

Avaliação do Consumo Energético em Redes de Sensores Sem Fio Utilizando um Veículo Aéreo Não Tripulado como Coletor de Dados

Nicolas Borges da Silva, Jean Roberto Antunes, Tauã Milech Cabreira*,
Lisane Brisolara de Brisolara*, Paulo R. Ferreira Jr.* e Júlio C. B. de Mattos*

* Programa de Pós-Graduação em Computação (PPGC)
Centro de Desenvolvimento Tecnológico (CDTec) / Computação
Universidade Federal de Pelotas (UFPEL)
Pelotas/RS, Brasil

{jrantunes, nbdsilva, tmcabreira, lisane, paulo, julius}@inf.ufpel.edu.br

Resumo—Este trabalho apresenta um estudo do consumo de energia de uma rede de sensores sem fio usando um veículo aéreo não tripulado (VANT) para realizar a tarefa de coleta de dados em uma rede de sensores sem fio. O trabalho está dividido em duas etapas. Na primeira etapa analisa-se a energia gasta durante a comunicação entre os nodos. Na segunda etapa avalia-se o consumo de energia de um VANT pairando, enquanto ele usa um nodo embarcado para trocar informações com um nodo no solo. O VANT utilizado é um quadricóptero com motores de 180W e uma bateria LiPo de 14.8V. Já os nodos são compostos de placas de Arduino Uno com um conjunto de módulos de comunicação sem fio XBee alimentados por baterias de 5V. Nos experimentos práticos, o VANT paira em diferentes altitudes (20-25m, 25-30m e 30-35m), comunicando-se com um nodo no solo. A corrente drenada exclusivamente durante a comunicação entre os nodos varia entre 40mA e 60mA, enquanto que a corrente drenada durante os voos varia entre 12.96A e 24.3A, 10.06A e 20.82A, 12.45A e 22.9A, respectivamente. Com isso, pode-se concluir empiricamente que é viável a utilização de um VANT, voando em altitudes seguras (entre 20m e 35m) e com o emprego da tecnologia de comunicação estudada, como coletor de dados em uma rede de sensores sem fio, sem impacto significativo em seu consumo de energia.

Index Terms—Consumo de Energia, Redes de Sensores Sem Fio, Veículos Aéreos Não Tripulados, Coletores Móveis de Dados (Mulas)

I. INTRODUÇÃO

As Redes de Sensores Sem Fio (RSSF) têm sido aplicadas nas mais diversas áreas [1]. Cada diferente aplicação que utiliza rede de sensores sem fio gera desafios que devem ser considerados no momento da implementação e distribuição dos nodos da rede tais como o ambiente com muitos obstáculos que interferem na comunicação interna da rede, os recursos limitados dos nodos (bateria interna, processamento e memória), a largura de banda na comunicação, entre outros [2].

Em algumas aplicações faz-se necessária a utilização de uma rede de sensores sem fio em larga escala. Nestes tipos de aplicações surgem outros desafios que podem ser destacados:

como será feito o processamento dos dados e onde será feito tal processamento, se é mais eficiente utilizar uma distância maior entre os nodos para cobrir uma área maior, mas tendo o risco de dificultar ou aumentar o gasto energético com a comunicação entre os nodos ou, ao invés disso, utilizar mais nodos para cobrir tal área.

Em RSSF, alguns tipos de processamento ou comunicação realizados nos nodos são custosos energeticamente para serem processados nos próprios nodos. Além disso, por vezes nem todos os nodos precisam se comunicar com uma central de processamento diretamente. [3] propõe a utilização de *clusters* que consistem de “times de nodos” que cooperam entre si na obtenção de dados e a nomeação de um *cluster head*, que consiste numa espécie de “líder”, com a função de juntar os dados, processá-los e/ou enviá-los para uma central de processamento. Esta técnica melhora o consumo energético da rede, pois somente os *clusters heads* se envolvem com uma comunicação de um alcance maior, a qual consome mais energia. Neste contexto, [4] propõe diferentes tipos de algoritmos para que a rede escolha os *clusters heads* com as melhores localizações para a transmissão de dados, assim potencializando ainda mais a melhora no consumo energético da rede.

Considerando que a comunicação entre os *clusters heads* e uma central de processamento também pode ser um problema em termos de custo de comunicação e energia, pode-se utilizar um Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT) como uma espécie de “mula”. O VANT pode percorrer a rede coletando os dados nos *clusters heads* e, até mesmo, em todos os sensores da rede, retornando para a central de processamento. Desta forma, os *clusters heads* ou demais sensores podem utilizar transmissores com pouco alcance, cujo consumo energético é inferior aos de longo alcance. Com isso, amplia-se a vida útil da rede de sensores sem fio, já que o VANT pode ser recarregado no retorno à base quando a missão é concluída.

A utilização de um VANT para a coleta dos dados da rede também gera desafios. O principal deles é com relação à conclusão da missão, ou seja, coletar os dados de toda a rede,

Paulo R. Ferreira Jr. é auxiliado por uma bolsa individual do CNPq, processo número 308487/2017-6.

antes que sua bateria acabe. [5] propõe um método efetivo para a coleta dos dados energeticamente eficiente. Inicialmente, a rede inteira encontra-se num estado “dormindo”. Quando o VANT sobrevoa tal rede, os nodos que vão entrando no raio de transmissão do VANT acordam, fazem o sensoriamento e enviam os dados para o *cluster head*. Este, por sua vez, reúne os dados e envia para o VANT. Os nodos voltam para o estado “dormindo” no momento em que saem do raio de transmissão do VANT. Este método é útil somente quando o objetivo da aplicação é obter os dados no momento em que o VANT é utilizado, pois fora destes momentos, a rede encontra-se “dormindo”, ou seja, não realizando o sensoriamento.

Outro método proposto por [5] é a utilização de prioridade de transmissão entre os nodos. Dentro do raio de transmissão do VANT com a rede, existem locais de prioridade: os nodos que se encontram na região mais traseira do VANT, no raio de transmissão, possuem prioridade maior que nas outras regiões, sendo que esta prioridade vai diminuindo em direção a parte dianteira do VANT. Assim os nodos que estão prestes a sair do raio têm prioridade de transmissão com relação aos que estão no meio do raio e os recém cobertos pelo raio.

Este trabalho apresenta uma análise do consumo de energia em uma Rede de Sensores Sem Fio que utiliza Veículos Aéreos Não Tripulados para a coleta dos dados da rede. A partir da implementação de um protocolo de comunicação entre o VANT com um nodo embarcado e a RSSF, analisou-se a consumo energético relacionado à comunicação entre os nodos. Três voos foram realizados com o VANT pairando em diferentes altitudes sobre um nodo no solo. Também foram analisados o consumo de energia para a realização dos voos e sua relação com a altitude adotada.

O restante do trabalho está organizado da seguinte forma: Seção 2 apresenta a fundamentação teórica composta da apresentação das RSSF e dos VANTs; Seção 3 aborda os trabalhos relacionados em relação aos tópicos de pesquisa estudados; Seção 4 explica a metodologia do trabalho e como foram realizados os experimentos e suas medições; Seção 5 discute acerca dos resultados obtidos; Seção 6 apresenta as conclusões do trabalho, assim como a perspectiva de trabalhos futuros.

II. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A. Redes de Sensores Sem Fio

Com os avanços ao longo dos anos das tecnologias de microeletrônica, comunicação sem fio (*wireless*) e componentes digitais, atualmente é possível a produção de componentes de sensoriamento de baixo custo, baixo consumo e multifuncionais. Estes componentes, normalmente feitos com tamanho reduzido, realizam tarefas de sensoriamento, processamento de dados e transmissão e recepção de dados. Tais componentes, no contexto das redes de sensores sem fio, são denominados de nodos. Uma rede de sensores é composta por uma grande quantidade de nodos, os quais são depositados dentro do local de interesse.

Em algumas redes de sensores sem fio os nodos podem ser equipados somente com uma fonte de bateria limitada. Em

alguns cenários de aplicação, o reabastecimento da bateria, pode se tornar inviável, nestes casos, o tempo de vida da rede corresponde a energia inicialmente disponível na bateria [6]. Assim, uma das mais importantes questões em redes de sensores é o requisito de baixo consumo energético. Tal objetivo pode ser alcançado através de técnicas de gerenciamento, algumas dando a opção para o usuário sacrificar a frequência de transmissão de dados entre nodos, reduzir a banda de dados nas conexões, entre outras técnicas para prolongar a vida útil da rede.

O protocolo *ZigBee* foi desenvolvido para suportar dispositivos simples que consomem energia mínima e normalmente operam no espaço operacional de pequenas distâncias. O *ZigBee* fornece redes de malha com auto-organização, *multi-hop* e confiáveis com longa duração da bateria. Através deste protocolo os nodos comunicam-se entre si até que a mensagem chegue em um nodo especial que tenha comunicação com o sistema. Chamamos esse nodo de sorvedouro e ele, normalmente, está equipado com mais recursos de comunicação e energia que os demais.

Uma forma alternativa de comunicação entre uma rede de sensores sem fio e o sistema ao qual ela se reporta é através de coletores móveis de dados, também conhecidos como mulas. As mulas fazem a coleta dos dados se aproximando dos nodos e realizando uma comunicação direta ou semi-direta. Isso pode evitar que os nodos precisem repassar mensagens, o que diminui significativamente o gasto energético, podendo ser uma alternativa ao modelo de comunicação *multi-hop*.

B. Veículos Aéreos Não Tripulados

Um Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT), popularmente chamado de drone, consiste de um veículo aéreo sem piloto a bordo, que pode ser controlado remotamente por uma pessoa no solo, por rotas pré-programadas em software ou por sistemas inteligentes.

Existem diferentes tipos de VANT com características que variam desde o tamanho, a autonomia de voo até a manobrabilidade dos veículos. O Micro-VANT (MVANT) possui um tamanho reduzido e é capaz de transportar somente cargas leves em torno de 100-200 gramas [7]. Já VANT do tipo asa-fixa, semelhante aos planadores, é capaz de transportar cargas maiores e possui uma ampla autonomia de voo, sendo comumente utilizado em monitoramento multipropósito na agricultura. Outro exemplo de VANT são os multirotores que apresentam um variado número de hélices e são utilizados para captura de imagens devido a sua estabilidade em voo, mesmo com a incidência de vento. Entre os multirotores, o tipo mais popular é quadricóptero. Nestes veículos, quatro hélices fornecem propulsão e controle, permitindo alto grau de estabilidade e manobrabilidade [7].

Estes veículos podem ser utilizados em diferentes aplicações como busca e salvamento, vigilância, mapeamento, coleta de dados, entre outras. Especificamente em relação à aplicação de coletas de dados, o VANT pode ser empregado como mula para monitorar e receber informações presentes nos nodos de

uma rede de sensores. Geralmente, estas aplicações são classificadas como Problema de Cobertura de Terreno. Um trajeto de cobertura de terreno completo pode ser definido como um trajeto planejado onde um equipamento robótico móvel varre todas as áreas de espaço livre em um ambiente de maneira sistemática e eficiente [8]. A maneira mais comum adotada para cobrir o terreno é baseado em movimentos de vai-e-volta. Também encontramos na literatura outros tipos de movimento, tais como espiral, *sector search* e *barrierpatrol* [9].

O conceito de janela de tempo também pode ser empregado em algumas tarefas, que devem ser executadas em um determinado intervalo de tempo. Além disso, complicações podem surgir em relação ao ambiente em que os VANTs devem desempenhar uma missão, pois o espaço aéreo pode ser limitado por variações no terreno e/ou zonas de voo proibidas, além de enfrentar obstáculos fixos e móveis. Somam-se ainda as limitações dos próprios veículos em termos de combustível, distância máxima possível de ser percorrida e a capacidade de transporte de carga [10].

III. TRABALHOS RELACIONADOS

No trabalho [11], é proposto um planejamento de cobertura eficiente energeticamente para VANTs utilizarem em aplicações de sensoriamento fotogramétrico. Os autores definem um modelo energético derivado de medidas reais para encontrar o consumo energético como função de movimentos dinâmicos do VANT operando em diferentes condições. Além disso, é apresentado um algoritmo baseado neste modelo de análise energética com o objetivo de encontrar o trajeto que tenha um consumo de energia reduzido e que ainda satisfaça os requisitos de cobertura e resolução da aplicação.

Um algoritmo para otimização do consumo de energia total de nodos em solo em aplicações de coleta de dados utilizando VANTs é apresentado em [12]. São montados *clusters* nas redes de sensores em solo e, quando o VANT entra no alcance de comunicação com algum nodo do *cluster*, ele recebe a informação de energia disponível de cada nodo. Através desta informação o VANT decide em qual nodo ele irá realizar a coleta dos dados do *cluster*.

Para diminuir o consumo energético e estender a vida útil de redes de sensores sem fio, [13] propõe a utilização de uma estação de trabalho para o monitoramento de infraestruturas usando rede de sensores onde a coleta e a transmissão de dados são feitas através de VANTs. Esta estação define o sistema de sensores em quatro categorias: nodos sensoriais, nodos de retransmissão, o VANT e nodos de borda. Para comunicação entre os nodos sensoriais utiliza-se de abordagem de roteamento *multi-hop* sem fio clássica para transmitir seus dados para um nodo de retransmissão mais próximo, que age como um *cluster head* para os nodos sensoriais a sua volta. O VANT move-se utilizando três tipos de trajetória através da rede, coletando os dados dos nodos de retransmissão e levando para os nodos de borda, localizados nos extremos da rede.

Em [?] e [5] são propostas estratégias para coleta eficiente de dados de uma RSSF empregando veículos aéreos não tripulados. A estratégia de [?] usa uma arquitetura sistemática

Tabela I
TRABALHOS RELACIONADOS COM SEUS TÓPICOS

Trabalho	Otimização de RSSF	Otimização de Rotas do VANT	Análise Energética de RSSF	Análise Energético de VANT
[11]	-	X	-	X
[12]	X	-	-	-
[13]	X	X	-	-
[1]	X	-	-	-
[16]	X	-	X	-
[2]	-	-	X	X
Este trabalho	-	-	X	X
[5]	X	-	X	-
[15]	-	X	-	X
[14]	-	X	-	X

baseada no protocolo MAC, o qual é responsável por decidir o nodo sensorial alvo da comunicação e como deve ser feita a retransmissão de dados quando necessário, utilizando cooperação entre nodos sensoriais vizinhos. A estratégia de [5], tem como objetivo minimizar o número de comunicações redundantes de nodos sensoriais com o VANT através de um algoritmo chamado de *Circularly Optimized Frame Selection* (COFS), que divide em grupos de prioridade os sensores aos quais estão ao alcance de comunicação com o VANT. Este trabalho é baseado em uma abordagem *multi-hop*.

[2] faz uma análise dos efeitos da utilização de VANTs na coleta de dados em redes de sensores sem fio utilizando diferentes tipos de trajetórias de voo, sendo elas: circular, em quadratura, vai-e-volta angular e vai-e-volta retangular. Os resultados apresentaram uma relação entre a máxima cobertura de comunicação com os nodos e o tempo mínimo de operação para a escolha de cada tipo de trajetória.

[14] propõe uma otimização de trajetória de VANTs em comunicações sem fio através de um modelo teórico energético de propulsão em função da aceleração, direção e velocidade de voo, supondo que o VANT fique com altura fixa e horizontalmente. Os autores consideram que a eficiência energética na comunicação é baseada no total de bits transmitidos em função da energia consumida pelos propulsores durante o voo em um período finito de tempo.

Uma análise de consumo de energia por quadrirotores em voos de cobertura de terreno, utilizando manobras de vai-e-volta e em espiral, é apresentada em [15]. Neste trabalho, também foi desenvolvido um sistema embarcado no VANT para a obtenção dos dados de consumo em voo. Como resultado, foi concluído que trajetórias em espiral possuem um consumo de energia menor que voos de vai-e-volta.

Na Tabela I, é feita uma relação da área de abrangência de cada trabalho relacionado ao nosso.

IV. DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO

Este trabalho foi dividido em duas etapas: a primeira etapa consiste na análise do consumo energético da comunicação sem fio entre Arduinos Uno utilizando módulos XBee; e a segunda etapa consiste na análise de consumo energético do veículo aéreo não tripulado (VANT) durante a realização de voos. Nestes voos ocorre a troca de dados entre um par de Arduino Uno juntamente com módulo XBee, um embarcado no VANT e outro no solo compondo um nodo de rede.

A. Obtenção dos Dados de Consumo Energético da Comunicação

A comunicação entre as nodos foi feita utilizando placas Arduino Uno (Figura 1) em conjunto de módulos de comunicação sem fio XBee S2C (Figura 2). Apesar das placas Arduino possuírem uma ampla variedade de sensores para medição de consumo energético, não foi possível a utilização dos mesmos pois o consumo da comunicação se mostrou baixo demais para uma detecção confiável dos sensores comerciais. Sendo assim, a obtenção dos dados de consumo foi feita através de um circuito de Shunt desenvolvido especificamente para este fim. Este circuito é responsável por transformar a informação de corrente em uma tensão que possa ser registrada pelo conversor ADC do Arduino Uno, como pode ser visto na Figura 3. Esse circuito é composto por um resistor de baixa resistência e de alta potência (*Shunt*) ligado em série com a carga que será monitorada. A função dele é atuar como um divisor de tensão de baixo impacto ao consumo geral do sistema, gerando uma queda de tensão que será amplificada pelo Amplificador Operacional (AMP-OP) de forma a ser compreendida pelo Conversor Analógico-Digital (ADC).

O ganho de tensão gerado pelo AMP-OP é dado pela relação dos resistores ligados na realimentação negativa do mesmo, sendo ela $1+RF/R1$ [16]. Os resistores adotados foram $RF = 120k$ Ohms e $R1 = 47k$ Ohms, resultando em um ganho de 26.5 vezes. Sendo assim, o valor máximo teórico de corrente que o circuito é capaz de medir é de aproximadamente 943mA. No entanto, na prática é necessária uma calibração visto que os componentes não se comportam de forma ideal. Foi utilizada uma corrente arbitrária na entrada do circuito para identificar o valor real que o ADC do Arduino detectaria. Esta corrente foi de 300mA, sendo gerado um valor de 250 na entrada ADC do Arduino, ou seja, apresentou um degrau de amostragem real de 1.2mA [16].

Além deste circuito, foram utilizados os módulos de cartão SD, que nos permitiu salvar os dados obtidos pela entrada ADC do Arduino Uno. Já o módulo RTC, que consiste de um relógio, permitiu identificar os instantes de tempo de forma confiável do consumo da comunicação sem fio.

B. Obtenção dos Dados de Consumo Energético do VANT

Esta etapa teve como objetivo a realização de voos tendo um nodo embarcado (composto de um Arduino e módulo XBee) no VANT o qual se comunica com outro nodo localizado em solo, a obtenção dos dados de consumo do VANT em voo e a análise dos mesmos.



Figura 1. Arduino Uno [17]



Figura 2. Módulo de Comunicação Sem Fio XBee S2C [18]

O VANT utilizado foi um quadrirotor (Figura 4) montado pela empresa Skydrones. Ele possui um controlador Ardupilot APM 2.5.2, um frame FPV FZY-QU4D de fibra de vidro e tubos de fibra de carbono. O frame possui uma estrutura para fixação do controlador, hélices, motores e trem de pouso. O veículo dispõe de quatro motores do tipo *brushless* de 750kV e aproximadamente 180Watts, quatro controladores de motor de 30A, hélices APC do tipo *slowfly* de 12". O quadrirotor possui ainda três giroscópios, três acelerômetros e três magnetômetros que compõem o sistema AHRS. Além disso, o veículo é equipado com um barômetro e um módulo de GPS que fornece

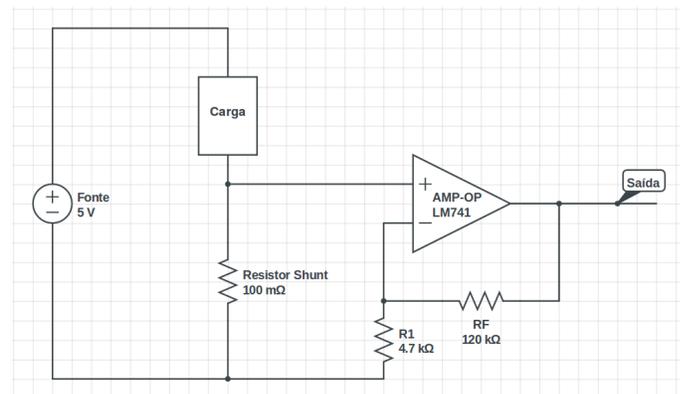


Figura 3. Circuito de Shunt desenvolvido [16]



Figura 4. Quadrirotor

as coordenadas globais e a altitude.

A bateria que alimenta o VANT foi uma LiPo Zippy Compact de 14.8V e 5000mAh, composta de quatro células de 3.7V, conectadas em série. A bateria utilizada nos experimentos estava com uma duração entre 7 a 10 minutos, supõe-se que isso se dá devido a idade e uso da bateria, que já era avançada. O VANT utilizado é controlado por controle remoto em conjunto com um software chamado *Mission Planner*, o qual é possível acompanhar, em tempo real, alguns parâmetros como altitude, rota, velocidade, inclinação, entre outros.

Primeiramente foram feitos voos para identificação do alcance da comunicação em voo com objetivo de verificar até que distância o quadrirotor (equipado com o Arduino e Xbee) mantém a comunicação com os nodos. Após esta etapa, foram realizados três voos em diferentes altitudes de 20-25m, 25-30m e 30-35m. O objetivo é identificar a relação entre o consumo de energia e as diferentes altitudes adotadas. Em todos voos o quadrirotor pairava sobre o nodo em solo, enquanto realizava troca de dados com o mesmo.

V. RESULTADOS OBTIDOS

A. Consumo de Energia da Comunicação

A plataforma Arduino que foi utilizada possui um processador ATmega 328p de 16MHz e possui 32Kb de memória flash. É um microcontrolador simples com memória e processamento reduzido, mesmo assim é o suficiente em muitas aplicações que requerem baixo processamento. Suas especificações nos proporcionam um consumo de energia baixo, permitindo a sua utilização em aplicações que precisam de baixo consumo, como por exemplo, na utilização em nodos de redes de sensores sem fio.

A Figura 5 mostra o consumo de corrente que a placa Arduino Uno, em conjunto de um módulo de comunicação sem fio XBee, apresentou durante a transmissão de dados e gerenciamento com outro par de mesma constituição. Foram feitas 10 rotinas de transmissão com arquivos de tamanho 2MB, com obtenção de amostras a cada 10ms, apresentadas como uma nuvem de pontos com uma linha de tendência baseadas em médias móveis com intervalo de 25 valores. Podemos ver que o consumo médio de corrente do par Arduino

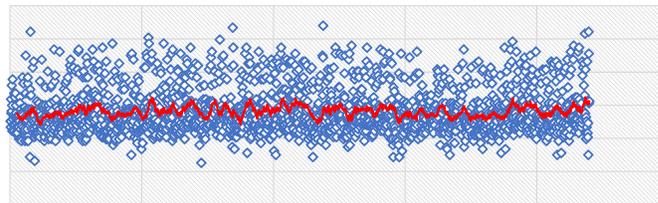


Figura 5. Fluxo de Corrente do Arduino Uno com Módulo Xbee [16]

Uno + XBee durante a comunicação ficou entre 40mA a 60mA.

Estes resultados são apresentados com intuito de demonstrar qual é a relação do consumo de energia do módulo de comunicação com os nodos (Arduino e XBee) em relação ao consumo de energia do quadrirotor em funcionamento.

B. Consumo de Energia dos Voos

Os primeiros testes foram realizados com o objetivo de verificar o alcance da comunicação durante os voos. Durante estes experimentos foram realizadas medições de distância entre o quadrirotor e o nodo em solo (aumentando a distância gradativamente) e também através de voo com intuito de verificar uma possível interferência do quadrirotor em voo. Constatou-se que os módulos XBees conseguiam trocar mensagens a distâncias até 175-180m.

Foram realizados três voos em diferentes altitudes: 20-25m, 25-30m, 30-35m com objetivo de identificar a relação entre consumo de energia e altitude adotada. Em todos os voos o quadrirotor pairava sobre o nodo em solo e transmitia os dados, com duração entre 7 e 10 minutos, em ambiente sem obstáculos.

As Figuras 6, 8 e 10, mostram consumo de corrente do VANT nos voos pairando a 20-25m, 25-30m e 30-35m de altitude, respectivamente, e as Figuras 7, 9 e 11, apresentam o consumo de tensão nas mesmas altitudes, respectivamente. Foram feitas medidas a cada 500ms, mostradas como uma nuvem de pontos com linhas de tendência baseadas em médias móveis com intervalo de 10 amostras. Nota-se que no início de todos os gráficos, ocorre um pico de consumo de corrente. Isto se dá devido a decolagem do VANT, pois os motores devem vencer o momento de inércia e isto gera um consumo acentuado repentino. Além disso, no final dos gráficos, ocorre uma queda de consumo brusca. Isto deve-se ao pouso, onde os motores enfraquecem seu giro para que o VANT possa descer até concluir o pouso.

Analisando os gráficos de fluxo de corrente e da queda de tensão, Figuras 6 e 7, respectivamente, correspondentes ao voo pairando entre 20-25m de altura, observa-se que a queda média de tensão foi decrescendo de 15.4V até 9.5V com pouca variação. A exceção é a parte final do gráfico, que corresponde ao momento em que era executado o pouso. Neste momento, o uso de corrente é diminuído, o que faz com que a tensão aumente para respeitar a fórmula da potência composta pela multiplicação entre a tensão e a corrente. De acordo com essa fórmula, quando um dos componentes é alterado,

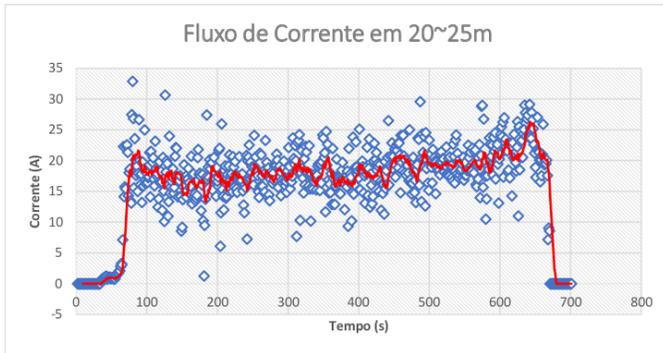


Figura 6. Fluxo de Corrente pairando entre 20m e 25m

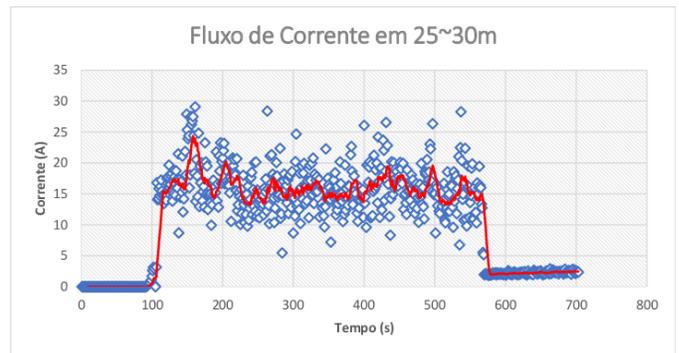


Figura 8. Fluxo de Corrente pairando entre 25m e 30m

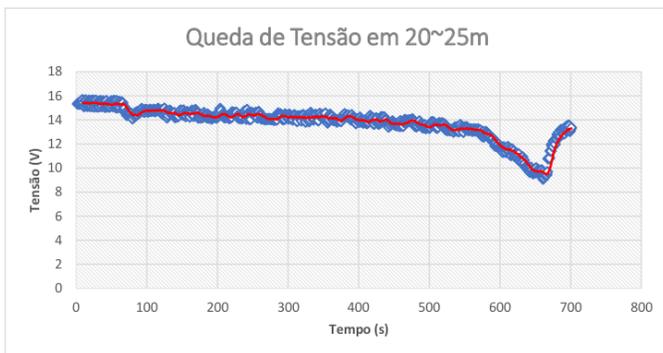


Figura 7. Queda de Tensão pairando entre 20m e 25m

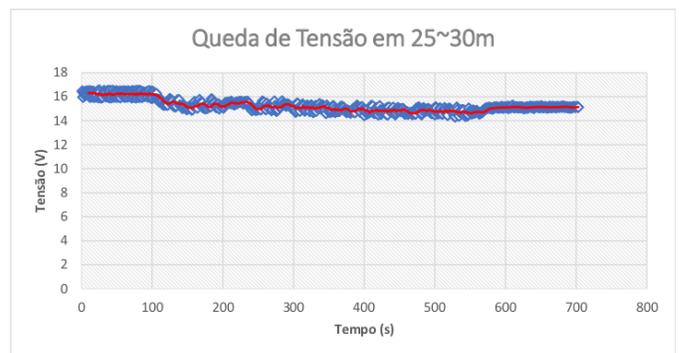


Figura 9. Queda de Tensão pairando entre 25m e 30m

o outro deve acompanhar a alteração de forma inversa para que o valor da potência seja conservado. Agora, observando o gráfico da Figura 6, pode-se ver que o fluxo médio de corrente, entre a decolagem e o pouso, ficou entre 12.96A a 24.3A de forma não-linear. Um fluxo tão variável se dá devido ao ajuste da força dos motores realizado pelo VANT para que ele se mantenha na mesma posição. Esse fluxo de corrente sobe sempre que ocorre alguma incidência de vento sobre o veículo.

Analisando os gráficos de fluxo de corrente e tensão, Figuras 8 e 9, respectivamente, correspondentes ao voo pairando entre 25-30m de altitude, observa-se que a queda média de tensão foi decrescendo de 16.46V até 14.36V com pouca variação. Ao final do gráfico a tensão retorna a 15.15V devido a diminuição do fluxo de corrente. O fluxo médio de corrente, entre a decolagem e o pouso, variou entre 10.06A a 20.82A, com exceção de um pico de 24.42A, que se deu devido a uma incidência brusca de vento.

Por sua vez, analisando os gráficos de fluxo de corrente e tensão, Figuras 10 e 11, respectivamente, correspondentes ao voo pairando entre 30-35m de altura, nota-se que a queda média de tensão foi decrescendo de 16.46V até 10.40V. Ao final do gráfico a tensão retorna a 13.66V devido a diminuição do fluxo de corrente. O fluxo médio de corrente, entre a decolagem e o pouso, variou entre 12.45A a 22.9A de forma não-linear.

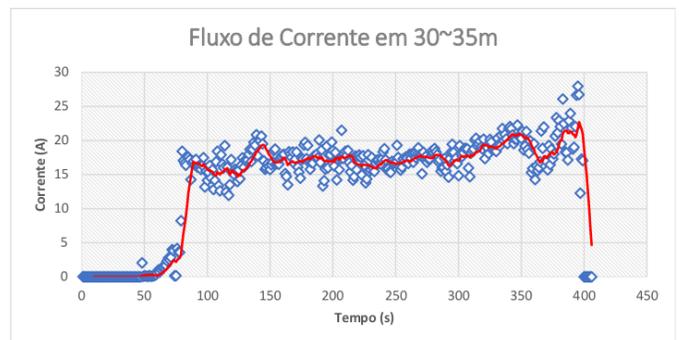


Figura 10. Fluxo de Corrente pairando entre 30m e 35m

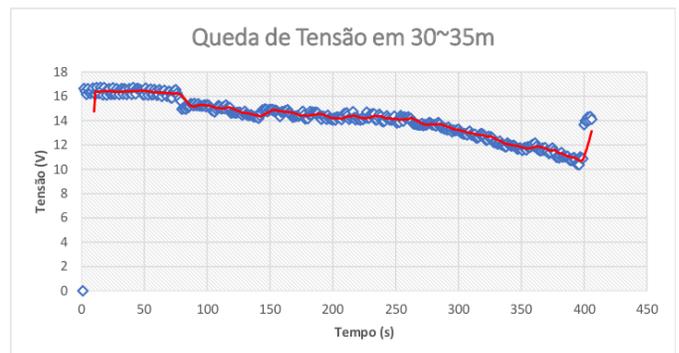


Figura 11. Queda de Tensão pairando entre 30m e 35m

VI. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho teve como objetivo realizar um estudo de consumo energético em redes de sensores sem fio utilizando um veículo aéreo não tripulado como coletor de dados. Foram feitos voos em três diferentes altitudes com o objetivo de analisar o consumo em diferentes distâncias de transmissão entre o nodo em solo e o VANT. Além disso, diferentes altitudes de voo nos proporcionam diferentes velocidades de vento e, portanto, interferência no consumo no veículo.

Foi realizada a obtenção e análise do consumo energético que uma rede de sensores possui, especificamente o consumo da comunicação. Nesta análise foi constatado que a comunicação consome em torno de 40mA a 60mA, o que interpretamos ser um consumo bem reduzido, o que é o ideal para esse tipo de aplicação, já que a alimentação dos nodos é feita por bateria dedicada e deve consumir o mínimo possível para estender o tempo de vida útil do nodo. Além disso, este consumo é ordens de grandeza menor em relação ao consumo energético do quadricóptero em voo.

Também foi realizada a obtenção e análise do consumo energético de um VANT servindo como coletor de dados. Para isso, foi utilizado um quadricóptero com um Arduino Uno com XBee embarcado para comunicar com um par de mesma constituição em solo. O resultado final foi uma análise dos dados obtidos de tensão e corrente da comunicação e de voos pairando acima dos nodos em solo. Analisando o consumo, em todos os voos foi observada uma variação considerável de corrente. Notamos que o fluxo de corrente em todos os voos ficou entre 10A a 24,5A. A variação no fluxo de corrente deve-se devido a compensação de um ou mais rotores na posição do VANT quando ocorre a influência de vento sobre o mesmo.

Finalmente, foi possível verificar que, como esperado, o consumo utilizado pela comunicação é significativamente menor que o necessário para manter o VANT em voo. Isso significa, no nosso entendimento, que é possível utilizar o VANT com as tecnologias empregadas para a coleta de dados de uma rede de sensores sem fio, sem impacto significativo em seu consumo de energia.

Como trabalhos futuros pretendemos implementar no simulador de redes de sensores sem fio Eboracum [19] um modelo do VANT estudado e realizar experimentos com voos simulados para entender o comportamento de coletores de dados aplicados em redes de escala realista. Com isso, buscamos estudar, tanto a trajetória de voo mais eficiente para a cobertura da rede, quanto a eficácia desta técnica em redes reativas onde os nodos são ativados por eventos que ocorrem de forma imprevisível no cenário. Além disso, iremos realizar um experimento real utilizando o VANT para a coleta de dados em uma rede de sensores sem fio em malha de 9 nodos, espalhada em uma plantação, cobrindo 40 hectares, e comparar seu desempenho com a rede em modo de comunicação *multi-hop*.

REFERÊNCIAS

- [1] S. Mori, "Cooperative sensing data collecting framework by using unmanned aircraft vehicle in wireless sensor network," in *2016*

- IEEE International Conference on Communications, ICC 2016, Kuala Lumpur, Malaysia, May 22-27, 2016*. IEEE, 2016, pp. 1–6. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/ICC.2016.7511187>
- [2] S. Rashed and M. Soyuturk, "Analyzing the effects of UAV mobility patterns on data collection in wireless sensor networks," *Sensors*, vol. 17, no. 2, p. 413, 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/s17020413>
- [3] B. LAKSHMI and M. NEELIMA, "Maximising wireless sensor network life time through cluster head selection using hit sets," *IJCSI International Journal of Computer Science Issues*, vol. 9, no. 3, pp. 328–331, 2012.
- [4] Y. Li, G. Xiao, G. Singh, and R. Gupta, "Algorithms for finding best locations of cluster heads for minimizing energy consumption in wireless sensor networks," *Wireless Networks*, vol. 19, no. 7, pp. 1755–1768, 2013.
- [5] S. Sotheara, K. Aso, N. Aomi, and S. Shimamoto, "Effective data gathering and energy efficient communication protocol in wireless sensor networks employing UAV," in *IEEE Wireless Communications and Networking Conference, WCNC 2014, Istanbul, Turkey, April 6-9, 2014*. IEEE, 2014, pp. 2342–2347. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/WCNC.2014.6952715>
- [6] I. F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, and E. Cayirci, "Wireless sensor network a survey," Sep. 23 2003. [Online]. Available: <http://citeseer.ist.psu.edu/678332.html>; <http://www.ece.gatech.edu/research/labs/bwn/sensornets.pdf>
- [7] J. EVERAERTS, "The use of unmanned aerial vehicles (uavs) for remote sensing and mapping," *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. 37, no. Part B1, pp. 1187–1192, 2008.
- [8] A. Zelinsky, R. A. Jarvis, and J. C. Byrne, "Planning paths of complete coverage of an unstructured environment by a mobile robot," Apr. 08 1993. [Online]. Available: <http://citeseer.ist.psu.edu/34111.html>; <http://www.syseng.anu.edu.au/rsl/ICAR.ps>
- [9] G. OST, "Search path generation with uav applications using approximate convex decomposition," Tese de Mestrado em Controle, Department of Electrical Engineering Linköpings, Linköpings universitet, Linköping, 2012.
- [10] P. R. Ferreira Jr., "Inteligência artificial aplicada aos sistemas ciberfísicos," UFPel, Projeto de Desenvolvimento Tecnológico e Extensão Inovadora, 2016.
- [11] C. D. Franco and G. C. Buttazzo, "Energy-aware coverage path planning of uavs," in *JCARSC*. IEEE, 2015, pp. 111–117.
- [12] D. T. Ho, E. I. Grötli, and T. A. Johansen, "Heuristic algorithm and cooperative relay for energy efficient data collection with a uav and wsn," in *2013 International Conference on Computing, Management and Telecommunications (ComManTel)*, Jan 2013, pp. 346–351.
- [13] I. Jawhar, N. Mohamed, J. Al-Jaroodi, and S. Zhang, "Data communication in linear wireless sensor networks using unmanned aerial vehicles," in *International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*, Atlanta, United States of America, 2013.
- [14] Y. Zeng and R. Zhang, "Energy-efficient uav communication with trajectory optimization," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 16, no. 6, pp. 3747–3760, June 2017.
- [15] T. M. Cabreira, R. de B. Acosta, N. B. da Silva, P. H. G. Marchi, P. R. F. Jr, and J. C. B. de Mattos, "Análise do consumo de energia por quadricópteros em voos para cobertura de terrenos," in *SBESC*. IEEE Computer Society, 2017.
- [16] P. H. G. Marchi, "Comparação de diferentes abordagens de processamento e transmissão de dados em uma rede de sensores sem fio," 2017, monografia (Bacharel em Engenharia de Computação), UFPel (Universidade Federal de Pelotas), Pelotas, Brasil.
- [17] Arduino, "Arduino uno," 2017, disponível em: <https://www.arduino.cc/>.
- [18] DIGI, "Xbee s2c," 2017, disponível em: <https://www.digi.com/resources/documentation/digidocs/pdfs/90002002.pdf>.
- [19] P. Ferreira, L. Brisolará, and L. Soares Indrusiak, "Eboracum project," <http://sourceforge.net/projects/eboracum/>.