colisões (ver Figura 6(c)).

5. Aplicabilidade

O modelo do VANT proposto para a solução de coleta de leitura automática de medidores de energia é o Microkopter ARF Okto XL 6S12, que está na classificação de helicópteros e é alimentado por bateria com tempo de vida de 40 minutos. Este modelo é equipado com um GPS e permite que a empresa de energia monitore o percurso do VANT em tempo real. O uso de um VANT pode melhorar também outros serviços da empresa fornecedora de energia, por exemplo, quando o sistema de energia for interrompido, a empresa pode receber essa informação pelo VANT, reduzindo o tempo da notificação de que o sistema não está funcionando. Além disso, o VANT também pode informar condições meteorológicas ou gravar vídeos de áreas com problemas.

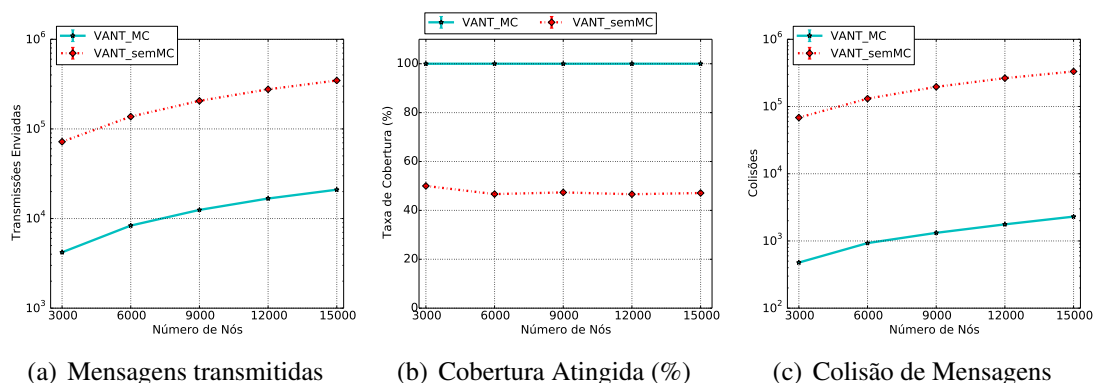


Figura 6. Avaliação do Mecanismo para Evitar Colisões

Atualmente o uso do VANT em aplicações no Brasil precisa de autorização das autoridades legais, pois ainda não existe uma regulamentação concluída. O projeto de lei PL 16/15 está em andamento para a regulamentação do uso de VANTs que atendam alguns critérios como: a pesquisa e desenvolvimento científico, desde que chancelados por órgão acadêmico nacional ou apoiado pelo Ministério de Ciência e Tecnologia e Inovação. Outra preocupação com o uso de VANT são colisões com obstáculos. Entretanto, é possível acoplar um dispositivo sonar ou um *scanner* à laser a fim de identificar obstáculos. A análise do relatório dos dados coletados pode ser facilmente identificado se houve perda de dados, assim, o tempo que a empresa de energia leva para reparar o problema também pode diminuir.

6. Conclusão

Foi apresentado neste artigo uma nova solução para realização da leitura automática de medidores de energia usando Veículo Aéreo Não Tripulado e medidores de energia portando uma interface de comunicação sem fio. Com base nos resultados apresentados, a solução proposta possui melhores resultados quando comparada com as abordagens *a Pé* e *assistida por veículo*. Os resultados mostram um ganho de pelo menos 72% e 45% em relação ao tempo gasto no percurso e a distância percorrida em comparação com as abordagens *a Pé* e *assistida por veículo*. O mecanismo de tratamento de colisão torna a troca de mensagens eficiente com ganho de 98.3%. Os resultados mostram que o sistema proposto pode ter baixo custo operacional quando comparado às soluções da literatura, além de realizar a tarefa em um menor período de tempo.

Agradecimentos

Os autores agradecem o CNPq por meio dos processos 473493/2013-6, 147356/2013-0 e 486332/2013-6, à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG).

Referências

Bittner, M., Widmer, H., Pajot, A., Alberdi, G., Hohl, H., and Kmethy, G. (2010). Energy project no 226369. Technical report, funded by the European Commission, OPEN meter.

- Boukerche, A., Araujo, R., and Villas, L. (2007). A novel qos based routing protocol for wireless actor and sensor networks. In *Global Telecommunications Conference, 2007. GLOBECOM '07. IEEE*, pages 4931–4935.
- Brasek, C. (2004). Urban utilities warm up to the idea of wireless automatic meter reading. *Computing & Control Engineering Journal*, 15(6):10 – 14.
- Cao, L., Tian, J., and Liu, Y. (2008a). Remote real time automatic meter reading system based on wireless sensor networks. In *Proceedings of the 2008 3rd International Conference on Innovative Computing Information and Control, ICICIC '08*, pages 591–595.
- Cao, L., Tian, J., and Liu, Y. (2008b). Remote wireless automatic meter reading system based on wireless mesh networks and embedded technology. In *Embedded Computing, 2008. SEC '08. Fifth IEEE International Symposium on*, pages 192–197.
- Cardoso, C., Guidoni, D., Maia, G., Ueyama, J., Loureiro, A., and Villas, L. (2014). An energy consumption aware solution for the 3d localization and synchronization problems in wsns. In *Computer Networks and Distributed Systems (SBRC), 2014 Brazilian Symposium on*, pages 376–385.
- Faiçal, B. S., Costa, F. G., Pessin, G., Ueyama, J., Freitas, H., Colombo, A., Fini, P. H., Villas, L. A., Osório, F. S., Vargas, P. A., and Braun, T. (2014). The use of unmanned aerial vehicles and wireless sensor networks for spraying pesticides. *Journal of Systems Architecture - Embedded Systems Design*, 60(4):393–404.
- Guidoni, D., Boukerche, A., Villas, L., Souza, F., Mini, R., and Loureiro, A. (2012a). A framework based on small world features to design hsns topologies with qos. In *Computers and Communications (ISCC), 2012 IEEE Symposium on*, pages 000732–000737.
- Guidoni, D. L., Boukerche, A., Villas, L. A., de Souza, F. S., Oliveira, H. A., and Loureiro, A. A. (2012b). A small world approach for scalable and resilient position estimation algorithms for wireless sensor networks. In *Proceedings of the 10th ACM International Symposium on Mobility Management and Wireless Access, MobiWac '12*, pages 71–78, New York, NY, USA. ACM.
- Han, Y., Wang, Z., Li, L., and Zhao, Y. (2008). A fast automatic gain control scheme for ieee 802.15.4 receiver. In *Wireless, Mobile and Multimedia Networks (ICWMMN 2008), IET 2nd International Conference on*, pages 167–170.
- Horácio A.B.F. Oliveira, Raimundo S. Barreto, A. L. F. E. F. N. and Loureiro, A. A. (2010). Envio de dados de consulta para sinks móveis em alta velocidade em redes de sensores sem fio. *28o Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos (SBRC 2010)*, pages 75–88.
- Kawai, T., Wakamiya, N., Murata, M., Yanagihara, K., Nozaki, M., and Fukunaga, S. (2008). A sensor network protocol for automatic meter reading in an apartment building. In Miri, A., editor, *Wireless Sensor and Actor Networks II*, volume 264 of *IFIP – The International Federation for Information Processing*, pages 173–184. Springer US.

- Khalifa, T., Naik, K., and Nayak, A. (2011). A survey of communication protocols for automatic meter reading applications. *Communications Surveys Tutorials, IEEE*, 13(2):168–182.
- Li Quan-Xi, L. G. (2010). Design of remote automatic meter reading system based on zigbee and gprs. *Proceedings of the Third International Symposium on Computer Science and Computational Technology(ISCST '10)*, 2(1):186–189.
- Miao, D., Xin, K., Wu, Y., Xu, W., and Chen, J. (2009). Design and implementation of a wireless automatic meter reading system. In *Proceedings of the 2009 International Conference on Wireless Communications and Mobile Computing: Connecting the World Wirelessly, IWCMC '09*, pages 1345–1349, New York, NY, USA. ACM.
- Nhan, N.-Q., Vo, M.-T., Nguyen, T.-D., and Huynh, H.-T. (2012). Improving the performance of mobile data collecting systems for electricity meter reading using wireless sensor network. pages 241–246.
- Park, B., Hyun, D., and Cho, S. (2002). Implementation of amr system using power line communication. In *Transmission and Distribution Conference and Exhibition 2002: Asia Pacific. IEEE/PES*, volume 1, pages 18–21 vol.1.
- Peral, J., Merlo, E., Labrador, R., Torralba, A., Carvajal, R. G., Gil, M., Villalba, D., Grande, A., Moreno, M., and Viguera, J. (2012). Automated meter reading based on iee 802.15.4. In *IECON 2012 - 38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*, pages 5996–6001.
- Sharef, Z. T., Isa, A., Hasan, A., Toorani, A., and Yadgar, A. R. A. (2013). Automated meter reading system based on basic stamp2 microcontroller. *Asian Journal of Scientific Research*, 6(1):88–97.
- Siddiqui, B., Pakonen, P., and Verho, P. (2014). Experience of communication problems in plc-based amr systems in finland. In *Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT-Europe), 2014 IEEE PES*, pages 1–6.
- Sinalgo (2014). Simulator for network algorithms. Distributed Computing Group - ETH-Zurich.
- Tuna, G. (2012). Performance evaluations on uav-aided automated meter reading. *Int J Adv Robotic Sy*, 9(229).
- Villas, L., Boukerche, A., Guidoni, D. L., Oliveira, H. A., Araujo, R. B., and Loureiro, A. A. (2011). Time-space correlation for real-time, accurate, and energy-aware data reporting in wireless sensor networks. In *Proceedings of the 14th ACM International Conference on Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems, MSWiM '11*, pages 59–66, New York, NY, USA. ACM.
- Villas, L., Guidoni, D., and Ueyama, J. (2013). 3d localization in wireless sensor networks using unmanned aerial vehicle. In *Network Computing and Applications (NCA), 2013 12th IEEE International Symposium on*, pages 135–142.
- Wu, R.-H., Lee, Y.-H., Tseng, H.-W., Jan, Y.-G., and Chuang, M.-H. (2008). Study of characteristics of rssi signal. In *Industrial Technology, 2008. ICIT 2008. IEEE International Conference on*, pages 1–3.