



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**CENTRO DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**  
**CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**SAMANTA GADELHA BARBOSA**

**MONITORAMENTO REMOTO DE UM SISTEMA DE GERAÇÃO EÓLICA COM  
COMUNICAÇÃO WIRELESS VIA ZIGBEE**

**FORTALEZA**

**2017**

**SAMANTA GADELHA BARBOSA**

**MONITORAMENTO REMOTO DE UM SISTEMA DE GERAÇÃO EÓLICA COM  
COMUNICAÇÃO WIRELESS VIA ZIGBEE**

Monografia apresentada ao Programa de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Ceará, como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica. Área de concentração: Sistemas de Energia.

Orientador: Prof. Dr. Demercil de Souza Oliveira Júnior.

**FORTALEZA**

**2017**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Biblioteca Universitária  
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

- B212m Barbosa, Samanta Gadelha.  
Monitoramento remoto de um sistema de geração com comunicação wireless via Zigbee / Samanta Gadelha Barbosa. – 2017.  
108 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Elétrica, Fortaleza, 2017.  
Orientação: Prof. Dr. Demercil de Souza Oliveira Júnior .
1. Energia Eólica. 2. Rede de Sensores. 3. Redes Wireless. 4. Supervisão de WECS. 5. Zigbee. I. Título.  
CDD 621.3
-

**SAMANTA GADELHA BARBOSA**

**MONITORAMENTO REMOTO DE UM SISTEMA DE GERAÇÃO EÓLICA COM  
COMUNICAÇÃO WIRELESS VIA ZIGBEE**

Monografia apresentada ao Programa de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Ceará, como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica. Área de concentração: Sistemas de Energia.

Aprovada em: \_\_\_/\_\_\_/\_\_\_\_\_.

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Dr. Demercil de Souza Oliveira Júnior (Orientador)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof<sup>a</sup>. MSc. Jéssica Santos Guimarães  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. Luiz Henrique Silva Colado Barreto  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. Bruno Ricardo de Almeida  
Universidade de Fortaleza (UNIFOR)

A Deus,  
a minha mãe Cristiane,  
a meu pai Rui,  
eu dedico esse trabalho.

## AGRADECIMENTOS

Primeiro a Deus por todas as benções concedidas.

Agradeço a minha mãe, Cristiane Gadelha, meu pai, Rui Barbosa, e minha irmã, Amanda Gadelha, por todo amor, carinho, educação e suporte. Nada seria possível sem vocês. Assim como a todos os outros membros da minha família que, mesmo distantes, torceram por mim e me apoiaram.

Ao meu namorado, Tito Livio, pelo amor, paciência e compreensão, estando sempre ao meu lado, suportando estresses e ajudando a superar problemas. Agradeço também a toda sua família, que me acolheram e torceram por mim, revestindo meu caminho com amor, carinho e dedicação.

Ao meu orientador Dr. Demercil de Souza Oliveira Júnior, pela orientação e as oportunidades a mim concedidas, assim como aos professores Msc. Jéssica Santos Guimarães e Dr. Luiz Henrique Silva Colado Barreto, da Universidade Federal do Ceará (UFC), e o professor Dr. Bruno Ricardo de Almeida, da Universidade de Fortaleza (UNIFOR), por aceitarem participar desta banca avaliadora. Agradeço também a todos os outros professores e funcionários do Departamento de Engenharia Elétrica da UFC que de alguma forma contribuíram para o conhecimento aqui apresentado e, em especial, ao professor Dr. Sérgio Daher, que se destacou por seu carisma e sua didática motivadora, atrelando competência, qualidade e humildade durante seus ensinamentos.

Ao Grupo de Processamento de Energia e Controle (GPEC) pelo acolhimento e suporte ao projeto.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e a Fundação de Apoio a Serviços Técnicos e Fomento à Pesquisa (ASTEF), que contribuíram financeiramente com a realização do projeto.

Aos colegas e amigos da universidade, pelas contribuições técnicas e pelos momentos de descontração. Em especial, aos meus amigos Juliano Pacheco e Bruno Almeida, do laboratório GPEC, e a minha amiga e parceira de curso, Gabriela Veras, que foram uma força extra fundamental para conclusão desta etapa.

Finalmente, agradeço todos àqueles que de alguma maneira contribuíram para conclusão deste trabalho e para minha formação como profissional e cidadã.

“A verdadeira viagem de descobrimento não consiste em procurar novas paisagens, mas em ter novos olhos. ”

(Marcel Proust)

“Talvez não tenha conseguido fazer o melhor, mas lutei para que o melhor fosse feito. Não sou o que deveria ser, mas Graças a Deus, não sou o que era antes. ”

(Martin Luther King)

## RESUMO

Este trabalho propõe um sistema de monitoramento remoto de uma WECS (*Wind Energy Conversion System*) através de uma rede wireless com tecnologia Zigbee, visando a análise da potência gerada na turbina com base nas velocidades do vento local. A formação da rede sem fio torna-se interessante devido a distância de transmissão e a possibilidade de expansão e ingresso de novos sensores, podendo expandir outras variáveis para supervisão da WECS. São apresentadas a estrutura da rede e as configurações realizadas para formação da mesma utilizando módulos Zigbee. O desenvolvimento dos sistemas de cada nó e os resultados correspondentes são descritos e comentados em cada capítulo de referência. Por fim, é apresentada uma explanação dos nós na rede WPAN criada e dos valores obtidos no ponto de acesso, sendo os resultados devidamente discutidos, assim como os próximos passos para implantação do projeto no sistema eólico localizado próximo ao açude Santo Anastácio, na Universidade Federal do Ceará (UFC), campus do Pici.

**Palavras-chave:** Energia Eólica, Rede de Sensores, Redes Wireless, Supervisão de WECS, Zigbee.



## **ABSTRACT**

This work proposes a remote monitoring system of a WECS (Wind Energy Conversion System) through a wireless network using Zigbee technology, aiming, based on local wind samples, the analysis of the generated power rating on a wind turbine. Because of the big data transmission distance using a wireless network becomes highly recommended, besides that, the forecast of a network expansion and the use of new sensors would be easily implemented allowing other variables of the WECS system to be supervised. Making use of Zigbee modules, will be presented the network structure and its configuration schema. The system development for each node and the corresponding results are described and commented in each reference chapter. In the conclusion, an explanation of the new WPAN network nodes and every obtained value in the access point is presented, being these results properly discussed, as well as the next steps for the project implementation in the wind power system which is located near the weir Santo Anastácio, at Univesidade Federal do Ceará (UFC), campus Pici.

**Key-Words:** Wind Power Systems, Sensors Network, Wireless Network, WECS supervision, Zigbee.

## LISTA DE FIGURAS

|             |  |    |
|-------------|--|----|
| Figura 1.1  | – Sistema proposto. ....   | 18 |
| Figura 2.1  | – Perfil de potência instalada e fator de capacidade no mundo. ....    | 21 |
| Figura 2.2  | – Potencial eólico brasileiro. ....                                    | 22 |
| Figura 2.3  | – Perfil de potência instalada e fator de capacidade no Brasil. ....   | 22 |
| Figura 2.4  | – Conversão da energia cinética em mecânica. ....                      | 24 |
| Figura 2.5  | – Etapas de conversão de energia em um sistema eólico. ....            | 24 |
| Figura 2.6  | – Características das forças atuantes na aerodinâmica de uma pá. ....  | 25 |
| Figura 2.7  | – Ilustração de uma massa de ar incidindo em um cilindro. ....         | 26 |
| Figura 2.8  | – Velocidade resultante da turbina. ....                               | 27 |
| Figura 2.9  | – Classificação das turbinas quanto a direção do eixo do rotor. ....   | 30 |
| Figura 2.10 | – Coeficiente de potência para diversos tipos de turbinas. ....        | 31 |
| Figura 2.11 | – Classificação dos sistemas quanto a localização. ....                | 32 |
| Figura 2.12 | – Componente de uma turbina eólica. ....                               | 33 |
| Figura 3.1  | – Alguns padrões baseados no IEEE 802 LAN/MAN. ....                    | 38 |
| Figura 3.2  | – Tipos de salto em uma rede WPAN. ....                                | 39 |
| Figura 3.3  | – Topologias de redes Bluetooth. ....                                  | 41 |
| Figura 3.4  | – Topologia Estrela. ....  | 43 |
| Figura 3.5  | – Topologia em árvore. ....  | 44 |
| Figura 3.6  | – Topologia em malha. ....   | 44 |
| Figura 3.7  | – Rede de sensores sem fio. ....                                       | 46 |
| Figura 3.8  | – Composição de um nó em uma WSN. ....                                 | 47 |
| Figura 3.9  | – Pilha de protocolos de uma WSN. ....                                 | 47 |
| Figura 3.10 | – Pilha de protocolos do padrão Zigbee. ....                           | 49 |
| Figura 4.1  | – Fluxo de dados no Xbee-PRO S3B. ....                                 | 52 |
| Figura 4.2  | – Disposição física prevista para os dispositivos na rede. ....        | 53 |
| Figura 4.3  | – Ilustração da viabilidade de comunicação entre a WECS e o GPEC. .... | 53 |
| Figura 4.4  | – Identificação dos módulos <i>Xbee</i> na rede wireless. ....         | 54 |
| Figura 4.5  | – Rede wireless proposta com os respectivos dispositivos. ....         | 55 |
| Figura 4.6  | – Interface XCTU. ....   | 55 |
| Figura 4.7  | – Janela de configuração do XCTU. ....                                 | 56 |
| Figura 4.8  | – Janela de console do XCTU. ....                                      | 56 |
| Figura 4.9  | – Configurações da comunicação via UART. ....                          | 57 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 4.10 – Configurações das camadas MAC/PHY.....                                     | 58 |
| Figura 4.11 – Configurações dos dispositivos na rede.....                                | 59 |
| Figura 4.12 – Possibilidades de operação do módulo na rede.....                          | 59 |
| Figura 4.13 – Configurações das rotas de comunicação na rede.....                        | 60 |
| Figura 4.14 – Configurações dos parâmetros da UART.....                                  | 61 |
| Figura 4.15 – Cabo utilizado para comunicação entre módulos Zigbee e PC.....             | 62 |
| Figura 4.16 – Minirrede para teste da operacionalidade da rede configurada.....          | 63 |
| Figura 5.1 – Anemômetro tipo concha, modelo NRG 40C.....                                 | 64 |
| Figura 5.2 – Esquema de transmissão proposto para monitoramento do vento.....            | 65 |
| Figura 5.3 – Esquemático do circuito conversor da forma de onda.....                     | 66 |
| Figura 5.4 – Formas de ondas simuladas para o circuito conversor de forma de onda.....   | 67 |
| Figura 5.5 – Configuração do oscilador e do ciclo de máquina do dsPIC 30F4011.....       | 68 |
| Figura 5.6 – Terminais utilizados do dsPIC 30F4011.....                                  | 69 |
| Figura 5.7 – Algoritmo para descarte das frequências menores ou igual a 1 Hz.....        | 69 |
| Figura 5.8 – Configuração da transmissão pela UART 2.....                                | 70 |
| Figura 5.9 – Fluxograma simplificado da estrutura básica do código.....                  | 71 |
| Figura 5.10 – Fluxograma simplificado das interrupções e medição da frequência.....      | 72 |
| Figura 5.11 – Esquemático da fonte de alimentação.....                                   | 74 |
| Figura 5.12 – Formas de ondas do circuito conversor.....                                 | 75 |
| Figura 5.13 – Resultados do sistema através do display LCD.....                          | 75 |
| Figura 5.14 – Resultados do sistema através do computador remoto.....                    | 75 |
| Figura 5.15 – Sistema embarcado de monitoramento da velocidade do vento.....             | 76 |
| Figura 6.1 – Circuito de processamento de energia do sistema eólico.....                 | 77 |
| Figura 6.2 – Condicionamento das tensões aplicadas ao pino A/D do microcontrolador....   | 78 |
| Figura 6.3 – Circuito de condicionamento do sensor de corrente.....                      | 78 |
| Figura 6.4 – Conexão do sistema de monitoramento ao inversor.....                        | 79 |
| Figura 6.5 – Configuração do oscilador e do ciclo de instrução do dsPIC 30F2020.....     | 80 |
| Figura 6.6 – Ilustração dinâmica do processamento do sinal tensão no dsPIC.....          | 81 |
| Figura 6.7 – Fluxograma da metodologia de cálculo dos valores eficazes.....              | 82 |
| Figura 6.8 – Fluxograma simplificado da lógica do software.....                          | 83 |
| Figura 6.9 – Sinal de tensão do sensor simulado comparado ao valor eficaz calculado..... | 84 |
| Figura 6.10 – Verificação dos valores eficazes através do computador remoto.....         | 85 |
| Figura 6.11 – Placa de monitoramento da potência gerada.....                             | 85 |
| Figura 7.1 – Minirrede de monitoramento.....   | 86 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 7.2 – Dados de monitoramento da WECS. ....                                   | 86 |
| Figura 7.3 – Módulos e placas utilizados para monitoramento do sistema eólico. .... | 87 |

## LISTA DE TABELAS

|  |    |
|--|----|
| Tabela 2.1 – Classificação das turbinas quanto ao nível de potência.....             | 33 |
| Tabela 2.2 – Principais características do gerador. ....                             | 35 |
| Tabela 3.1 – Padrões e camadas de protocolo que compõem o padrão Zigbee. ....        | 42 |
| Tabela 3.2 – Tipos de dispositivos em uma rede Zigbee. ....                          | 43 |
| Tabela 4.1 – Principais características do Xbee-PRO S3B .....                        | 51 |
| Tabela 4.2 – Descrição dos parâmetros de configuração das camadas MAC/PHY.....       | 58 |
| Tabela 4.3 – Descrição dos parâmetros de definição dos módulos na rede. ....         | 59 |
| Tabela 4.4 – Descrição dos parâmetros de configuração das rotas de comunicação. .... | 60 |
| Tabela 4.5 – Descrição dos parâmetros de configuração da UART.....                   | 61 |
| Tabela 5.1 – Principais características do anemômetro utilizado.....                 | 64 |
| Tabela 5.2 – Especificações de projeto para a fonte de alimentação. ....             | 73 |
| Tabela 5.3 – Especificações dos componentes para a fonte de alimentação.....         | 74 |

## SUMARIO

|                |   |           |
|----------------|---|-----------|
| <b>1</b>       | <b>INTRODUÇÃO</b> .....   | <b>17</b> |
| <b>1.1</b>     | <b>Contextualização e motivação.</b> .....                          | <b>17</b> |
| <b>1.2</b>     | <b>Trabalho proposto</b> .....                                      | <b>18</b> |
| <b>1.3</b>     | <b>Estrutura do trabalho</b> .....                                  | <b>19</b> |
| <b>2</b>       | <b>ENERGIA EÓLICA</b> .....   | <b>20</b> |
| <b>2.1</b>     | <b>Contexto histórico</b> .....                                     | <b>20</b> |
| <b>2.1.1</b>   | <i>Cenário Mundial</i> .....  | <b>21</b> |
| <b>2.1.2</b>   | <i>Cenário Brasileiro</i> .....                                     | <b>21</b> |
| <b>2.2</b>     | <b>Princípio de Funcionamento</b> .....                             | <b>23</b> |
| <b>2.2.1</b>   | <i>Princípio de conversão</i> .....                                 | <b>23</b> |
| <b>2.2.2</b>   | <i>Aerodinâmica das pás</i> .....                                   | <b>25</b> |
| <b>2.2.3</b>   | <i>Extração da potência</i> .....                                   | <b>26</b> |
| <b>2.2.4</b>   | <i>Principais características de desempenho</i> .....               | <b>28</b> |
| <b>2.2.4.1</b> | <i>Coeficiente de potência (Cp)</i> .....                           | <b>28</b> |
| <b>2.2.4.2</b> | <i>Taxa de velocidade de ponta (TSR)</i> .....                      | <b>29</b> |
| <b>2.3</b>     | <b>Classificação dos sistemas de geração eólica</b> .....           | <b>29</b> |
| <b>2.3.1</b>   | <i>Classificação quanto a posição do eixo do rotor</i> .....        | <b>29</b> |
| <b>2.3.1.1</b> | <i>Eixo vertical</i> .....  | <b>30</b> |
| <b>2.3.1.2</b> | <i>Eixo horizontal</i> .....  | <b>30</b> |
| <b>2.3.2</b>   | <i>Classificação quanto a localização da turbina</i> .....          | <b>32</b> |
| <b>2.3.2.1</b> | <i>Sistemas Onshore</i> .....                                       | <b>32</b> |
| <b>2.3.2.2</b> | <i>Sistemas Offshore</i> .....                                      | <b>32</b> |
| <b>2.3.3</b>   | <i>Classificação quanto ao nível de potência</i> .....              | <b>33</b> |
| <b>2.4</b>     | <b>Componentes de um sistema eólico</b> .....                       | <b>33</b> |
| <b>2.5</b>     | <b>Características do sistema eólico a ser supervisionado</b> ..... | <b>35</b> |
| <b>3</b>       | <b>REDES SEM FIO</b> .....  | <b>36</b> |
| <b>3.1</b>     | <b>Desenvolvimento das redes sem fio</b> .....                      | <b>36</b> |
| <b>3.2</b>     | <b>Tecnologias de comunicação sem fio</b> .....                     | <b>37</b> |
| <b>3.3</b>     | <b>Tecnologias do grupo WPAN</b> .....                              | <b>38</b> |
| <b>3.3.1</b>   | <i>Definição de Termos</i> .....                                    | <b>39</b> |
| <b>3.3.2</b>   | <i>Tecnologia BlueTooth (IEEE 802.15.1)</i> .....                   | <b>40</b> |
| <b>3.3.3</b>   | <i>Tecnologia Zigbee (IEEE 802.15.4)</i> .....                      | <b>41</b> |

|         |   |    |
|---------|---|----|
| 3.3.4   | <i>Comparação entre as tecnologias Bluetooth e Zigbee</i> .....     | 45 |
| 3.4     | <b>Redes de sensores sem fio (WSN) e Zigbee</b> .....               | 45 |
| 3.4.1   | <i>Rede de sensores sem fio (WSN)</i> .....                         | 45 |
| 3.4.1.1 | <i>Protocolos de uma rede sem fio</i> .....                         | 47 |
| 3.4.2   | <i>Protocolos de uma rede Zigbee</i> .....                          | 48 |
| 4       | <b>FORMAÇÃO DA REDE ZIGBEE</b> .....                                | 51 |
| 4.1     | <b>Definições da estrutura da rede para monitoramento</b> .....     | 52 |
| 4.2     | <b>Configuração da rede Zigbee</b> .....                            | 55 |
| 4.2.1   | <i>Definições iniciais de configuração</i> .....                    | 57 |
| 4.2.2   | <i>Camada MAC/PHY</i> .....   | 58 |
| 4.2.3   | <i>Definição dos dispositivos na rede</i> .....                     | 59 |
| 4.2.4   | <i>Definição das rotas de comunicação</i> .....                     | 60 |
| 4.2.5   | <i>Parâmetros de comunicação via UART</i> .....                     | 61 |
| 4.3     | <b>Conexão do Zigbee aos dispositivos de monitoramento</b> .....    | 62 |
| 4.4     | <b>Rede wireless de monitoramento da WECS</b> .....                 | 62 |
| 5       | <b>MONITORAMENTO DA VELOCIDADE DO VENTO</b> .....                   | 64 |
| 5.1     | <b>Anemômetro</b> .....   | 64 |
| 5.2     | <b>Circuito de transmissão</b> .....                                | 65 |
| 5.2.1   | <i>Circuito conversor da forma de onda</i> .....                    | 66 |
| 5.2.2   | <i>Software de tratamento</i> .....                                 | 67 |
| 5.2.2.1 | <i>DSPIC 30F4011</i> .....  | 67 |
| 5.2.2.2 | <i>Lógica do software</i> .....                                     | 70 |
| 5.3     | <b>Fonte de alimentação</b> .....                                   | 72 |
| 5.4     | <b>Sistema embarcado de supervisão da velocidade do vento</b> ..... | 74 |
| 6       | <b>MONITORAMENTO DA POTÊNCIA GERADA</b> .....                       | 77 |
| 6.1     | <b>Conversor eletrônico de potência</b> .....                       | 77 |
| 6.2     | <b>Tensão e corrente injetados na rede</b> .....                    | 77 |
| 6.3     | <b>Software de tratamento</b> .....                                 | 80 |
| 6.3.1   | <i>Processamento digital do sinal analógico</i> .....               | 80 |
| 6.3.2   | <i>Valor Eficaz (RMS)</i> .....                                     | 81 |
| 6.3.3   | <i>Lógica do software</i> .....                                     | 83 |
| 6.4     | <b>Sistema embarcado de monitoramento da potência gerada</b> .....  | 84 |
| 7       | <b>SISTEMA COMPLETO DE MONITORAMENTO REMOTO</b> .....               | 86 |
| 8       | <b>CONCLUSÃO</b> .....  | 88 |

|            |   |            |
|------------|---|------------|
| <b>8.1</b> | <b>Sugestões para trabalhos futuros:.....</b>                 | <b>89</b>  |
| <b>8.2</b> | <b>Publicações Resultantes .....</b>                          | <b>90</b>  |
|            | <b>REFERÊNCIAS .....</b>                                      | <b>91</b>  |
|            | <b>APÊNDICE A – PROJETO DOS CAPACITORES E MAGNÉTICOS DA</b>   |            |
|            | <b>FONTE DE ALIMENTAÇÃO.....</b>                              | <b>94</b>  |
|            | <b>APÊNDICE B - CÓDIGO EM LINGUAGEM DE PROGRAMAÇÃO C PARA</b> |            |
|            | <b>PROGRAMAÇÃO DOS MICROCONTROLADORES.....</b>                | <b>100</b> |



## 1 INTRODUÇÃO

A geração de energia eólica apresenta diversas vantagens, como baixo impacto ambiental, ausência de emissão de gases poluentes e implantação rápida. Devido ao aumento dos investimentos econômicos e ao progresso tecnológico no final do século XX, os custos de implantação foram significativamente reduzidos, além da melhoria da eficiência dos sistemas eólicos e elevação do fator de capacidade (FC - relação entre o produzido e a capacidade máxima de produção de uma usina durante um mesmo período de tempo). Esses fatos levaram à alta penetração da energia eólica na matriz energética mundial.

### 1.1 Contextualização e motivação.

Dada a crescente importância da geração de energia eólica, as melhorias nos sistemas de controle e supervisão são essenciais para assegurar eficiência na operação e a disponibilidade da fonte. Com este propósito, um sistema de monitoramento sem fio é desenvolvido neste trabalho de conclusão de curso, com o qual se fará a análise da potência gerada em uma turbina eólica utilizando-se das informações da velocidade do vento para estimar uma potência de referência, podendo futuramente serem monitoradas outras variáveis de importância para o sistema eólico.

A escolha de uma rede sem fio é justificada pela redução de custos relacionados a ausência de cabamentos extensos e instalações complexas, atrelado a uma baixa necessidade de manutenção e simplicidade da mesma, com baixas perdas na transmissão e facilidade de expansão e modificação da rede de comunicação (AMIRAT et al., 2007).

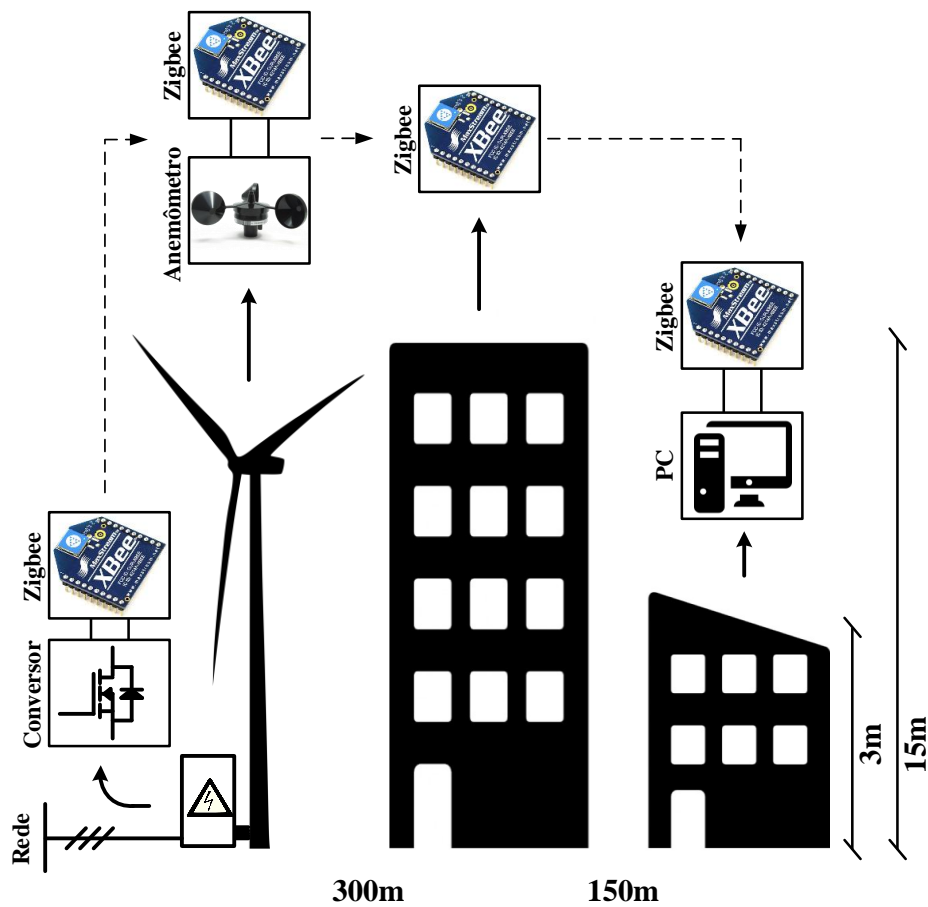
Para isto, serão explorados os módulos de radiofrequência com tecnologia Zigbee, dedicados a formação de redes sem fio pessoais com baixo consumo de energia e alta autonomia, com sistemas que não exigem modificações significativas ao longo de meses ou mesmo anos (NENOKI, 2013). Tais dispositivos cumprem o padrão IEEE 802.15.4 relativo às redes sem fio de uso pessoal (WPAN – *Wireless Personal Area Network*) que operam na frequência ISM (*Industrial Scientific and Medical*), permitindo uma transmissão robusta, com baixas taxas de dados, baixa potência e baixa complexidade. Eles são baseados na técnica de transmissão DSSS (*Direct Sequence Spread Spectrum*), com alta possibilidade de interação (MELO, 2017).

## 1.2 Trabalho proposto

Este trabalho propõe o desenvolvimento de uma rede sem fio de uso pessoal (WPAN) para monitoramento do sistema de geração eólica localizado próximo ao açude Santo Anastácio, na Universidade Federal do Ceará (UFC), campus do Pici. O mesmo é composto por uma turbina de 6kW, modelo VERNE555 da Enersud, um gerador síncrono de ímãs permanente (PMSG - *Permanent Magnet Synchronous Generator*) e um conversor eletrônico, responsável pelo processamento de energia elétrica gerada, para injeção da mesma na rede elétrica.

Serão monitorados os dados de velocidade do vento próximo ao gerador e a potência gerada pelo mesmo utilizando-se dos parâmetros elétricos de tensão e corrente injetados na rede, para posteriormente serem enviados ao laboratório do Grupo de Processamento de Energia e Controle (GPEC), ligado ao Departamento de Engenharia Elétrica (DEE) da UFC, que se encontra a aproximadamente 500 m de distância do sistema eólico a ser supervisionado. Na Figura 1.1 está ilustrado o sistema proposto.

Figura 1.1 – Sistema proposto.



Fonte: Adaptado de Barbosa, Almeida e Oliveira (2017).

Além do envio dos dados do aerogerador já citados, será também prevista a possibilidade de expansão da rede sem fio, permitindo inserção de outras variáveis de medição e monitoramento paralelo de outros sistemas de geração.

### 1.3 Estrutura do trabalho

Este trabalho está organizado em oito capítulos, sendo o primeiro referente a presente introdução, dois de introdução teórica, quatro de desenvolvimento e um conclusivo. Os próximos capítulos estão descritos na sequência:

Capítulo 2 – Energia eólica. Este tópico trata de uma abordagem teórica sobre energia eólica, iniciado com uma contextualização histórica e sua apresentação no mundo atual. Serão abordados o princípio básico de geração de energia eólica e a caracterização dos seus principais componentes e circuitos.

Capítulo 3 – Redes sem fio. Este ponto apresentará uma abordagem teórica sobre as redes *wireless*. Será comentado brevemente sobre o caminho tomado para seu desenvolvimento até chegar-se ao atual protocolo das WPAN, objetivo deste trabalho. Sendo, por seguinte, descrito as principais características e informações básicas para compreensão da rede a ser elaborada no próximo capítulo.

Capítulo 4 – Formação da rede Zigbee. Apresentar-se-ão os procedimentos de montagem da rede wireless e as características associadas a mesma.

Capítulo 5 – Monitoramento da velocidade do vento. Apresentar-se-ão os instrumentos utilizados para a medição e o algoritmo de tratamento e envio dos dados para rede Zigbee.

Capítulo 6 – Monitoramento da potência gerada. Semelhante ao capítulo 5, serão apresentados os instrumentos utilizados para a medição dos parâmetros elétricos relacionados a potência gerada e o algoritmo de tratamento e envio dos dados para rede Zigbee.

Capítulo 7 – Sistema completo de monitoramento remoto. Como o próprio nome propõe, será apresentada uma visão completa do sistema de monitoramento, resultante do desenvolvimento dos três capítulos anteriores.

Capítulo 8 – Conclusão. Por fim, apresentar-se-ão as considerações finais do trabalho, discutindo-se detalhadamente o estudo desenvolvido e proposições para continuidade da pesquisa em termos de trabalhos futuros.

## 2 ENERGIA EÓLICA

A energia eólica caracteriza-se como uma fonte limpa e renovável, cuja geração apresenta diversas vantagens, entre as quais destacam-se o baixo impacto ambiental, ausência de emissão de gases poluentes e rápida implantação após projeto.

### 2.1 Contexto histórico

A utilização da energia dos ventos vem desde os primórdios da humanidade, onde moinhos de vento eram utilizados para fins agrícolas, bombeamento de água e navegação, não sendo clara a data de origem dessa técnica. Já sua aplicação na geração de energia elétrica é recente, datada pelo fim do século XIX. O primeiro moinho de vento para gerar energia foi construído em julho de 1887, na cidade escocesa de Glasgow, pelo professor James Blyth. Tratava-se de uma máquina de 10 m de altura, com eixo vertical, utilizada para carregar os acumuladores de energia utilizados para iluminação de sua casa de campo (MME, 2015).

Há também quem atribua o início dos geradores eólicos ao americano Charles Francis Brush que em 1888, em Cleveland, Ohio, construiu uma turbina de eixo horizontal conectada a 12 baterias para alimentação da sua própria casa. A estrutura possuía 144 pás, 17 m de diâmetro e 18,3 m de altura (PINTO, 2013).

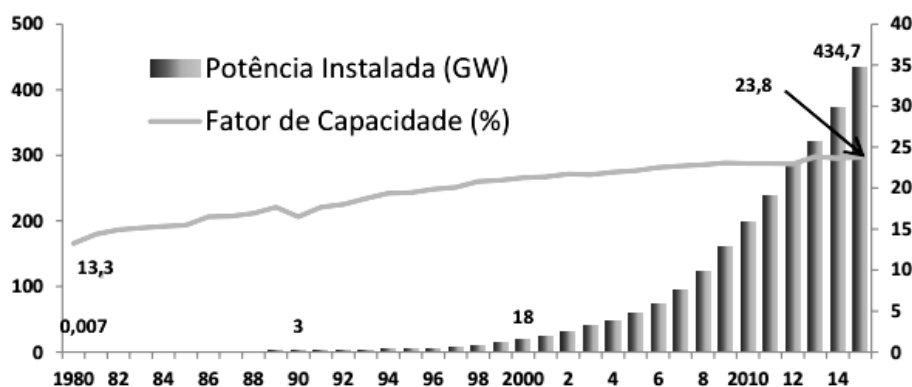
Foi então, a partir desses marcos do século XIX, que os moinhos de vento foram sendo aprimorados por diversos engenheiros. Ainda no final deste século, o meteorologista e físico dinamarquês Poul la Cour conseguiu aperfeiçoar os moinhos para a moderna tecnologia de geração eólica embasando-as em princípios científicos. Já a teoria para o formato aerodinâmico das pás do rotor eólico válido até hoje foi formulada pelo físico alemão Albert Betz (PINTO, 2013).

Apesar da geração eólica ter sido foco de bastante estudo, foi aos poucos perdendo a atenção devido a atratividade financeira dos combustíveis fósseis. Seu reaparecimento se deu em 1980 devido à crise do petróleo, em meados de 1970, quando o preço do combustível fóssil cresceu exponencialmente devido a redução da oferta, surgindo a necessidade da utilização de fontes alternativas de energia elétrica (MME, 2015). Mesmo após a redução dos preços do petróleo, devido a constatação da importância das fontes alternativas para complementação do sistema elétrico e a necessidade de medidas de proteção ambiental, as pesquisas em energias renováveis cresceram e propulsionaram a melhoria das tecnologias e a eficiência dos atuais sistemas eólicos.

### 2.1.1 Cenário Mundial

Considerando que a tecnologia envolvendo sistemas de conversão de energia eólica (WECS - *Wind Energy Conversion System*) foi consolidada durante a década de 1980, a geração de energia aumentou radicalmente durante o século XXI, onde a taxa média de capacidade de geração no mundo foi de 23,7% ao ano, conforme o gráfico apresentado na Figura 2.1 (MME, 2015).

Figura 2.1 – Perfil de potência instalada e fator de capacidade no mundo.



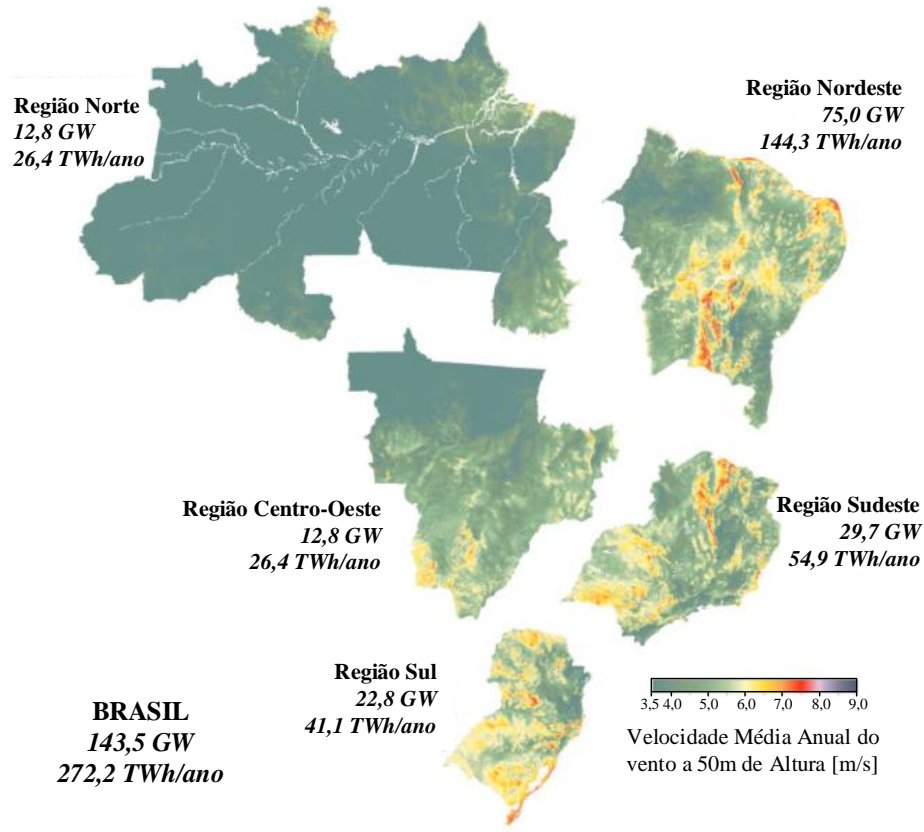
Fonte: Adaptado de MME (2015).

### 2.1.2 Cenário Brasileiro

No Brasil, a geração de energia eólica foi impulsionada principalmente pela crise de energia elétrica em 2001 devido às várias políticas visando sistemas de energia renovável e geração distribuída. O primeiro programa proposto foi o PROEÓLICA com o objetivo de aumentar a geração de energia eólica até 2003. No entanto, como resultado de sua implementação mal sucedida, foi substituído pelo Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (PROINFA), que incentivou a inserção de fontes de energia renováveis na matriz energética nacional e o estabelecimento de empresas fabris dedicadas às turbinas eólicas no país (ABEEÓLICA, [201-]).

O Brasil apresenta um alto potencial eólico devido sua característica continental e localização geográfica, apresentando ventos de alta velocidade, entre as maiores do mundo, e baixas oscilações que possibilitam uma previsão da média de energia eólica a ser gerada no ano, assim como épocas bem definidas que complementam os períodos de baixa disponibilidade de energia hidráulica. O potencial eólico brasileiro é ilustrado na Figura 2.2, cujo os dados foram calculados a partir de simulações de bancos de dados relativos a 15 anos de coleta e elaborado em 2001 com base nas turbinas eólicas existentes na época (EPE, 2007).

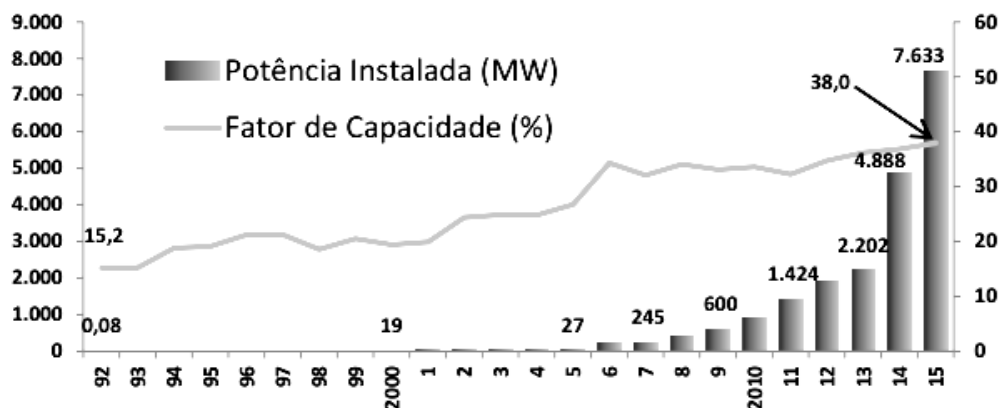
Figura 2.2 – Potencial eólico brasileiro.



Fonte: Adaptado de EPE (2007).

Ainda na Figura 2.2, constata-se também que a maior parte do potencial é encontrado na região Nordeste. O atlas de 2001 serve como orientação sobre a distribuição no país, pois atualmente estima-se um potencial bem mais elevado, sendo previsto a atualização dos bancos de dados através de medições anemométricas e climatológicas realizadas no local dos parques vencedores dos leilões durante todo o período de vigência do contrato (EPE, 2007).

Figura 2.3 – Perfil de potência instalada e fator de capacidade no Brasil.



Fonte: Adaptado de MME (2015).

Em 2015, o Brasil foi o 8º país em níveis de potência instalada (2,7 GW), com um aumento de FC para 38%, um crescimento acima de 100% no período compreendido entre 1992 e 2015, conforme apresentado no gráfico da Figura 2.3, resultado do aumento sucessivo do número e tamanho dos parques eólicos associados à escolha de atrativos sítios para sua implementação (MME, 2015).

## 2.2 Princípio de Funcionamento

O vento corresponde a massas de ar que se deslocam na atmosfera devido a diferença de temperatura e pressão na superfície terrestre. Suas características também estão relacionadas com as variações do relevo e da altitude, entre outros fatores associados à geografia do ambiente. Devido a quantidade de variáveis envolvidas em sua formação, caracteriza-se por uma natureza estocástica, isto é, corresponde a uma variável aleatória cujo seu comportamento em determinado ambiente é levantado através de medições e cálculos estatísticos.

Esse movimento do ar de massa  $m$ , com velocidade  $v$ , apresenta um valor de energia proporcional a seus parâmetros, denominada energia cinética ( $E_c$ ), descrita pela equação (2.1).

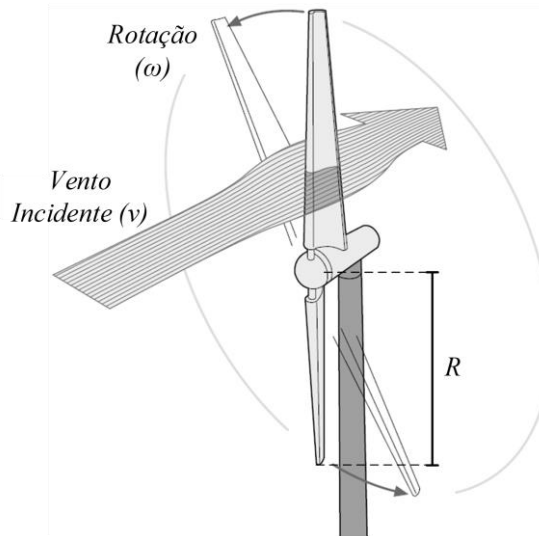
$$E_c = \frac{mv^2}{2} \quad (2.1)$$

A geração de energia elétrica por sistemas eólicos consiste basicamente em etapas de conversão de energia, onde inicialmente a energia cinética do vento é convertida em energia mecânica, acionando um gerador que converterá esta última em energia elétrica.

### 2.2.1 Princípio de conversão

O vento, de massa  $m$  [kg] e velocidade  $v$  [m/s], incide sobre as pás de uma turbina eólica, cada uma com  $R$  [m] de comprimento, e parte da energia cinética contida na massa de ar é transferida para a turbina que se encontra em movimento rotacional em torno de um eixo (horizontal ou vertical), com velocidade angular  $\omega$  [rad/s] e raio correspondente ao comprimento de uma das pás, como apresentado na Figura 2.4.

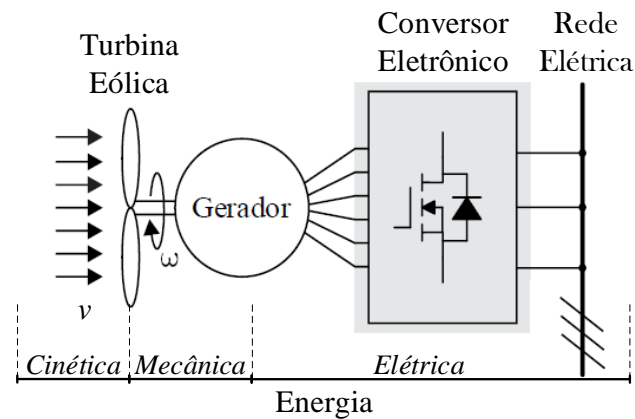
Figura 2.4 – Conversão da energia cinética em mecânica.



Fonte: Adaptado de ABB (2011).

A energia mecânica gerada pela rotação das pás é transferida para o eixo de um gerador elétrico, onde ocorrerá a conversão em energia elétrica. Convém ressaltar que os termos derivados de “gerar”, utilizados na descrição dos processos citados, na verdade correspondem a conversões de energias, obedecendo ao princípio da conservação de energia. A Figura 2.5 ilustra cada etapa de conversão em um sistema de geração eólica.

Figura 2.5 – Etapas de conversão de energia em um sistema eólico.



Fonte: Adaptado de Guimarães (2016).

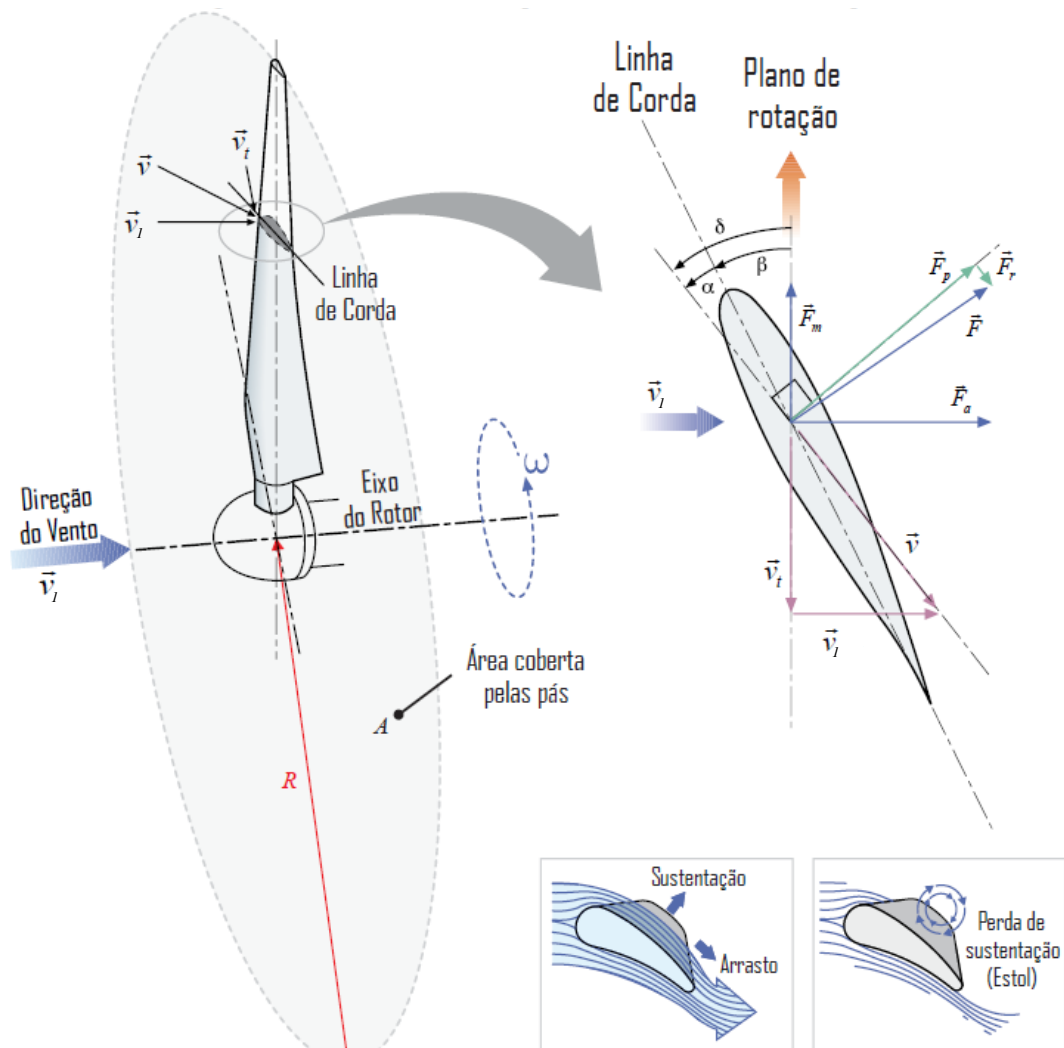
Na Figura 2.5 é possível observar que além dos componentes citados anteriormente, são utilizados conversores eletrônicos para adequar os sinais elétricos na saída do gerador em valores de tensão, frequência e defasamento angular aos padrões impostos pela rede elétrica de conexão. É importante lembrar que durante o processo há também conversões em energia térmica e sonora, que implicam em reduções na eficiência do sistema eólico.



### 2.2.2 Aerodinâmica das pás

Seccionando uma das pás da turbina perpendicularmente, é possível ter a imagem bidimensional de um aerofólio assimétrico e entender como as forças atuam sobre um determinado ponto da asa. Em um aerofólio, são três forças principais que agem sobre o mesmo: a força de sustentação ( $F_p$ ), a força de arrasto ( $F_r$ ) e a força motriz ( $F_m$ ). A seção do aerofólio está ilustrada através da Figura 2.6.

Figura 2.6 – Características das forças atuantes na aerodinâmica de uma pá.



Fonte: Adaptado de Guimarães (2016).

O vento  $v_l$ , de direção perpendicular ao plano de rotação da turbina, definido pela área  $A$ , incide sobre as pás do aerogerador contribuindo para o movimento rotacional das mesmas, induzindo uma outra componente de velocidade  $v_t$ , oposta ao sentido de rotação e proporcional a velocidade angular  $\omega$  do sistema. A soma vetorial dessas duas componentes resulta em um fluxo de vento  $v$ , que produzirá duas componentes de forças no aerofólio, uma

perpendicular, correspondente a força de sustentação  $F_p$ , e uma paralela, que corresponde a força de arrasto  $F_r$ . A soma dessas duas componentes resulta em uma terceira força  $F$ . Por conseguinte, esta força  $F$  pode ser decomposta em duas outras componentes, uma força mecânica  $F_m$  transversal a direção do vento incidente, responsável pela produção de torque no sistema, e uma força axial  $F_a$ , sem produção de torque útil, gerando estresses no suporte do rotor. Como pode ser observado ainda na Figura 2.6, a intensidade dessas forças depende do ângulo de ataque  $\alpha$  (ângulo de defasagem entre a linha de corda e o vento resultante  $v$ ), sendo a linha de corda o maior comprimento da seção do aerofólio (ABB, 2011).

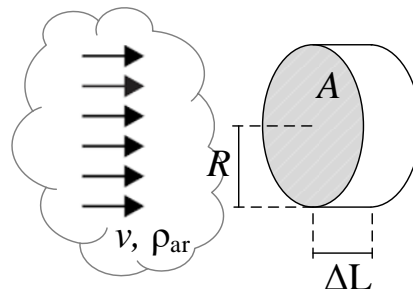
O ângulo de passo  $\beta$  corresponde a defasagem entre a linha de corda e o plano de rotação e é um importante parâmetro para o desempenho da turbina, como será apresentado mais adiante.

A perda de sustentação, indicado na Figura 2.6, é relacionada ao termo “estol”, que ocorre quando ventos intensos aumentam o ângulo de ataque, reduzindo a componente de sustentação e aumentando a força de arrasto, implicando em perdas na extração de potência (GUIMARÃES, 2016).

### 2.2.3 Extração da potência

Para quantificar a potência contida no vento, imagina-se um cilindro de área  $A$  [m<sup>2</sup>], raio  $R$  [m] e comprimento  $\Delta L$  [m], pelo qual incide um vento de direção perpendicular com velocidade  $v$  [m/s] e densidade  $\rho_{ar}$  [kg/s<sup>3</sup>], conforme ilustra-se na Figura 2.7.

Figura 2.7 – Ilustração de uma massa de ar incidindo em um cilindro.



Fonte: Próprio autor

Ao atravessar o cilindro, a massa de ar se ajusta de forma a preencher todo o volume do objeto (neste caso serão desconsideradas as não idealidades de perda de velocidade e distribuição não uniforme), podendo a massa de ar ser modelada pelo volume do cilindro e a densidade do ar, conforme a equação (2.2).

$$m = \rho_{ar} \cdot (A \cdot \Delta L) \quad (2.2)$$

A variação do tempo  $\Delta t$  da passagem do ar pelo cilindro pode ser definida pela razão da distância percorrida pelo vento,  $\Delta L$ , e a velocidade com que o mesmo o atravessa. Logo, a potência instantânea do vento que incide no cilindro pode ser dada pela taxa de energia cinética do vento durante o tempo  $\Delta t$  ( $\Delta t \rightarrow 0$ ). Utilizando das equações (2.1) e (2.2), obtém-se a expressão (2.3) para a potência do vento incidente.

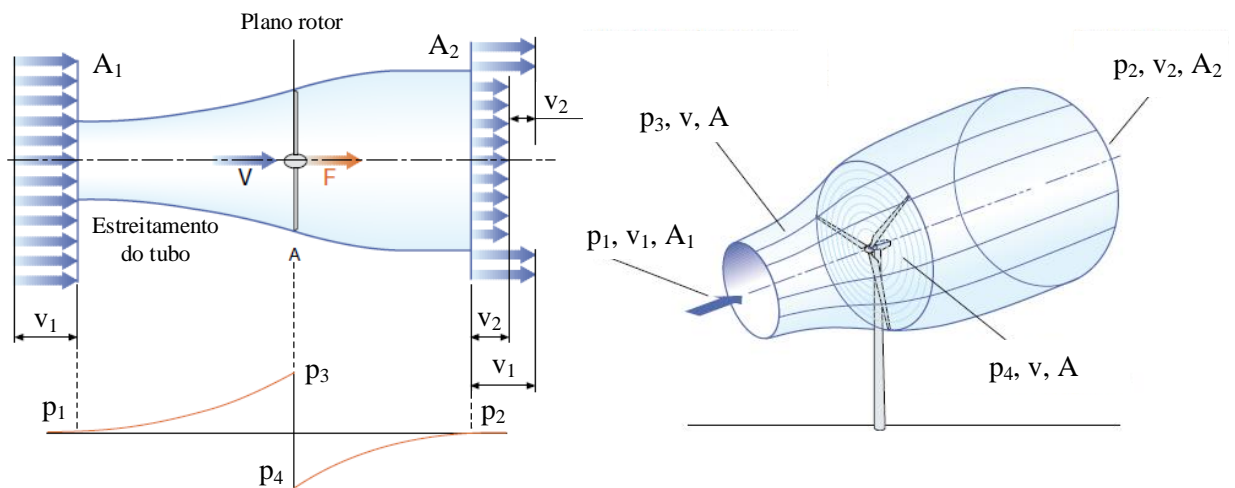
$$P_{vento} = \frac{Ec}{\Delta t} = \frac{(\rho_{ar} \cdot A \cdot \Delta L) \cdot v^2}{2} \cdot \frac{v}{\Delta L} \quad (2.3)$$

$$P_{vento} = \frac{1}{2} \cdot \rho_{ar} \cdot A \cdot v^3$$

Com isso, conclui-se que a potência contida no vento é proporcional ao cubo da velocidade do mesmo, ou seja, a velocidade do vento é um parâmetro de grande importância para a geração de potência em um aerogerador.

Porém, somente uma parte da energia cinética do vento é aproveitada pela turbina, pois há uma variação de pressão, velocidade e área no decorrer do percurso adotado pela massa de ar, conforme ilustrado na Figura 2.8, além de perdas como atrito, sombras nas pás e transmissão.

Figura 2.8 – Velocidade resultante da turbina.



Fonte: Adaptado de ABB (2011).

A expansão do tubo implica em uma redução da velocidade do vento  $v_1$  ligeiramente a montante das pás para  $v$ , a taxa de compressão do tubo é descrita pelo fator de indução axial  $a$ , que relaciona as duas velocidades a montante do plano do rotor.

$$a = \frac{(v_1 - v)}{v_1} = 1 - \frac{v}{v_1} \quad (2.4)$$

Com isso, a massa do vento que atravessa as turbinas apresenta uma taxa de variação conforme equação (2.5).

$$\dot{m} = \rho_{ar} \cdot A \cdot v \quad (2.5)$$

A potência extraída do vento é então derivada da energia cinética contida no mesmo, onde somente é considerado a taxa de variação temporal da massa, conforme a equação (2.6).

$$P_{mec} = \frac{dEc}{dt} = \frac{1}{2} \cdot \dot{m} \cdot (v_1^2 - v_2^2) = \frac{1}{2} \rho_{ar} \cdot A \cdot v \cdot (v_1^2 - v_2^2) \quad (2.6)$$

Sendo o vento um fluido não viscoso, seu comportamento pode ser descrito pelo teorema de Bernoulli, que aplicado as condições de fluxo apresentadas na Figura 2.8, tem-se que a velocidade do vento resultante na pá pode ser estimada pela média das velocidades de entrada e saída, conforme expressão (2.7).

$$v = \frac{(v_1 + v_2)}{2} \quad (2.7)$$

Manipulando as expressões (2.7) e (2.4) em função das variáveis  $v_1$  e  $a$ , obtêm-se a equação (2.8) para a potência mecânica extraída do vento.

$$P_{mec} = 2 \cdot \rho_{ar} \cdot A \cdot v_1^3 \cdot a \cdot (1 - a)^2 \quad (2.8)$$

Aplicando o teorema do valor máximo na equação (2.8), encontra-se a potência máxima teórica em uma turbina eólica, que ocorre para um fator de indução de 1/3, isto é, quando  $v$  corresponde a dois terços da velocidade do vento incidente. Esse limite teórico de máxima extração de potência é conhecido como limite de Lanchester-Betz e corresponde a aproximadamente 59,3 % da potência do vento  $v_1$ . (ABB, 2011).

## 2.2.4 Principais características de desempenho

Duas importantes características de desempenho em uma turbina são o coeficiente de potência e a taxa de velocidade de ponta, comumente referida pelo termo inglês *Tip Speed Ratio* (TSR).

### 2.2.4.1 Coeficiente de potência ( $C_p$ )

Comparando as expressões (2.3) e (2.8), verifica-se a existência de um fator que relaciona a potência mecânica gerada e a potência disponível no vento.

$$C_p(a) = \frac{P_{mec}}{P_{vento}} = 4 \cdot a \cdot (1 - a)^2 \quad (2.8)$$

Este fator é denominado coeficiente de potência, que define quanto da potência disponível no vento está sendo aproveitada pelo aerogerador. O coeficiente de potência é mais usualmente descrito como uma função do TSR ( $\lambda$ ) e do ângulo de passo  $\beta$ , dois parâmetros que podem ser controlados para maximizar o  $C_p(\lambda, \beta)$  do aerogerador. A partir dele, é possível estimar a potência gerada na turbina para diversas condições de vento conforme define a expressão (2.9).

$$P_{mec} = C_p(\lambda, \beta) \cdot P_{vento} \quad (2.9)$$

#### 2.2.4.2 Taxa de velocidade de ponta (TSR)

A taxa de velocidade de ponta, também comumente representada por  $\lambda$ , relaciona a velocidade tangencial na ponta da pá,  $v_t$ , com a velocidade do vento incidente.

$$\lambda = \frac{v_t}{v_1} = \frac{\omega \cdot R}{v_1} \quad (2.10)$$

Logo, observa-se pela expressão (2.10) que o TSR pode ser ajustado pelo controle da velocidade de rotação do rotor quando  $v_1$  apresenta valores distantes do desejado para a máquina.

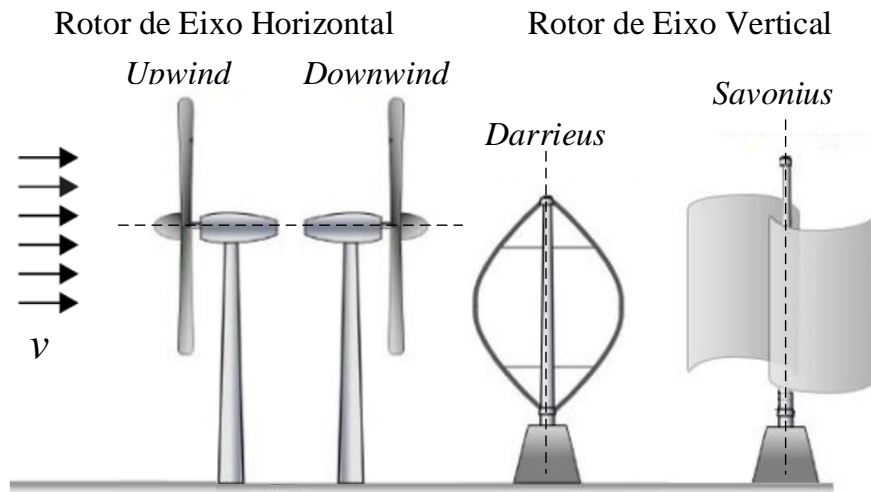
### 2.3 Classificação dos sistemas de geração eólica

Os sistemas de geração eólica podem ser classificados quanto a posição do eixo da turbina, quanto ao local de instalação e quanto ao nível de potência de geração.

#### 2.3.1 Classificação quanto a posição do eixo do rotor

Podem ser classificadas em turbinas de eixo vertical e turbinas de eixo horizontal, conforme ilustrado na Figura 2.9.

Figura 2.9 – Classificação das turbinas quanto a direção do eixo do rotor.



Fonte: Adaptado de EPE (2016).

### 2.3.1.1 Eixo vertical

São turbinas cujo o eixo é orientado de maneira perpendicular à direção do vento, conforme apresentado na Figura 2.9, operando com ventos de qualquer direção, o que justifica a ausência de controles de direcionamento das pás. Tem também como vantagem a possibilidade de instalação da nacelle (local onde se instala os maquinários elétricos e mecânicos) no solo, o que facilita a manutenção e reduz o peso sobre a torre (PINTO, 2013).

São turbinas de baixas torres, aproveitando a potência dos ventos em baixas altitudes, o que acarreta a desvantagem de menores velocidades e maior turbulência do vento próximo do solo, limitando os valores máximos de geração de energia.

As duas principais configurações são a Darrius e Savonius, que são a base dos outros modelos encontrados no mercado. A Darrius funciona pelo princípio da força de sustentação e se caracteriza pela sua elevada velocidade e alta eficiência dentro dos modelos de eixo vertical, aproximando-se do limite de Betz. Já a Savonius tem como base a força de arrasto (transferência de quantidade de movimento) e se caracteriza pelo seu alto torque, baixa velocidade e baixa eficiência, geralmente inferior à metade do limite de Lanchester-Betz (EPE, 2016). Ambos os modelos estão representados na Figura 2.9.

### 2.3.1.2 Eixo horizontal

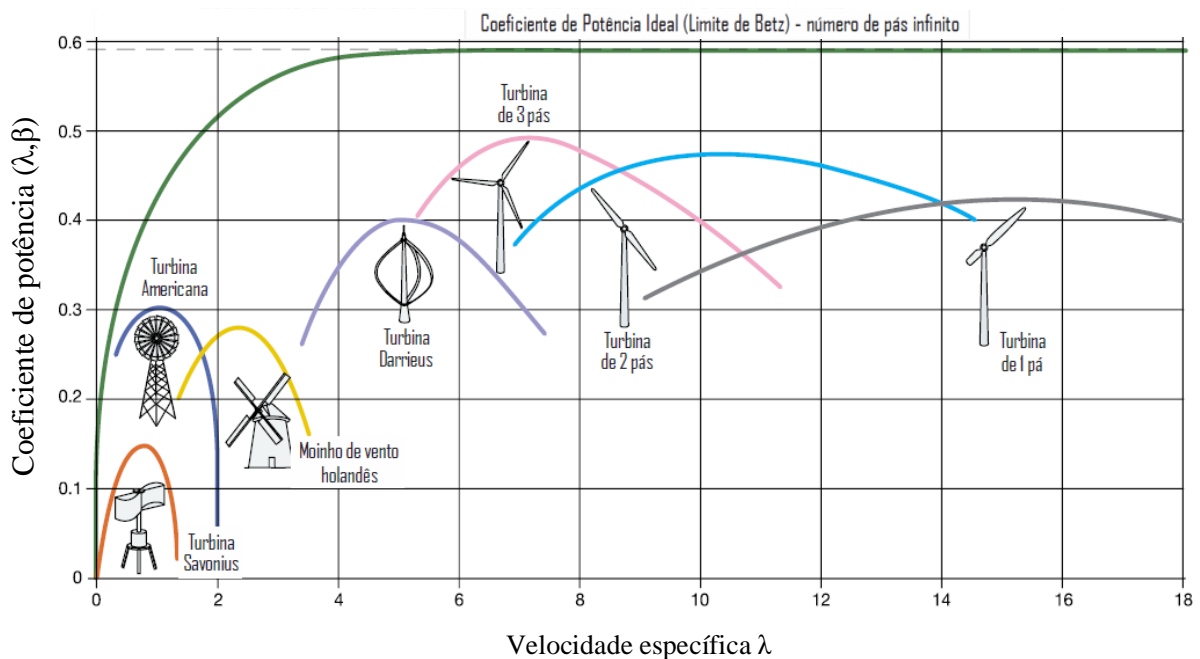
O eixo de rotação é paralelo a direção do vento incidente e é o princípio dominante na tecnologia eólica atual. A velocidade do rotor e a potência de saída podem ser controlados pelo direcionamento dos ângulos das pás, e o formato das mesmas costuma ser otimizado para

e elevar a eficiência ao máximo quando atingida a máxima sustentação aerodinâmica. Suas principais desvantagens são dificuldades construtivas (como altas torres, grandes pás e o peso da nacelle sobre a estrutura), problemas de transporte e instalação, além da complexidade nos projetos de controle de ajuste das pás e do nível de potência extraída para a melhor eficiência do sistema. A liderança tecnológica no desenvolvimento de projetos de hélices, melhor controle sobre a potência gerada, além do aproveitamento da velocidade do vento em elevadas alturas, sobrepõem as desvantagens apresentadas e justificam a dominância dessa configuração no mercado (PINTO, 2013).

Também são divididas em duas subcategorias, as turbinas *upwind*, cujo o vento incide direto nas pás, e a *downwind*, no qual o vento incide primeiramente na torre, conforme apresentadas previamente na Figura 2.9.

As turbinas de eixo horizontal podem possuir número variado de pás, porém, as de três pás são as que apresentam o melhor balanço entre os critérios de eficiência, ruído, estética e esforços mecânicos. Sua superioridade de desempenho está ilustrada através na Figura 2.10, que apresenta um comparativo entre os tipos de turbinas apresentadas.

Figura 2.10 – Coeficiente de potência para diversos tipos de turbinas.



Fonte: Adaptado de Guimarães (2016).

### 2.3.2 Classificação quanto a localização da turbina

Esta classificação está relacionada a posição do sistema de geração eólico, podendo ser em terra, denominada *onshore*, ou nas costas marítimas, classificada como *offshore*, conforme ilustrado na Figura 2.11.

Figura 2.11 – Classificação dos sistemas quanto a localização.



Fonte: Adaptado de Neves (2016).

#### 2.3.2.1 Sistemas Onshore

São as mais usuais e de utilização desde os primórdios da geração eólica, geralmente localizadas em áreas de alta altitude e grande incidência de ventos, como regiões montanhosas e costeiras. Costumam ser divididas em duas subcategorias: centralizada e distribuída. As centralizadas correspondem aos parques eólicos compostos por grandes aerogeradores (maiores que 3000 kW) interligados ao Sistema Interligado Nacional (SIN). As gerações distribuídas são caracterizadas por aerogeradores de pequeno e médio porte (menores que 3000 kW), que fornecem energia diretamente para casa, fazendas, empresas, instalações industriais entre outros tipos de consumidores, podendo ou não estarem conectadas ao SIN (EPE, 2016).

#### 2.3.2.2 Sistemas Offshore

São sistemas localizados na orla marítima, uma tendência em países com pequena extensão territorial, com pouco espaço de terra disponível para expansão da geração eólica ou cujos recursos eólicos são melhores no mar.



Esta possibilidade de instalação motivou o mercado para as turbinas de eixo vertical que apresentam características favoráveis a esses sistemas, como aproveitamento das velocidades do vento em baixa altitude (próximos ao mar), ausência de controle de direção das pás e possibilidade de instalação do gerador elétrico na base da torre, o que reduz os problemas com peso e manutenção do sistema ao ser instalado em uma plataforma marítima (EPE, 2016).

### 2.3.3 Classificação quanto ao nível de potência

São definidas em pequeno, médio e grande porte, conforme o nível de potência nominal. A Tabela 2.1 apresenta as faixas de potência para cada classe (ANEEL, 2015).

Tabela 2.1 – Classificação das turbinas quanto ao nível de potência.

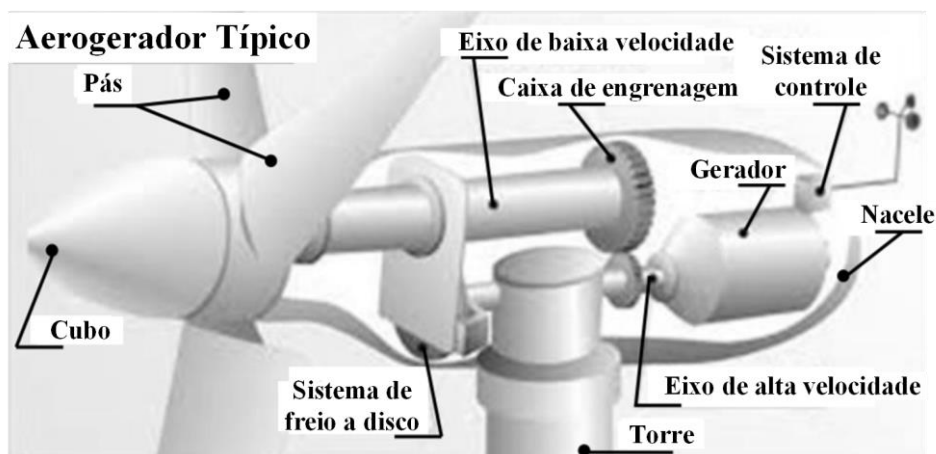
| Definição do Porte | Potência Nominal       | Mercado        |
|--------------------|------------------------|----------------|
| Pequeno porte      | Menores que 500 kW     | Microgeração   |
| Médio porte        | Entre 500 kW e 3000 kW | Minigeração    |
| Grande porte       | Maior que 3 MW         | Maior que 3 MW |

Fonte: Adaptado de ANEEL (2015).

## 2.4 Componentes de um sistema eólico

Os principais componentes de uma turbina são o rotor, gerador e o eixo. Sucintamente, o rotor é composto pelo conjunto das pás e do cubo, responsável por capturar a energia do vento, enquanto o gerador é o responsável pela conversão de energia mecânica em elétrica. A transferência da energia captada no rotor para o gerador é realizada através do eixo. Na Figura 2.12 são apresentados os componentes de um aerogerador típico.

Figura 2.12 – Componente de uma turbina eólica.



Fonte: Adaptado de MME (2015).

A seguir são definidos os componentes de uma turbina eólica:

- Torre: elemento de sustentação do rotor e, no caso das turbinas de eixo vertical, da nacelle. Podem ser dos tipos tubulares cônicas (aço ou concreto) ou treliçadas (aço). Há também as torres híbridas, são tubulares com parte inferior de concreto e superior em aço (EPE, 2016).
- Rotor: é o elemento responsável pela captura de energia composto pelas pás e o cubo.
- O cubo: estrutura de fixação das pás e de seus sistemas para controle do ângulo de ataque e de passo (EPE, 2016), construído em materiais de aço ou liga metálica de alta resistência (PINTO, 2013).
- Pás: são perfis aerodinâmicos sobre qual o vento incide para a produção do torque. São fabricadas em material compósito, como resina epóxi ou poliéster reforçada com fibra de vidro e/ou fibra de carbono (EPE, 2016).
- Nacelle: estrutura que abriga diversos componentes da turbina, entre eles: eixo, caixa de engrenagem, gerador, transformador e sistemas de direcionamento quando existentes no projeto (EPE, 2016). São utilizados os mesmos materiais construtivos do cubo.
- Caixa de engrenagem: sincronizam a baixa velocidade do rotor com a alta do gerador, funcionam como dispositivos multiplicadores. Sua utilização é opcional, podendo ser substituída por outras técnicas, como geradores com alto número de polos, o que reduz a velocidade do mesmo.
- Eixo: transfere a energia mecânica do rotor para o gerador.
- Gerador: responsável pela produção de energia elétrica, sendo as máquinas assíncronas de indução e as síncronas as mais difundidas em sistemas eólicos. Os geradores de indução são mais robustos e mecanicamente mais simples, porém operam com valores reativos, enquanto os síncronos são mais caros e volumosos, porém permitem o controle de reativos, podendo operar com fator de potência unitário e maior número de polos, o que os tornam mais utilizados em turbinas com velocidade variável (PINTO, 2013).
- Conversores eletrônicos: circuitos de processamento de energia que regulam os parâmetros elétricos conforme a rede de interligação do sistema eólico.

## 2.5 Características do sistema eólico a ser supervisionado

O sistema eólico a qual o presente trabalho se refere caracteriza-se por um sistema *onshore* de pequeno porte (6kW), composto por turbina de eixo horizontal com três pás e gerador síncrono de ímã permanente (PMSG - *Permanent Magnet Synchronous Generator*). Na Tabela 2.2 são apresentadas as principais características da turbina.

Tabela 2.2 – Principais características do gerador.

| Parâmetros do Flyback |                      |
|-----------------------|----------------------|
| Diâmetro da Hélice    | 5,55 m               |
| Número de pás         | 3                    |
| Potência a 10 m/s     | 6 kW                 |
| Número de Polos       | 30                   |
| Topologia do Gerador  | PMSG com fluxo axial |

Fonte: Adaptado de Guimarães (2016).

### 3 REDES SEM FIO

Redes sem fio, ou comumente chamado pelo termo inglês *wireless* (sem fio), são sistemas de comunicação que utilizam como meio de conexão para transmissão de dados o ar, dispensando a utilização de fios ou cabos de comunicação, como o próprio nome propõe. Como principais vantagens do uso de redes sem fio, destacam-se: mobilidade, estética, praticidade, alcance e economia de material.

#### 3.1 Desenvolvimento das redes sem fio

O processo mais difundido para comunicação *wireless* é a transmissão através de ondas de radiofrequência (RF), propulsionada pelo italiano Guglielmo Marconi no século XIX, período a partir do qual iniciou-se os diversos estudos, conferências e normalizações sobre a utilização da transmissão *wireless* em escala global, surgindo diversas tecnologias como a GSM (*Global System for Mobile Communications*), TDMA (*Time Division Multiple Access*), CDMA (*Code Division Multiple Access Global System for Mobile Communications*), GPRS (*General Packet Radio Service*), EDGE (*Enhanced Data Rates for GSM Evolution*), entre outros (RIVERA, 2010).

Com o crescente número de tecnologias para comunicação *wireless* e demandas de mercado, em 1989, o FCC (*Federal Communication Commission*), órgão regulador das comunicações dos Estados Unidos, regulamentou e liberou as frequências de uso livre de 900 MHz, 2,4 GHz e 5 GHz, conhecidas como ISM (*Industrial, Scientific and Medical*), destinadas à utilização por equipamentos industriais, científicos e médicos. Foi então que, no ano seguinte, o IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*) intensificou seus estudos nessa promissora área (RIVERA, 2010).

Atualmente, os padrões de rede sem fio e as recomendações práticas para os mesmos são desenvolvidos e mantidos pelo comitê de padrões IEEE 802 LAN/MAN *Standards Committee* (D'AMBROSIA, 2017), gerenciado pela divisão de padronização IEEE-SA (*Institute of Electrical and Electronics Engineers Standard Association*) (VICENTIN, 2016). Os padrões mais utilizados para as redes sem fios estão listados a seguir:

- 802.11 - *Wireless LAN Working Group*
- 802.15 - *Wireless Personal Area Network (WPAN) Working Group*
- 802.16 - *Broadband Wireless Access Working Group*

### 3.2 Tecnologias de comunicação sem fio

As tecnologias wireless podem ser classificadas em quatro principais grupos de acordo com o alcance e a taxa de transmissão (CORRÊA et al., 2006), conforme apresentadas a seguir:

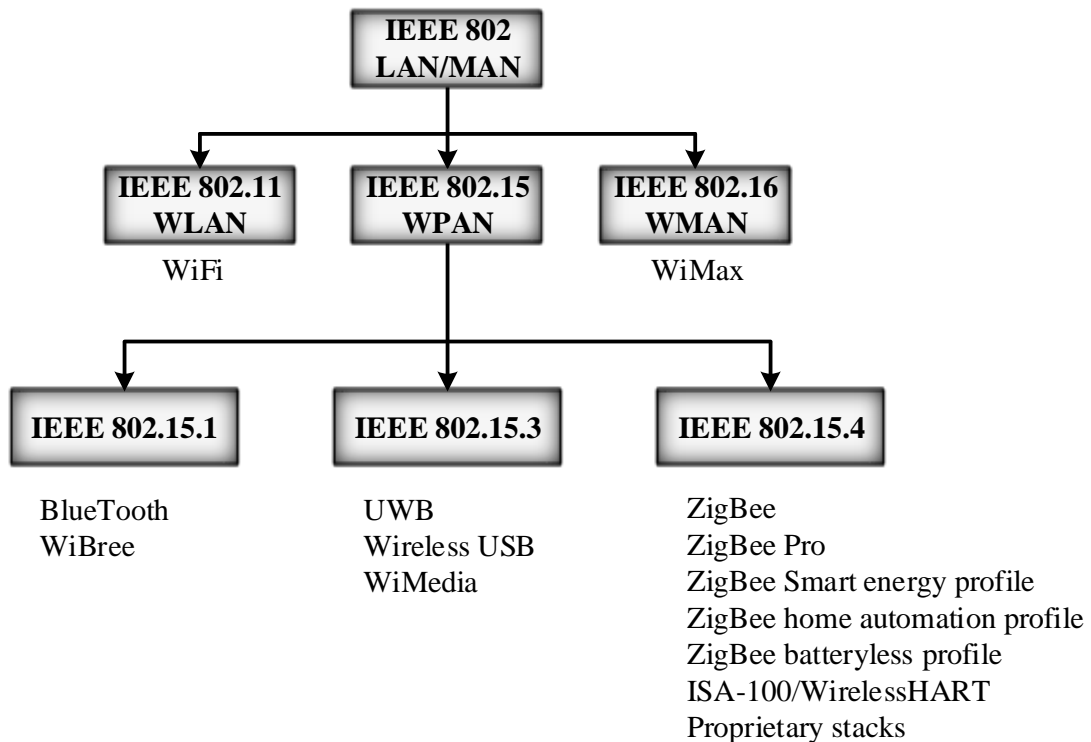
- WWAN (*Wireless Wide Area Network*) – Englobam as tecnologias destinadas às grandes áreas geográficas, correspondem às redes de longa distância, atendendo aos serviços de voz e de dados. Um exemplo da magnitude dessa rede é a Internet, que interliga continentes.
- WMAN (*Wireless Metropolitan Area Network*) – Correspondem às redes de uso corporativo que atravessam cidades e estados, isto é, abrangem áreas metropolitanas. Como exemplo tem-se o WiMax, que obedece ao padrão IEEE 802.16.
- WLAN (*Wireless Local Area Network*) - Correspondem às redes de áreas locais e são destinadas à interligação de redes locais com curto alcance, embora maiores que as WPAN. Trata-se de um padrão implementado como extensão ou alternativa para as redes com cabeamento convencional (par metálico ou fibra óptica). Como exemplo tem-se o WiFi, definido pelo padrão 802.11.
- WPAN (*Wireless Personal Area Network*) – Correspondem às redes de áreas pessoais sem fio que se caracterizam por pequeno alcance e baixa taxa de transmissão, com aplicações em interligamento de dispositivos pessoais ou redes de sensores sem fio, também denominadas WSN (*Wireless Sensor Network*), que são temas atuais de diversas pesquisas, com a tendência de revolucionar vários segmentos da economia e atividades do dia a dia. Esse grupo é definido pelo padrão IEEE 802.15.

O padrão IEEE 802.11 foi o primeiro dos protocolos de redes sem fio inspirado no padrão Ethernet (IEEE 802.3), tornando-se um concorrente e complementar desse último, no qual se encaixa uma das tecnologias mais utilizadas atualmente, o Wi-Fi (*Wireless Fidelity*), proposto pela *Wi-Fi Alliance*® (STERBENZ, 2016). Este padrão foi responsável pelo aprofundamento das pesquisas em redes sem fio de uso pessoal.

O sucesso da tecnologia Wi-Fi deu espaço para o desenvolvimento da tecnologia WiMAX, definida pelo padrão IEEE 802.16, ampliando o acesso sem fio para áreas mais amplas, englobando cidades e regiões metropolitanas (VICENTIN, 2016).

Uma visão geral dos principais padrões IEEE 802 LAN/MAN abordados e seus respectivos grupos e tecnologias existentes é ilustrada mais adiante pela Figura 3.1 através de diagrama de blocos.

Figura 3.1 – Alguns padrões baseados no IEEE 802 LAN/MAN.



Fonte: Adaptado de Melo (2017).

Como resultado da padronização das redes sem fio de uso pessoal definiu-se o padrão IEEE 802.15, que vem ganhando bastante destaque com propostas de redes de sensores sem fio para monitoramento de sistemas diversos. O mesmo foi derivado da versão *Bluetooth* V1.1, da *Bluetooth Alliance*®, cujas especificações originaram o primeiro padrão do grupo WPAN IEEE 802.15.1 (STERBENZ, 2016).

Para redes de monitoramento sem fio, o foco deste trabalho, prevê-se a comunicação de sensores e outros dispositivos pessoais. Desta forma, a partir deste ponto, será abordada a teoria sobre redes WPAN.

### 3.3 Tecnologias do grupo WPAN

Conforme já foi apresentado, o grupo WPAN engloba as redes wireless de curto alcance e baixa taxa de transmissão que obedecem ao padrão IEEE 802.15. São redes que se utilizam da frequência ISM com finalidade de padronizar as telecomunicações e a troca de informação entre sistemas dentro do espaço de operação pessoal POS (*Personal Operating Space*), especificando a camada física (PHY - *Physical Layer*) e a camada de controle de acesso ao meio (MAC - *Medium Access Control*) (RIVERA, 2010).

No início, o desenvolvimento de tecnologias PAN esteve voltado para comunicação entre dispositivos eletrônicos pessoais, apresentado pelo padrão 802.15.1, no qual se encontra a tecnologia Bluetooth. Com o crescente interesse industrial em redes PAN, foi desenvolvido o padrão 802.15.4, visando a formação de redes de sensores sem fios com aplicabilidade em diversos ramos de pesquisa, como: monitoramento de eventos, supervisão de dispositivos médicos, controle e automação industrial, reconhecimento geográfico, entre outras diversas aplicações cujas necessidades de baixa latência e baixo consumo de energia sobrepõem a necessidade de elevada largura de banda (RIBEIRO, 2008). Dentro deste grupo se enquadra o padrão Zigbee, que será de grande importância para o trabalho proposto.

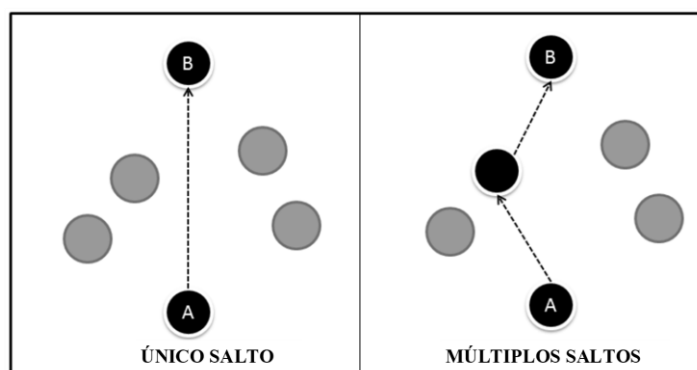
### 3.3.1 Definição de Termos

Para uma melhor compreensão da estrutura e funcionamento das WPAN e suas aplicações, neste tópico serão apresentados alguns conceitos relacionados.

Nó: unidade básica de uma rede, referente a qualquer ponto de comunicação que faz parte da construção da mesma. Um nó geralmente é composto por um dispositivo fornecedor/receptor de dados, um processador, *modem wireless* e fonte de alimentação (autonomia do sistema) (SILVA, 2011).

Salto: refere-se ao número de dispositivos que são utilizados durante o estabelecimento do caminho (*link*) para transferência de dados. Uma transmissão pode ser em único salto, que corresponde a uma comunicação direta entre o transmissor e receptor, ou em múltiplos saltos, no qual um terceiro ou maior número de nós são utilizados para estabelecer o *link* de comunicação entre transmissor e receptor (SILVA, 2011).

Figura 3.2 – Tipos de salto em uma rede WPAN.



Fonte: Adaptado de Silva (2011).

Rádio *transceivers*: dispositivo transmissor e receptor em radiofrequência.

Camada Física (PHY - *Physical Layer*): camada responsável pela ativação e desativação do rádio *transceiver*, medição da energia do sinal dentro do canal especificado, indicação da qualidade do sinal, seleção da frequência do canal e transmissão e recepção dos dados (SILVA, 2011).

Camada de controle de acesso ao meio (MAC - *Medium Access Control*): camada responsável por controlar toda a operação de acesso à camada física para transmissão e recepção de dados, servindo como interface entre a camada PHY e as camadas superiores que estão fora do escopo da IEEE 802.15 (regulam as camadas PHY e MAC). Suas principais funções são associação e desassociação de nós, acesso aos canais utilizando o mecanismo de prevenção de colisão CSMA-CA (*Carrier Sense Multiple Access – Collision Avoidance*), gerenciamento de *time slot* para transmissão, confirmações de dados pela geração de ACKs (*Acknowledgement*) e criação de links entre duas entidades MAC (SILVA, 2011; CAMPOS, 2010).

FHSS (*Frequency Hopping Spread Spectrum*): técnica de modulação que gera um sinal portador de banda estreita que salta de uma frequência para outra de maneira pseudoaleatória, permitindo a coexistência de um grande número de redes (CORRÊA et al., 2006).

DSSS (*Direct Sequency Spread Spectrum*): técnica de modulação que gera um padrão redundante de bits para cada bit transmitido, filtrando ruídos ou interferências pela diferença dos mesmos em relação ao padrão, usada para transmitir um sinal sobre uma ampla banda de frequência, tendo como desvantagem um alto consumo de energia (CORRÊA et al., 2006).

Redes *Ad-Hoc*: são redes sem fio com topologia dinâmica, isto é, não há um nó principal para convergência das informações, o *link* de transmissão de dados altera conforme solicitado pelo destinatário de maneira autônoma baseada em algoritmos que buscam maior velocidade na comunicação, visando atender a demanda da rede (SILVA, 2011).

### **3.3.2 Tecnologia Bluetooth (IEEE 802.15.1)**

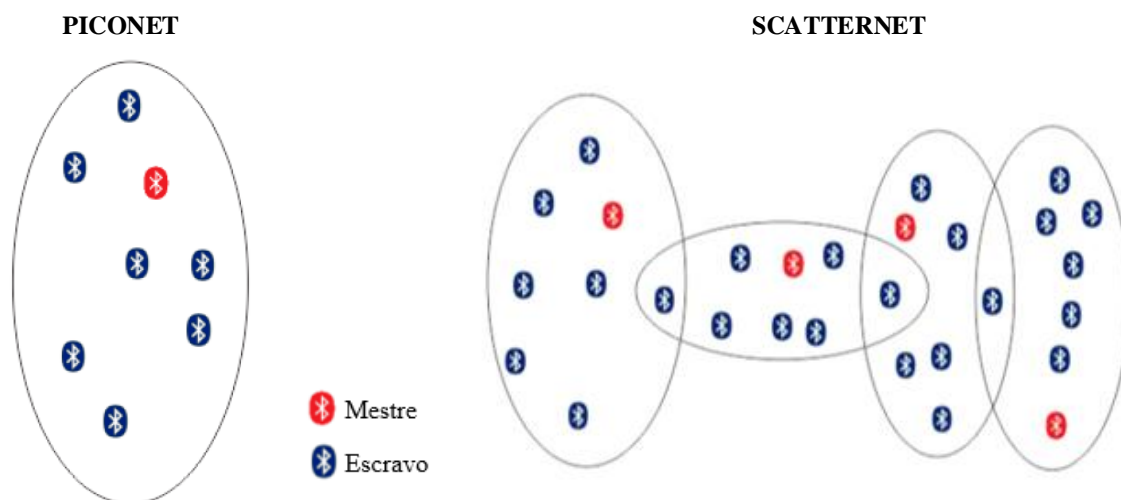
São dispositivos que operam na faixa de frequência ISM, utilizando a modulação FHSS. As faixas dividem-se em 79 diferentes frequências para comunicação entre dispositivos mestre e escravos, que são os dois modos de operação que um dispositivo Bluetooth pode operar dentro de uma rede (SEABRA; LUGLI, 2014).

As conexões de redes suportadas pelo Bluetooth são duas: conexões *Piconets*, constituídas por um dispositivo mestre e até 7 escravos ativos, permitindo até 255 escravos



inativos esperando comunicação dentro da rede, e conexões *Scatternet*, constituição de um sistema mais disperso composto de várias redes com quantidade de dispositivos limitada (RIVERA, 2010). A Figura 3.3 ilustra essas duas configurações de redes.

Figura 3.3 – Topologias de redes Bluetooth.



Fonte: Adaptado de Seabra e Lugli (2014).

Dentro dessas configurações é possível transmitir sinal de dados e voz através de dois tipos diferentes de conexão: *SCO (Synchronous Connection Oriented)*, que corresponde a uma conexão do tipo ponto-a-ponto (PP) entre mestre e escravo, e o *ACL (Asynchronous Connection Less)*, que corresponde a uma conexão ponto-multiponto (PMP) realizada entre o mestre e os demais dispositivos da rede. No método *SCO* não é permitido reenvio de pacotes, enquanto no método *ACL* os dados perdidos podem ser retransmitidos (SEABRA; LUGLI, 2014).

Há também diferenças de classes de dispositivos Bluetooth quanto ao alcance permitido, sendo esses: Classe 01 (até 100 m), Classe 02 (até 10 m) e Classe 03 (até 1 m) (SEABRA; LUGLI, 2014).

### 3.3.3 Tecnologia Zigbee (IEEE 802.15.4)

O padrão IEEE 802.15.4, também referenciado pela sigla *LR-WPAN (Lower Rate Wireless Personal Area Network)*, foi desenvolvido com a proposta de produtos de baixo custo, baixo consumo de energia e de simples aplicação, onde altas taxas de transferência de dados não fossem necessárias (CAMPOS, 2010). Já o padrão Zigbee corresponde a um conjunto de protocolos que tem como base o padrão IEEE 802.15.4 e padrões especificados pela *Zigbee*

*Alliance* (SALEIRO; EY, [201-]). Operam nas faixas de frequência ISM 868:868,8 MHz, 902:928 MHz e 2,400:2,4835 MHz (SALEIRO; EY, [201-]), utilizando-se da técnica de modulação DSSS para a transmissão de dados (SEABRA; LUGLI, 2014).

Na Tabela 3.1 estão apresentadas as camadas de protocolo da tecnologia Zigbee e os padrões responsáveis pela regulamentação das mesmas.

Tabela 3.1 – Padrões e camadas de protocolo que compõem o padrão Zigbee.

| Protocolos<br>Zigbee | Padrões         | Camadas de Protocolo |
|----------------------|-----------------|----------------------|
|                      | Zigbee Alliance | Transporte/Aplicação |
| IEEE 802.15.4        | MAC             | PHY                  |

Fonte: Próprio autor.

Diferente do padrão IEEE 802.15.1, o padrão IEEE 802.15.4 caracteriza os tipos de dispositivos em FFD (*Full Function Device*) e RFD (*Reduced Function Device*). Os dispositivos FFD são dispositivos mais completos e podem se comunicar com qualquer dispositivo da rede, apresentam capacidade de formação de rede, atribuição de endereços, roteamento de dados, manutenção da rede, entre outras funções, o que justifica a necessidade de um hardware mais potente e um consumo de energia alto. Já os dispositivos RFD apresentam funções limitadas e só se comunicam com dispositivos FFD, o que reduz o consumo de energia, tornando-os mais eficientes energeticamente (SALEIRO; EY, [201-]).

O protocolo Zigbee acrescenta mais três funções distintas com base no papel do dispositivo na rede, sendo estas: coordenador (dispositivos FFD), roteador (dispositivos FFD) ou dispositivo final (dispositivos FFD e/ou RFD). O coordenador é responsável pela criação e manutenção de rede, armazenando informações importantes para o seu funcionamento, podendo também servir como meio de ligação entre diferentes WPAN. O roteador tem como finalidade permitir o roteamento de pacotes de rede para outro dispositivo sem realizar qualquer atividade administrativa extra, utilizado para ampliar o alcance e/ou robustez da rede. Já o dispositivo final corresponde a um nó que somente se comunica na rede, sem nenhuma função de gestão (CAMPOS, 2010).

A Tabela 3.2 apresenta uma associação entre as funções do dispositivo na rede com base no padrão Zigbee e os tipos de dispositivos IEEE compatíveis com a função desejada.

Tabela 3.2 – Tipos de dispositivos em uma rede Zigbee.

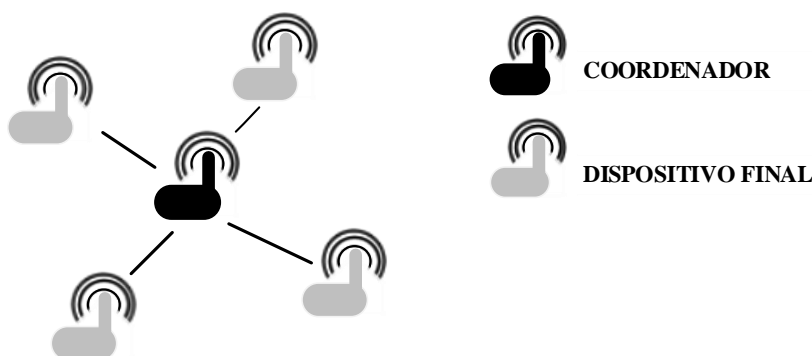
| Tipos de dispositivos Zigbee |                     | Função   |
|------------------------------|---------------------|--|
| Classificação por função     | Hardware necessário |  |
| Coordenador                  | FFD                 | Criação e manutenção da rede; Armazenamento de informações importantes para o funcionamento da rede; Meio de ligação entre diferentes WPAN. Apenas um por rede.  |
| Roteador                     | FFD                 | Roteamento de pacotes de rede para outro dispositivo sem realizar qualquer atividade administrativa extra; Ampliação do alcance e/ou robustez da rede. Opcional. |
| Dispositivo Final            | RFD ou FFD          | Relaciona-se a um nó sensor que somente se comunica na rede, sem nenhuma função de gestão. Menor consumo de energia.   |

Fonte: Adaptado de Saleiro e EY (201-).

As redes Zigbee podem apresentar três topologias diferentes, sendo elas: Estrela (*Star*), Árvore (*Cluster Tree*) e Malha (*Mesh*).

Na topologia Estrela há um único dispositivo coordenador com a função de iniciar toda a rede e manter associação dos demais dispositivos a mesma, havendo uma transmissão direta entre o coordenador e o dispositivo final (SALEIRO; EY, [201-]), conforme ilustrado na Figura 3.4.

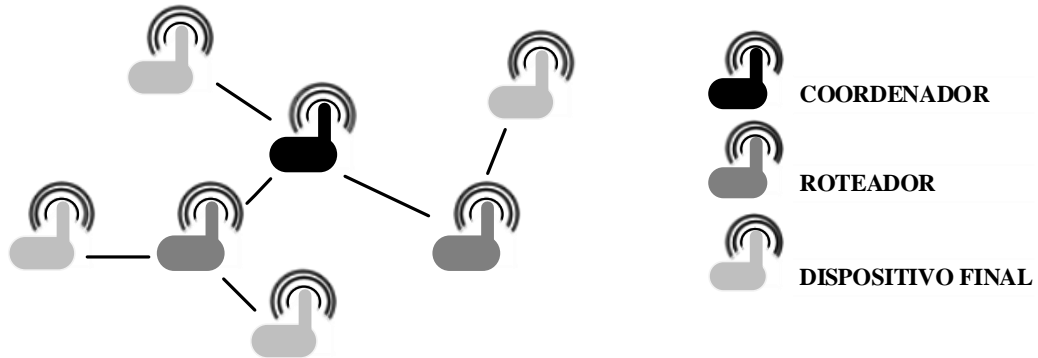
Figura 3.4 – Topologia Estrela.



Fonte: Próprio autor.

Na topologia em árvore há uma estrutura hierárquica, onde um único coordenador representa o núcleo da rede, da qual surgem diversas ramificações primárias através de dispositivos roteadores e/ou finais, das quais podem surgir mais ramificações secundárias que interliguem outros dispositivos finais ao coordenador por meio de multissaltos através dos dispositivos roteadores da rede (SALEIRO; EY, [201-]), conforme ilustrado na Figura 3.5.

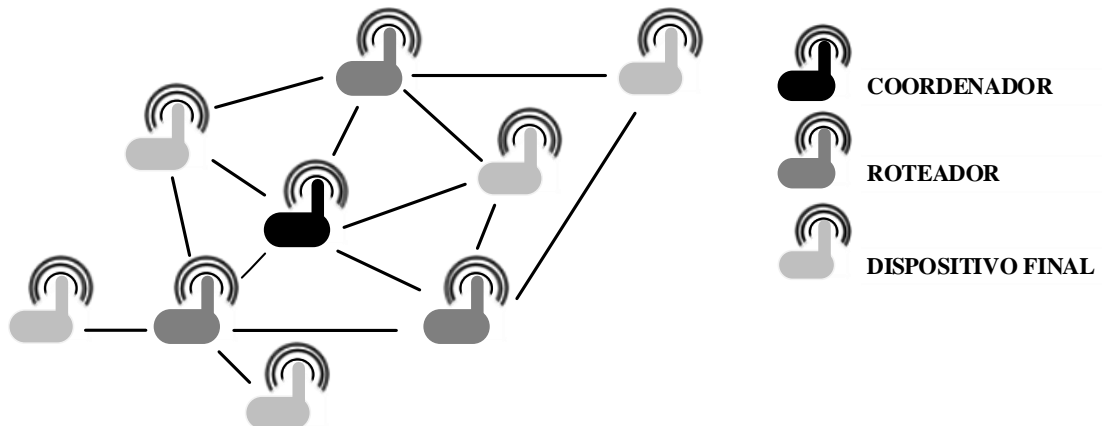
Figura 3.5 – Topologia em árvore.



Fonte: Próprio autor.

Já na topologia em Malha, a rede é descentralizada, na qual os dispositivos coordenador e roteadores podem se comunicar com qualquer outro dispositivo da WPAN, sendo responsabilidade única do coordenador registrar a entrada e saída de dispositivos à rede, conforme ilustrado na Figura 3.6. Logo, esta topologia apresenta como principais vantagens a fácil expansão da rede e alta disponibilidade dos dispositivos (a falta em um nó de roteamento pode ser suprida por outro dispositivo da rede), atreladas a desvantagem de um maior consumo de energia devido a presença de maior número de dispositivos trabalhando com atividades complexas (SALEIRO; EY, [201-]).

Figura 3.6 – Topologia em malha.



Fonte: Próprio autor.

Uma rede Zigbee permite a associação de 65000 dispositivos por cada coordenador presente (SEABRA; LUGLI, 2014). No item 3.4 será apresentado um aprofundamento neste padrão com base nas camadas que o estruturam.

### 3.3.4 Comparação entre as tecnologias Bluetooth e Zigbee

Em resumo, os dispositivos Bluetooth apresentam como vantagem uma alta taxa de transferência de dados, enquanto o Zigbee propõe um menor consumo de energia, menor custo de implantação e expansões para redes mais extensas. Logo, a escolha do dispositivo depende da aplicabilidade final da rede e, sendo este trabalho direcionado ao monitoramento de um sistema eólico distante do ponto de acesso e localizado em área com fraco sinal de redes WLAN, o protocolo Zigbee é o que mais se adequa as necessidades do projeto.

## 3.4 Redes de sensores sem fio (WSN) e Zigbee

Uma rede de monitoramento de sistemas eólicos pode ser classificada como uma rede de sensores sem fio com nós pré-definidos, onde se deseja monitorar diversas medições através de um único ponto de acesso, conectadas através de uma rede wireless, onde os requisitos mais importantes são confiabilidade, possibilidade de monitoramento em tempo real e tempo de vida útil dos dispositivos. Neste tópico será apresentado um aprofundamento nos quesitos de uma rede de sensores sem fio e nos dispositivos Zigbee para formação das WSN, visando aplicação no sistema proposto.

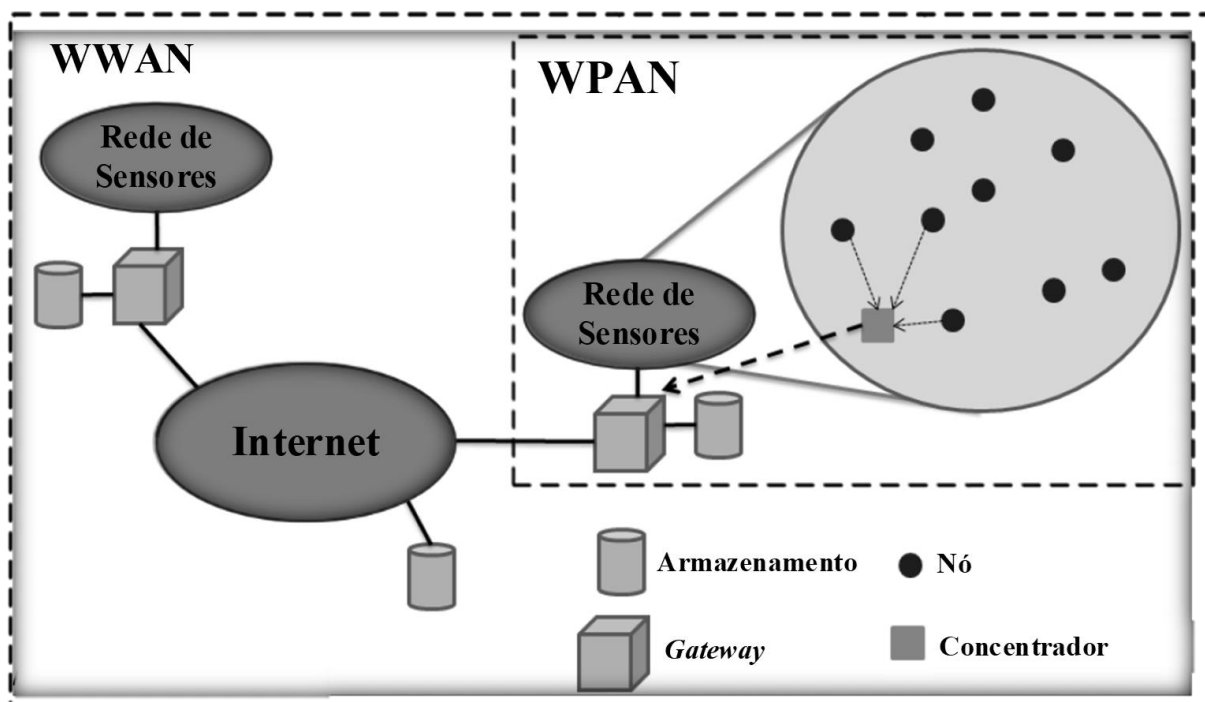
### 3.4.1 Rede de sensores sem fio (WSN)

Rede de sensores sem fio é um conjunto de nós compostos principalmente por sensores e que são capazes de se comunicar através de um enlace sem fio permitindo o monitoramento de determinada área. Suas principais características são escalabilidade (disponibilidade para elevado número de nós), auto-organização (suprir falhas de dispositivos e recalcular rotas), eficiência energética, completa conectividade entre os nós (abrangência e interconectividade em todos os nós da rede), baixa complexidade e baixo custo, sendo estas necessidades atendidas pelo protocolo Zigbee (SILVA, 2011).

O funcionamento de um WSN assemelha-se a de uma rede *Ad-Hoc*, definida na seção 3.3.1 deste trabalho, diferindo na existência de um único nó de convergência de informações, denominado de *sink* ou concentrador, e na tendência das WSN de tomar decisões de caminho baseados na eficiência energética do sistema (SILVA, 2011).

A Figura 3.7 ilustra a interação entre redes de sensores e possíveis pontos de conexão com outras redes, neste caso exemplificado com a “Internet”.

Figura 3.7 – Rede de sensores sem fio.



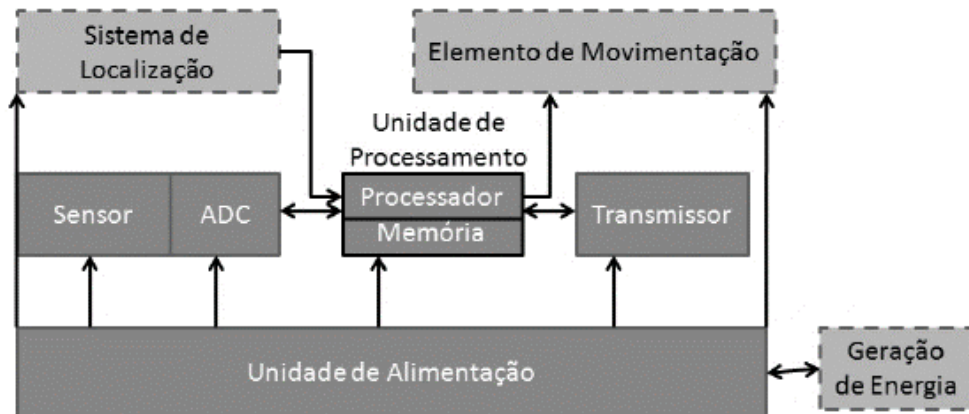
Fonte: Adaptado de Silva (2011).

O elemento *gateway* é o ponto de acesso que permite a interface entre usuário e rede, sendo responsável pelo envio de comandos e requisições da rede, além da recepção das informações da mesma e dados sobre seu estado. Junto a eles podem ser conectados elementos armazenadores para registro de leituras e operações realizadas. Os gateways podem apresentar duas interfaces de comunicação que permitem o ingresso da rede de sensores em redes mais abrangentes, neste caso, exemplificado pela *WLAN Internet*. Podem existir mais de um concentrador por rede, o que melhora o desempenho da mesma, mas exige protocolos mais complexos previstos desde o início do seu projeto (SILVA, 2011).

As WSN podem ser classificadas conforme as informações que devem ser coletadas e o ambiente de instalação, sendo as mais usuais: detecção de eventos, como o próprio nome diz, os transmissores são ativados durante a ocorrência de determinado evento; estimativa de processo, onde almejam-se informações que estimam parâmetros de determinado sistema; ou detecção e estimativa, onde há existência de ambos os tipos de informações apresentadas anteriormente (SILVA, 2011).

As principais preocupações em uma WSN são: acesso ao meio, criação e gerenciamento de rotas, mobilidade e segurança (SILVA, 2011). Na Figura 3.8 estão apresentadas as composições básicas do hardware de um nó nas redes de sensores, que consiste em um sensor, uma unidade de processamento do sinal (usualmente um microprocessador), um rádio transmissor/receptor e uma unidade de alimentação.

Figura 3.8 – Composição de um nó em uma WSN.



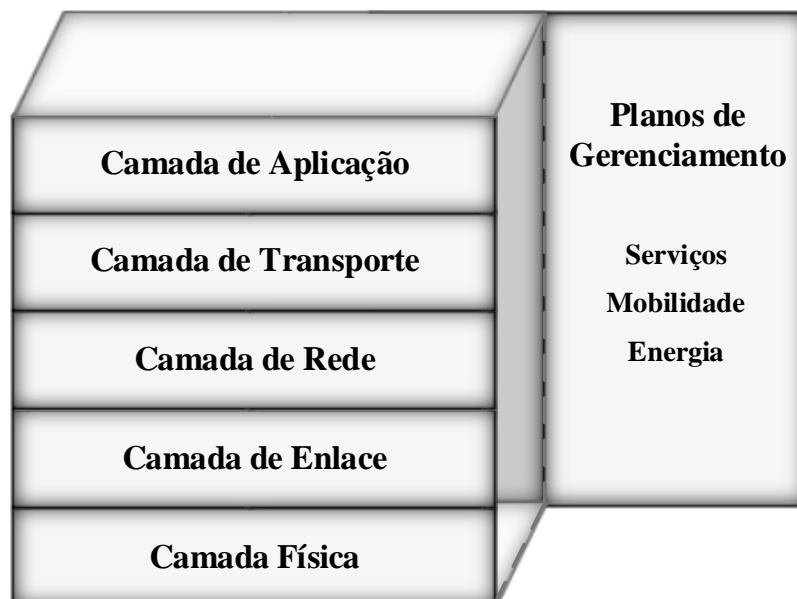
Fonte: Adaptado de Silva (2011).

Os quadrados tracejados são composições opcionais de um nó e suas utilizações dependem das características desejadas para a rede. O sistema de localização e elemento de movimentação são necessários quando os nós são distribuídos de maneira aleatória e suas localizações são desconhecidas, o que é possível ocorrer em redes de sensores devido a autonomia da mesma em detectar dispositivos.

#### 3.4.1.1 Protocolos de uma rede sem fio

Na Figura 3.9 são apresentadas as cinco camadas que compõem a pilha de protocolos de um nó, sendo estas: camada física, camada de enlace, camada de rede, camada de transporte e camada de aplicação (SILVA, 2011).

Figura 3.9 – Pilha de protocolos de uma WSN.



Fonte: Próprio autor.

Os planos de gerenciamento estão em todas as camadas e têm como função ajudar na coordenação dos serviços dos nós, na mobilidade da rede e economia de energia, enquanto os papéis de cada camada estão apresentadas a seguir (SILVA, 2011):

- Camada Física (PHY): seleção da frequência de transmissão, detecção de sinal, geração de portadora de frequência e modulação dos dados.
- Camada de Enlace: detecção de quadros de dados, acesso ao meio, controle e correção de erros e realização de comunicações ponto-a-ponto e ponto-a-multipontos. Nesta camada está contido o controle de acesso ao meio (MAC), que possui dois objetivos:
  - 1 – Estabelecimento do *link* de comunicação para transferência de dados entre os nós.
  - 2 – Divisão dos recursos entre os nós.
- Camada de rede: localização das rotas entre o nó emissor e o receptor, conforme necessidade em redes multissaltos, levando em consideração um dos seguintes critérios na definição da rota: máximo de potência disponível nos nós, menor energia de transmissão, menor número de saltos, entre outras.
- Camadas de transporte: interface entre a rede WSN e as redes externas.
- Camada de aplicação: execução e gerenciamento dos serviços da rede.

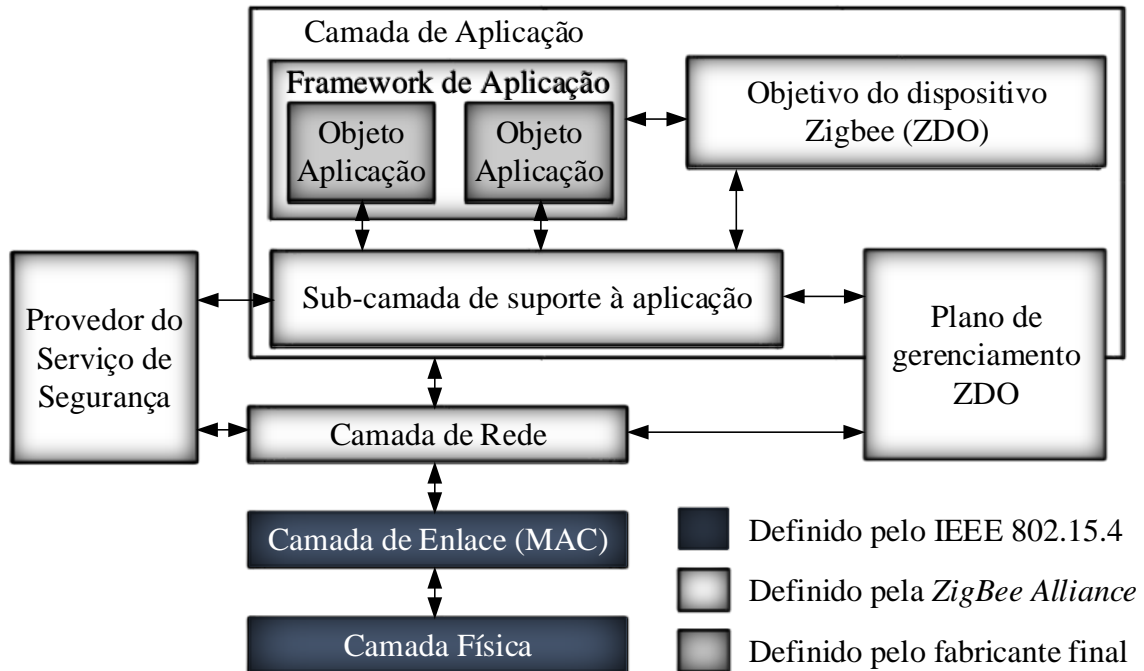
### 3.4.2 Protocolos de uma rede Zigbee

A pilha de protocolos Zigbee pode ser fracionada em quatro camadas com funções que se adequam à pilha de protocolos de uma WSN, conforme apresentada na Figura 3.10, sendo notável o direcionamento deste padrão para a formação de WPAN. A camada de transporte no Zigbee está atrelada a camada de aplicação através da subcamada APS (*Application Support Sublayer*) (SILVA, 2011).

As camadas físicas e de enlace são definidas pelo padrão IEEE 802.15.4 que regulamenta os parâmetros básicos de uma rede LR-WPAN convencional, conforme visto anteriormente. Já a camada de rede é totalmente definida pelo padrão Zigbee, que também define o provedor do serviço de segurança e o plano de gerenciamento, enquanto a camada de aplicação é definida tanto pelo padrão Zigbee, nos quesitos essenciais de configuração da aplicação de uma rede deste padrão, quanto pelo fabricante do dispositivo através do *framework*, que tem certa liberdade em direcionar seu produto a objetivos específicos dentro das necessidades de uma WPAN.



Figura 3.10 – Pilha de protocolos do padrão Zigbee.



Fonte: Adaptado de Silva (2011).

A camada de rede deve oferecer mecanismos para associação/desassociação de dispositivos em uma rede, segurança do quadro, roteamento, descoberta de rotas, descoberta de vizinhos diretos e armazenamento de informações dos mesmos. Deve fornecer funcionalidades que garantam o correto funcionamento do MAC e dos serviços de dados e gestão adequados para realizar a interface com a camada de aplicação. Para isso, ela identifica cada dispositivo na rede atribuindo um endereço de 16 bits semelhante ao IP em redes de computadores (SILVA, 2011).

Na camada de aplicação se encontram a subcamada de suporte aplicacional (APS - *Application Support Sublayer*), o objetivo do dispositivo Zigbee (ZDO - *Zigbee Device Object*) e os objetivos de aplicação (AF - *Application Framework*).

A APS corresponde a camada de transporte na pilha de uma WSN, fornecendo um conjunto geral de serviços que são usados pela ZDO e pelas aplicações definidas pelo fabricante para fazer interface entre as camadas de rede e aplicação (SILVA, 2011).

Os ZDO são responsáveis por atender todos os requisitos de todas as aplicações em execução na pilha de protocolos, devem inicializar a APS, a camada de rede e o serviço de segurança, além de juntar as informações de configuração das aplicações finais para determinar e implementar descobertas de nós e gestões da segurança da rede (SILVA, 2011).

O *Framework* de aplicação é o ambiente onde os objetivos de aplicação realizam funções de controle e manutenção das camadas de protocolo do dispositivo ZigBee e

inicializam as funções dos padrões de rede através do envio e recebimento de dados de pedidos, confirmação e resposta, e primitivas de indicação da transferência de dados da APS para a aplicação ou entidade de destino.

#### 4 FORMAÇÃO DA REDE ZIGBEE

A escolha do padrão Zigbee foi justificada durante toda a fundamentação sobre as redes sem fio e suas principais vantagens podem ser resumidas em: menor consumo de energia, maior flexibilidade de configuração e maior hospedagem de dispositivos, o que também amplia o alcance da rede e sua robustez.

Para formação da rede Zigbee foram utilizados os módulos Xbee-PRO S3B, firmware 900HP, da *Digi International Inc*®, que são dispositivos com capacidade FFD que trabalham entre 902 MHz a 928 MHz, conforme seleção do canal. No Brasil, obedecendo a Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL), devem ser configurados para as faixas de 902 MHz a 907.5 MHz (canais de 0-11) e 915 MHz a 928 MHz (canais de 33-63) (DIGIINTERNATIONAL, 2015).

As principais características dos módulos estão apresentadas na Tabela 4.1 e correspondem a valores máximos de operação, sendo a corrente típica de 215 mA para o máximo alcance e máxima taxa de transmissão.

Tabela 4.1 – Principais características do Xbee-PRO S3B para máxima potência.

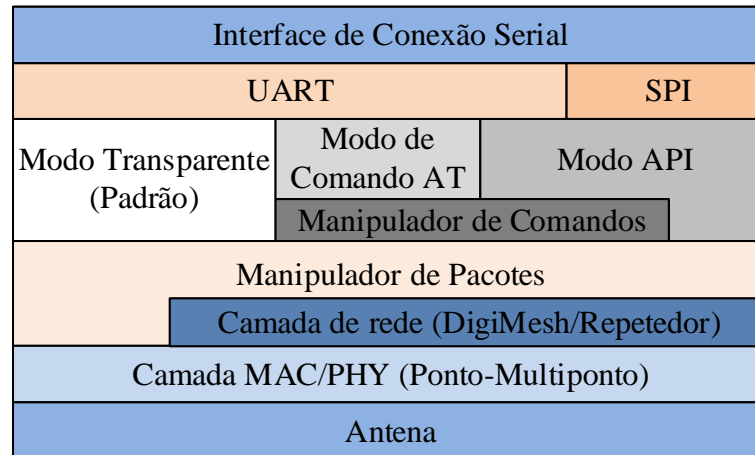
| Características do Xbee-PRO S3B |                |                       |
|---------------------------------|----------------|-----------------------|
| Alcance por ambiente:           | Urbano/Interno | até 305 m (200 kb/s)  |
|                                 | Externo        | até 6,5 km (200 kb/s) |
| Taxa máxima de transmissão:     |                | 200 kb/s              |
| Tensão de alimentação ideal:    |                | 3,0 a 3,6 V           |
| Potência de transmissão:        |                | 250 mW                |
| Corrente máxima de transmissão: |                | 290 mA                |
| Corrente de recepção:           |                | 35 mA                 |
| Modo inativo ( <i>sleep</i> ):  |                | 2,5 $\mu$ A           |

Fonte: Próprio autor.

O fluxo de dados no módulo *Xbee* obedece a uma ordem hierárquica, que depende das configurações de hardware e software, conforme apresentado na Figura 4.1. Inicia-se o fluxo pela interface serial, cuja comunicação pode ser síncrona SPI (*Serial Peripheral Interface*) ou assíncrona via UART (*Universal Asynchronous Receiver/Transmitter*). A utilização da UART permite maior flexibilidade de configurações de protocolo, através do modo transparente ou dos modos de comandos AT ou API (*Application Programming Interface*).

No modo transparente, toda informação recebida pela serial é colocada em espera no *buffer* de transmissão para ser transmitido pela antena, assim como os dados recebidos pela antena segue o caminho reverso, sem necessidade de comandos e intervenções.

Figura 4.1 – Fluxo de dados no Xbee-PRO S3B.



Fonte: Adaptado de DigiInternational (2015).

No modo de comando AT são utilizados caracteres específicos que possibilitam modificar e ler parâmetros dos módulos. Já o API é uma extensão do modo transparente que permite maior interação com as capacidades de rede do módulo, onde todos os dados de entrada e saída contêm quadros que definem operações e eventos dentro da rede, além do endereçamento de fontes e destinos de dados. Os pacotes de dados no modo API podem conter endereços, *status*, fonte, entre outras informações para alteração, leitura ou reconhecimento de rotas, redes e dispositivos.

Na camada de rede são configurados os modos de transmissão e recepção e definida a estrutura de comunicação da rede, na qual temos a estrutura *DigiMesh*, elaborada pela *Digi International Inc*®, que se caracteriza por uma rede em malha bem completa com diversas funções incrementadas pelo fabricante. Dentro da *DigiMesh* podem coexistir comunicações *unicast*, onde é feita a comunicação direta entre dois dispositivos, comunicação *multicast*, onde um módulo transmite para mais de um destino, e operações *broadcast*, no qual um dispositivo transmite o dado para todos os outros módulos da rede.

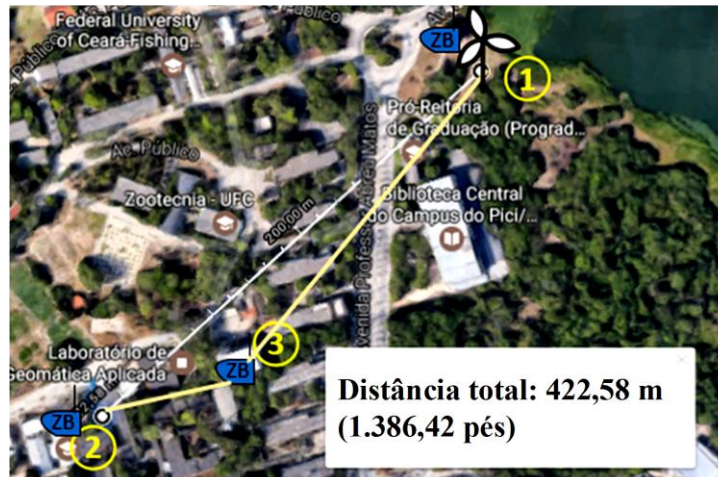
Nas camadas físicas e de enlace (MAC) são executados os protocolos do IEEE 802.15.4, sendo os dados regulamentados e disponibilizados na rede WPAN através da antena.

#### 4.1 Definições da estrutura da rede para monitoramento

Conforme comentado anteriormente, são necessárias transmissões com mais de 400 m de distância, estabelecendo um link de comunicação entre a WECS (ponto 1), próximo ao açude Santo Anastácio, e o laboratório GPEC (ponto 2), ambos localizados na UFC, campus do Pici. Embora os dispositivos utilizados apresentem alcances superiores a 500 m em ambientes externos, durante testes em campo verificou-se que os prédios e as árvores entre os

pontos 1 e 2 interferiam na comunicação, estabelecendo a necessidade de um roteador localizado no prédio mais alto entre o percurso, definido como ponto 3. A Figura 4.2 ilustra os pontos e a distância com base em Google (2017).

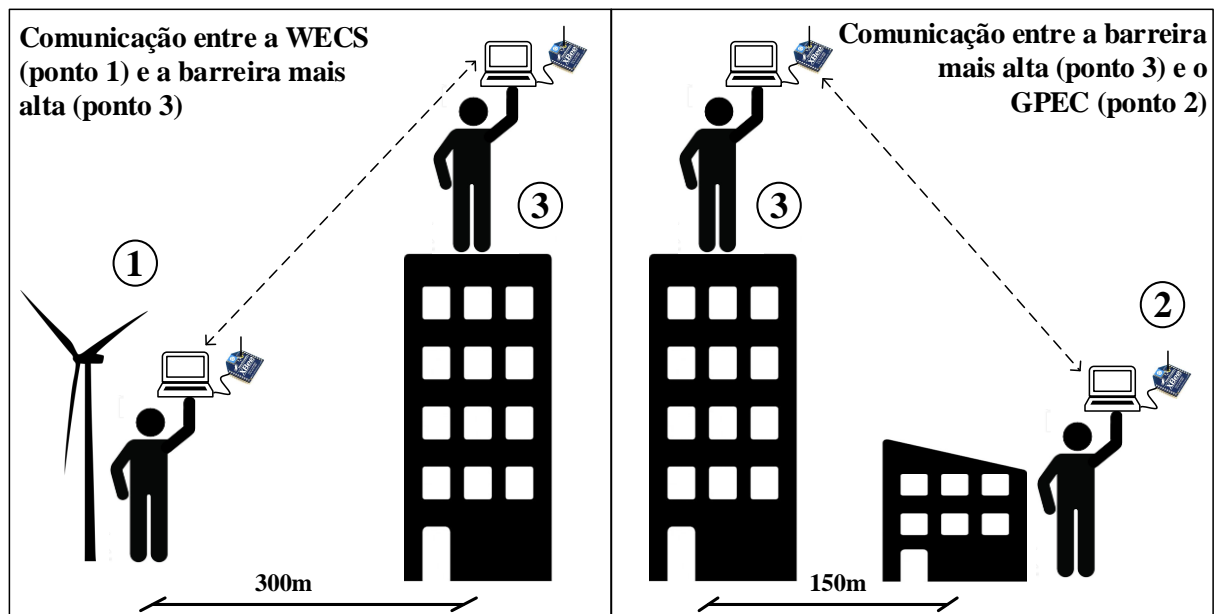
Figura 4.2 – Disposição física prevista para os dispositivos na rede.



Fonte: Adaptado de Google (2017).

Os testes de viabilidade da rede foram realizados verificando a comunicação entre os pontos 1 e 3 e a comunicação entre os pontos 3 e 2, utilizando computadores pessoais comunicando-se entre si através de módulos *Xbee* conectados pela porta serial, conforme ilustrado na Figura 4.3.

Figura 4.3 – Ilustração da viabilidade de comunicação entre a WECS e o GPEC.

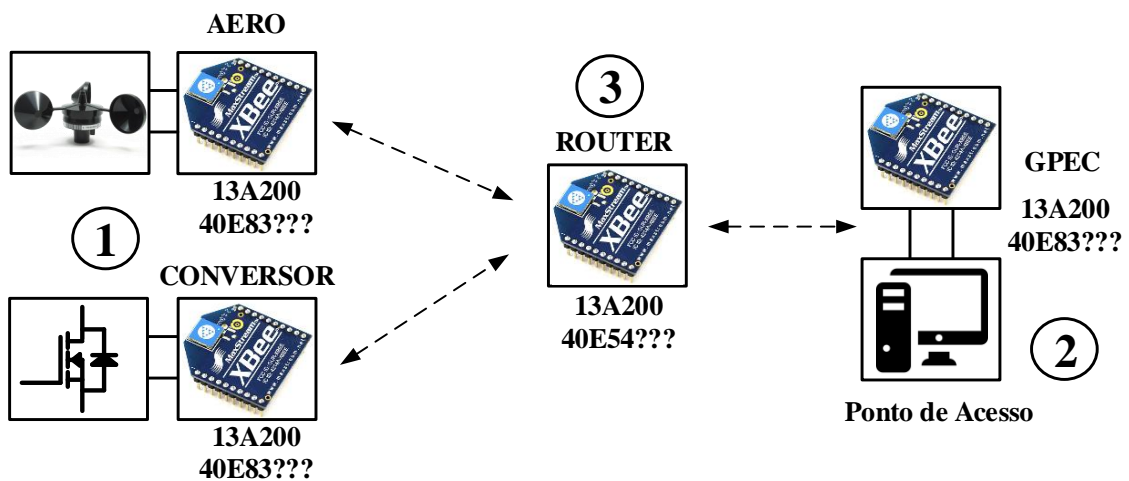


Fonte: Próprio autor.

Os resultados dos testes foram satisfatórios, levando a concluir que o estabelecimento da comunicação entre os pontos 1 e 2 será possível com um roteador no ponto 3, que também permitirá reduzir a potência consumida em cada nó (limitação da distância de transmissão).

Cada Zigbee apresenta um número de série para identificação na rede, porém, é interessante nomear os dispositivos para que durante a falha em um nó, o mesmo possa ser facilmente trocado por outro módulo configurado com mesmo nome sem interferir no restante da rede. A Figura 4.4 apresenta a identificação dos módulos utilizados.

Figura 4.4 – Identificação dos módulos *Xbee* na rede wireless.



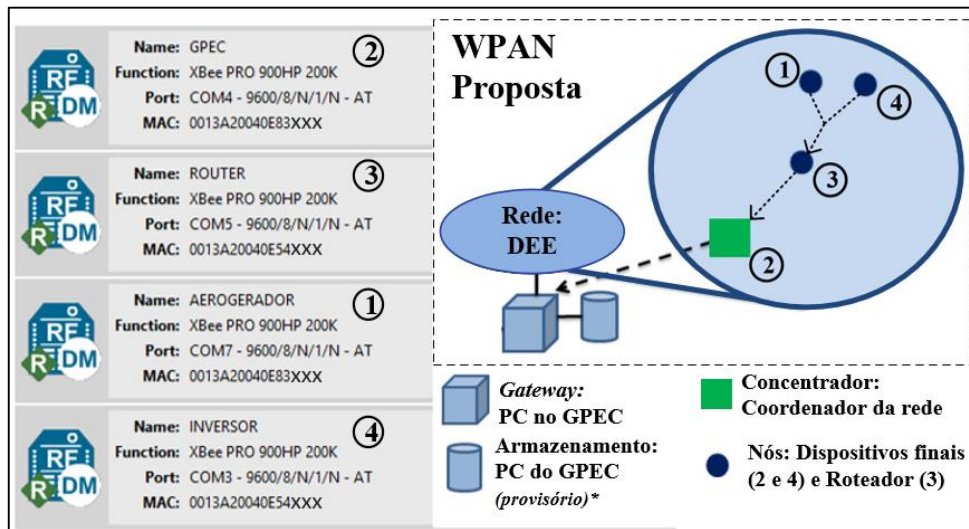
Fonte: Próprio autor.

Na Figura 4.4, o ponto 1 representa os nós sensores do sistema, sendo o Zigbee AERO responsável pela velocidade do vento e o CONVERSOR pelo envio dos parâmetros elétricos gerados. Já no ponto 2 está o dispositivo ROUTER (roteador), para ampliar o alcance da rede, e no ponto 2 se encontra o *Xbee* GPEC, que é o nó coordenador da rede, o qual irá receber os dados dos sensores e estabelecer a conexão com o ponto de acesso da rede.

Como pode ser observado, as necessidades para a rede de monitoramento proposta são simples, necessitando de comunicações *unicast* entre os dispositivos finais e o coordenador e comunicações *broadcast* realizada pelo roteador para ampliar o alcance da rede. Pode-se então utilizar a configuração de comunicação *DigiMesh*, com uma topologia inicial de rede em árvore e possibilidade futura de inserção de novos módulos e modificação para rede em malha através de comandos remotos enviados pelo coordenador aos nós pré-existentes.

A Figura 4.5 ilustra a estrutura da rede wireless proposta, cujos passos de configuração para a formação da mesma serão descritos no próximo tópico.

Figura 4.5 – Rede wireless proposta com os respectivos dispositivos.

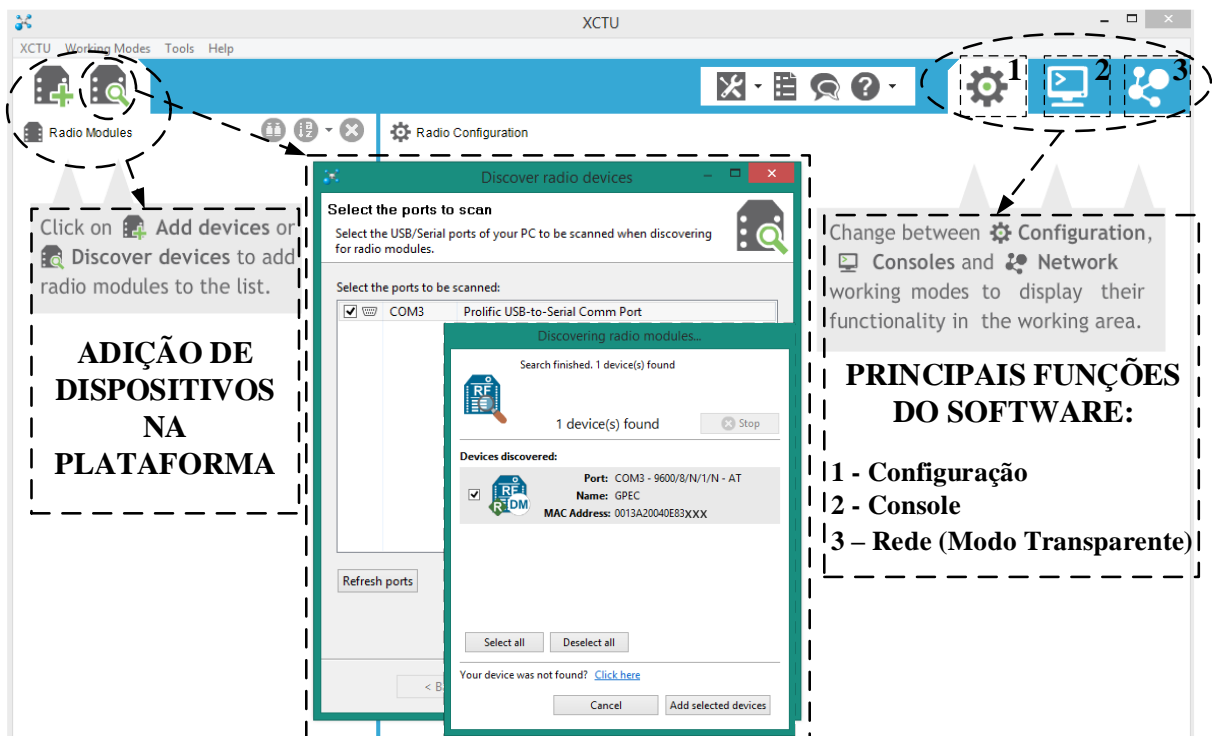


Fonte: Próprio autor.

## 4.2 Configuração da rede Zigbee

As configurações dos dispositivos serão realizadas utilizando-se do software XCTU disponibilizado pela *Digi International Inc*®, sendo uma plataforma de aplicação gratuita que permite gerenciar os módulos RF da empresa através de uma interface gráfica simples (DIGIINTERNATIONAL, 2017), conforme apresentado na Figura 4.6.

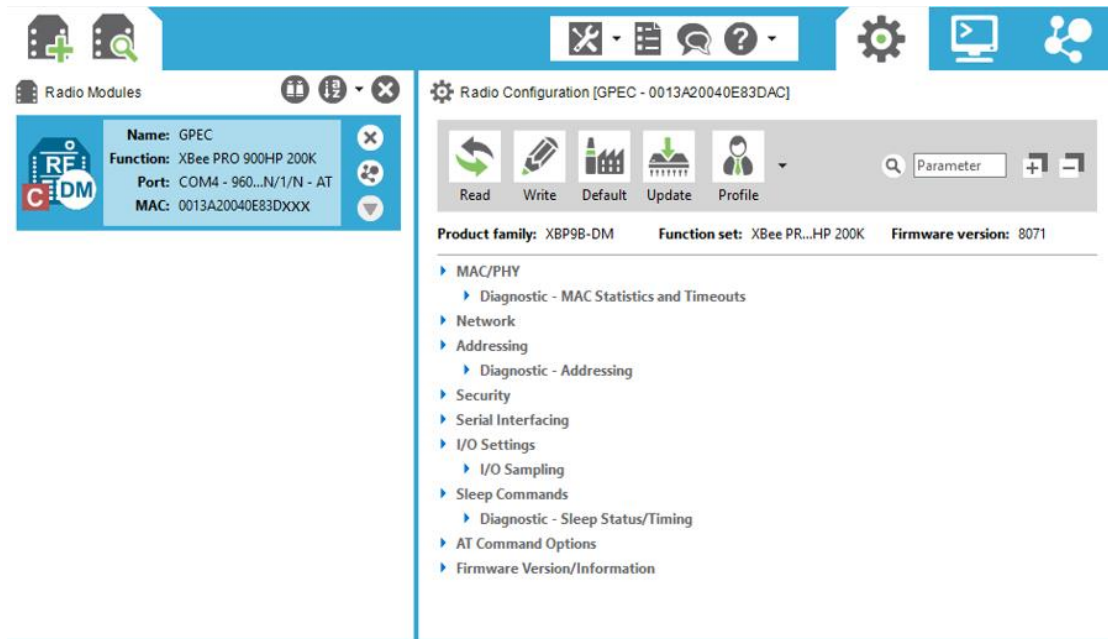
Figura 4.6 – Interface XCTU.



Fonte: Próprio autor.

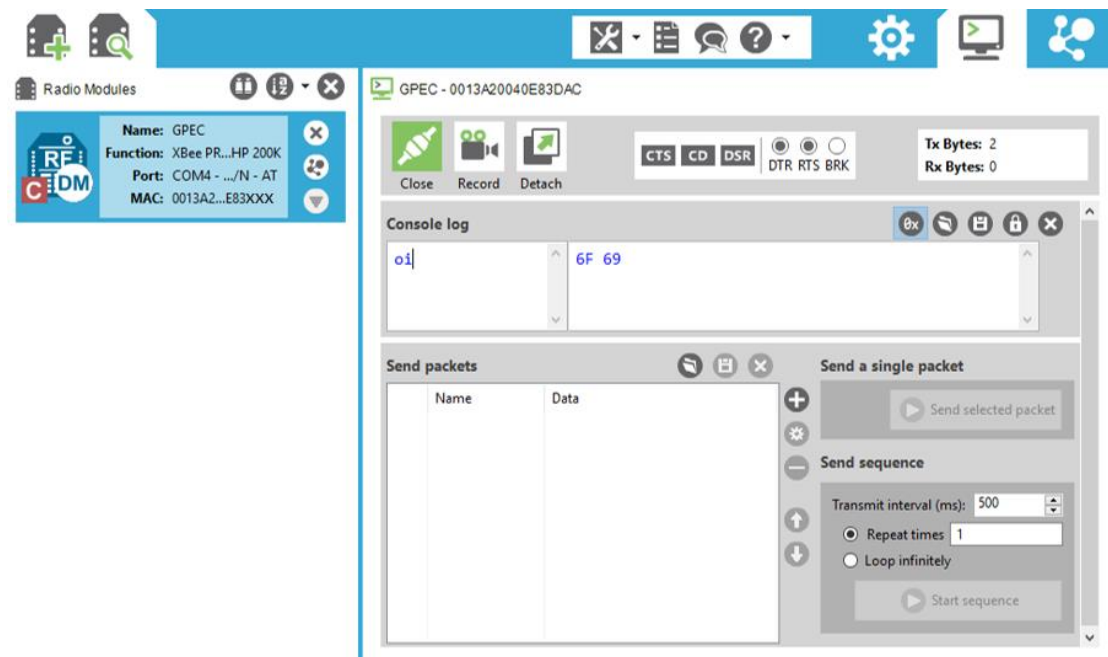
Na janela de configuração teremos acesso as camadas física e de enlace MAC/PHY (padrão IEEE 802.15.4), a camada de rede e serviços de segurança (protocolo Zigbee) e as especificidades das aplicações de rede ditadas pela *Digi* associadas as definições da *Zigbee Alliance*®. Além das configurações operacionais dos módulos e redes, há também informações de status, diagnósticos e *firmware*. A Figura 4.7 apresenta a janela de configuração do software.

Figura 4.7 – Janela de configuração do XCTU.



Fonte: Próprio autor.

Figura 4.8 – Janela de console do XCTU.



Fonte: Próprio autor.



O console corresponde ao painel de controles para o dispositivo e está apresentado na Figura 4.8. Nele é possível iniciar e parar comunicação entre os dispositivos e alterar parâmetros de transmissão, como tipos de pacotes e intervalos. Será a interface utilizada para verificar a qualidade da comunicação estabelecida entre os dispositivos.

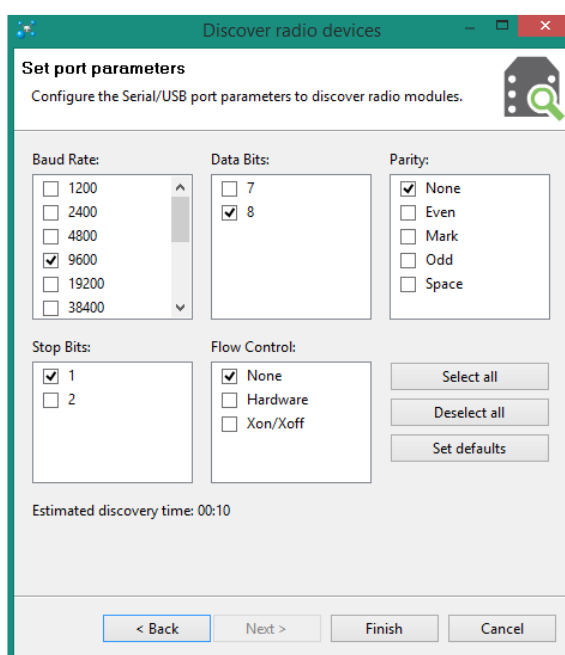
Já na opção rede temos acesso ao modo transparente de comunicação, não sendo possível processo de descoberta de rede e demais funções do modo API, devendo ser feita a alternância entre os modos quando necessário.

#### 4.2.1 Definições iniciais de configuração

Será utilizado a interface serial via UART, alternando entre os modos transparentes e API. Os pinos básicos do módulo para a comunicação via UART são: VCC (1), GND (10), DOUT (2) e DIN (3). Com estes já é possível configurar e colocar o módulo em operação, embora com funções limitadas. Os pinos CTS (12) e RTS (16) são responsáveis pelo controle do fluxo de dados e suas utilizações são necessárias para atualizações de *firmware*.

As configurações da UART foram de 9600 *Baud Rate*, 8 bits, sem paridade, 1 *stop* bit e sem controle de fluxo (configurações de fábrica dos dispositivos *Xbee*). A Figura 4.9 apresenta as especificações citadas no XCTU para descoberta do módulo pelo software.

Figura 4.9 – Configurações da comunicação via UART.



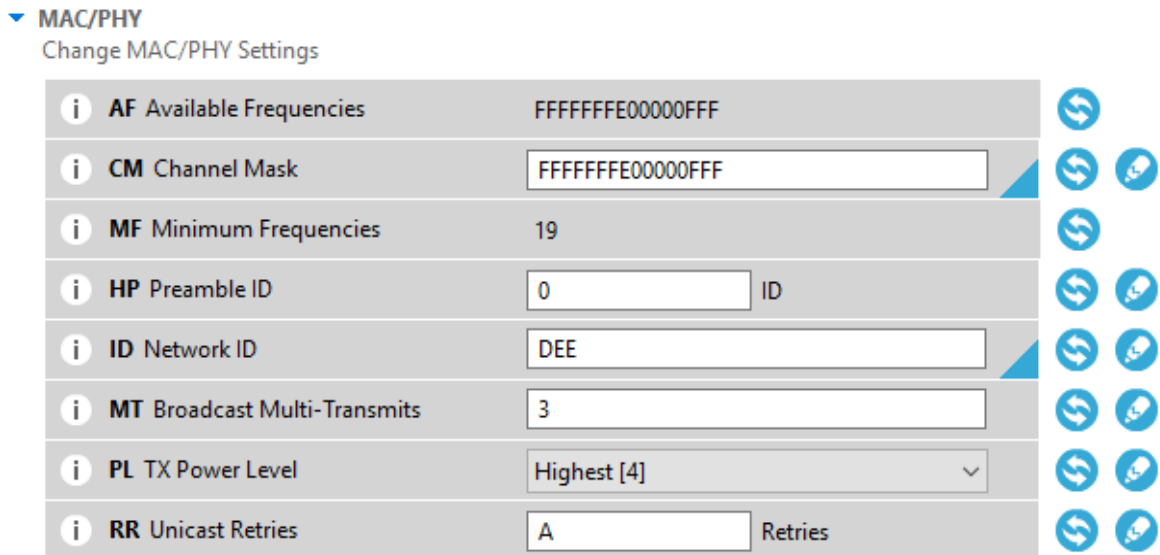
Fonte: Próprio autor.

A seguir serão apresentados os valores configurados para a rede através da imagem dos ajustes no software XCTU e de tabelas com descrição dos parâmetros de configuração.

#### 4.2.2 Camada MAC/PHY

Na Figura 4.10 é apresentada a tela de configuração do XCTU das camadas MAC/PHY. Os principais ajustes realizados nessa etapa foram a definição dos canais de frequência permitidas no Brasil, identificação da rede DEE e o alcance máximo do módulo.

Figura 4.10 – Configurações das camadas MAC/PHY.



Fonte: Próprio autor.

O significado de cada parâmetro é descrito na Tabela 4.2, assim como os valores de ajustes utilizados, que foram os mesmos para os quatro módulos da rede.

Tabela 4.2 – Descrição dos parâmetros de configuração das camadas MAC/PHY.

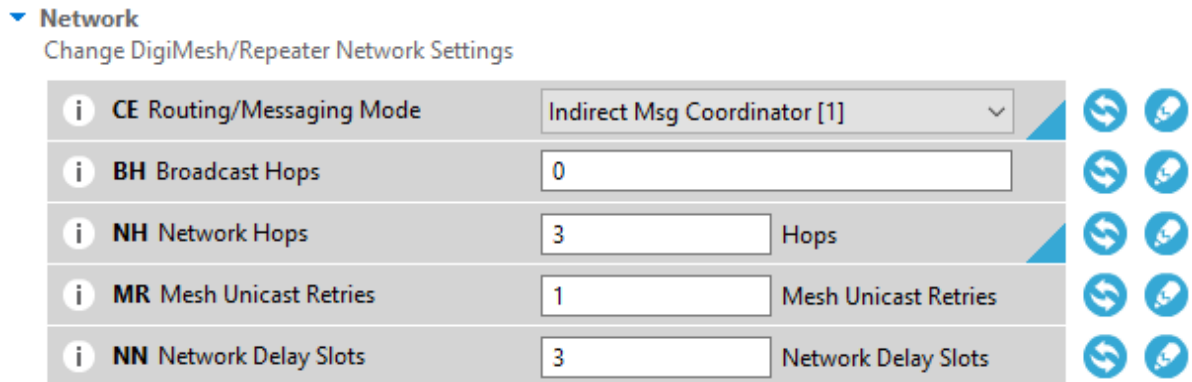
| MAC/PHY |   |                                 |
|---------|---|---------------------------------|
| AF      | Frequências disponíveis no módulo: 902,400 MHz (bit 0) a 927,600MHz (bit 63).                                     | Leitura                         |
| CM      | Seleção do canal de operação. No Brasil tem-se: 0x00FFFFFFFE0000FFF (canais 0-11, 33 – 63).                       | 0x00FFFFFFFE0000FFF<br>E0000FFF |
| MF      | Mínimo de canais que devem ser habilitados para região de operação.   | Leitura                         |
| HP      | Especificação de um grupo dentro da rede, onde os dispositivos com mesmo HP interagem somente entre si.           | 0 (Padrão)                      |
| ID      | Especificação da rede WPAN da qual os dispositivos participarão.  | DEE                             |
| MT      | Número de retransmissões de broadcast para garantir a recepção dos dados.   | 3 (Padrão)                      |
| PL      | Definição da potência de transmissão. Foi utilizado o máximo alcance que também coincide com o padrão de fábrica. | 4 (Padrão)                      |
| RR      | Número de retransmissões de unicast enquanto não há confirmação de recebimento de dados.                          | A (Padrão)                      |

Fonte: Próprio autor.

### 4.2.3 Definição dos dispositivos na rede

Na Figura 4.11 é apresentada a configuração das definições dos dispositivos na rede. O principal ajuste realizado nesta etapa foi a função de cada módulo na rede.

Figura 4.11 – Configurações dos dispositivos na rede.



Fonte: Próprio autor.

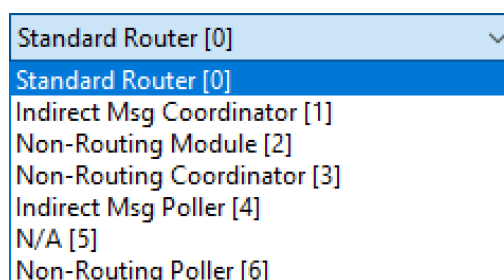
O significado de cada parâmetro é descrito na Tabela 4.3, assim como os valores de ajustes utilizados. O parâmetro CE modifica-se conforme a função do dispositivo na rede, cujas opções são apresentadas na Figura 4.12, sendo [0] para o roteador, [1] para coordenador e [2] para os dispositivos finais de rede.

Tabela 4.3 – Descrição dos parâmetros de definição dos módulos na rede.

| REDE |   |                       |
|------|---|-----------------------|
| CE   | Características atribuídas ao dispositivo na rede: Coordenador, Roteador e Dispositivo Final.                           | 0 - Roteador (Padrão) |
| BH   | Máximo de saltos para transmissões de broadcast: ([0x00 a 0x20] lógica inversa, o máximo número de saltos ocorre em 0). | 0                     |
| NH   | Máximo de saltos realizados dentro da WPAN.   | 3 (Padrão)            |
| NN   | Número máximo de atrasos antes da retransmissão de um pacote.   | 3 (Padrão)            |
| MR   | Número máximo de reenvio de pacotes de solicitação de rotas enquanto aguarda confirmação de recebimento.                | 1 (Padrão)            |

Fonte: Próprio autor.

Figura 4.12 – Possibilidades de operação do módulo na rede.



Fonte: Próprio autor.

#### 4.2.4 Definição das rotas de comunicação

Na Figura 4.13 é apresentada a configuração do estabelecimento de *links* de comunicação na rede. Os principais ajustes foram o endereço de destino, tipo de rede e nomeação do dispositivo.

Figura 4.13 – Configurações das rotas de comunicação na rede.

▼ Addressing  
Change Addressing Settings

|   |                               |                      |  |
|---|-------------------------------|----------------------|--|
| i | SH Serial Number High         | 13A200               |  |
| i | SL Serial Number Low          | 40E83 XXX            |  |
| i | DH Destination Address High   | <input type="text"/> |  |
| i | DL Destination Address Low    | <input type="text"/> |  |
| i | TO Transmit Options           | C0                   |  |
| i | NI Node Identifier            | GPEC                 |  |
| i | NT Network Discovery Back-off | 82 * 100 ms          |  |
| i | NO Network Discovery Options  | 0                    |  |
| i | CI Cluster ID                 | 11                   |  |

Fonte: Próprio autor.

O significado de cada parâmetro é descrito na Tabela 4.4, assim como os valores de ajustes utilizados.

Tabela 4.4 – Descrição dos parâmetros de configuração das rotas de comunicação.

| ENDEREÇAMENTO |  |                     |
|---------------|--|---------------------|
| SH/           | Endereço estendido IEEE 64 bits exclusivo atribuído a este   | 13A200              |
| SL            | módulo, com parte alta e baixa, respectivamente.   | 40E83---            |
| DH/           | Endereço estendido IEEE 64 bits do dispositivo de recepção, com  | 0                   |
| DL            | parte alta e baixa, respectivamente (comunicação <i>unicast</i> ).   | FFFF                |
| TO            | Modo de transmissão do módulo:<br>Ponto-a-ponto (0x40), Repetedor (0x80) e DigiMesh (Cx0).                 | Cx0<br>(Padrão)     |
| NI            | Nome de identificação na rede associado ao módulo.   | GPEC                |
| NT            | Definição do máximo valor de atraso aleatório usado para respostas de descoberta de rede a serem enviadas. | 82*10ms<br>(Padrão) |
| NO            | Opções de descobertas de rede.   | 0 (Padrão)          |
| CI            | Valor padrão de identificação do grupo utilizado para transmissões de dados em série.                      | 11 (Padrão)         |

Fonte: Próprio autor.

Todos os módulos foram configurados para transmissão *DigiMesh* (Rede em malha objetivada pelo fabricante), onde foram utilizadas transmissões *unicast* dos dispositivos finais para o coordenador. O endereço FFFF corresponde a comunicações *broadcast*, utilizadas para o coordenador e roteador.

#### 4.2.5 Parâmetros de comunicação via UART

Na Figura 4.14 são apresentados os parâmetros de comunicação dos módulos com a serial. Os ajustes de fábrica foram mantidos, com *BaudRate* de 9600, 8 bits, sem paridade e 1 *stop* bit, operando no modo transparente.

Figura 4.14 – Configurações dos parâmetros da UART.

Serial Interfacing  
Change module interfacing options

|   |                           |                             |  |
|---|---------------------------|-----------------------------|--|
| i | BD Baud Rate              | 9600 [3]                    |  |
| i | NB Parity                 | No Parity [0]               |  |
| i | SB Stop Bits              | One stop bit [0]            |  |
| i | RO Packetization Timeout  | 3 * character times         |  |
| i | FT Flow Control Threshold | 13F Bytes                   |  |
| i | AP API Enable             | Transparent Mode [0]        |  |
| i | AO API Options            | API Rx Indicator - 0x90 [0] |  |

Fonte: Próprio autor.

O significado de cada parâmetro é descrito na Tabela 4.5, assim como os valores de ajustes utilizados, que foram os mesmos para os quatro módulos da rede.

Tabela 4.5 – Descrição dos parâmetros de configuração da UART.

| INTERFACE SERIAL |  |              |
|------------------|--|--------------|
| BD               | <i>BaudRate</i> [1200 a 115200].   | 9600 [3]     |
| NB               | Paridade.  | Sem [0]      |
| SB               | <i>Stop</i> Bits.  | 1 [0]        |
| RO               | Definição de atraso entre cada caractere em transmissão.                                     | 3            |
| FT               | Limiar de controle de fluxo  | 13F (Padrão) |
| AP               | Configuração do modo API:<br>Modo transparente [0], API sem escape [1] e API com escape [2]. | 0 (Padrão)   |
| AO               | Formato de saída dos pacotes de dados API.   | 0 (Padrão)   |

Fonte: Próprio autor.

Os módulos foram dispostos para se comunicarem no modo transparente, isto é, toda informação de entrada na serial será enviada pela antena, assim como todos os dados recebidos pela antena serão enviados pela serial. Portanto, a rede foi configurada para operar inicialmente de maneira simples, devendo posteriormente serem implementados envios de comando remoto, exigindo alternância entre operações no modo transparente e no modo API.

### 4.3 Conexão do Zigbee aos dispositivos de monitoramento

A conexão do Zigbee aos circuitos de monitoramento será realizada através da porta UART, onde os respectivos pinos de comunicação deverão ser conectados aos da entrada serial dos microcontroladores de processamento. Para conexão com os computadores pessoais será utilizado o cabo TTL/USB, apresentado da Figura 4.15.

Figura 4.15 – Cabo utilizado para comunicação entre módulos Zigbee e PC.



Fonte: Próprio autor.

O dispositivo de roteamento ROUTER irá somente receber os dados e retransmitir para os outros dispositivos da rede, não necessitando de um circuito externo de processamento. Os dados conterão informações de endereçamento ao coordenador, conforme configurado nos dispositivos finais, e somente este enviará os valores recebidos pela porta serial.

Como os sensores na rede enviarão periodicamente informações em curtos intervalos de tempo, não há necessidade de os módulos entrarem no modo *sleep* (modo de espera com baixo consumo).

### 4.4 Rede wireless de monitoramento da WECS

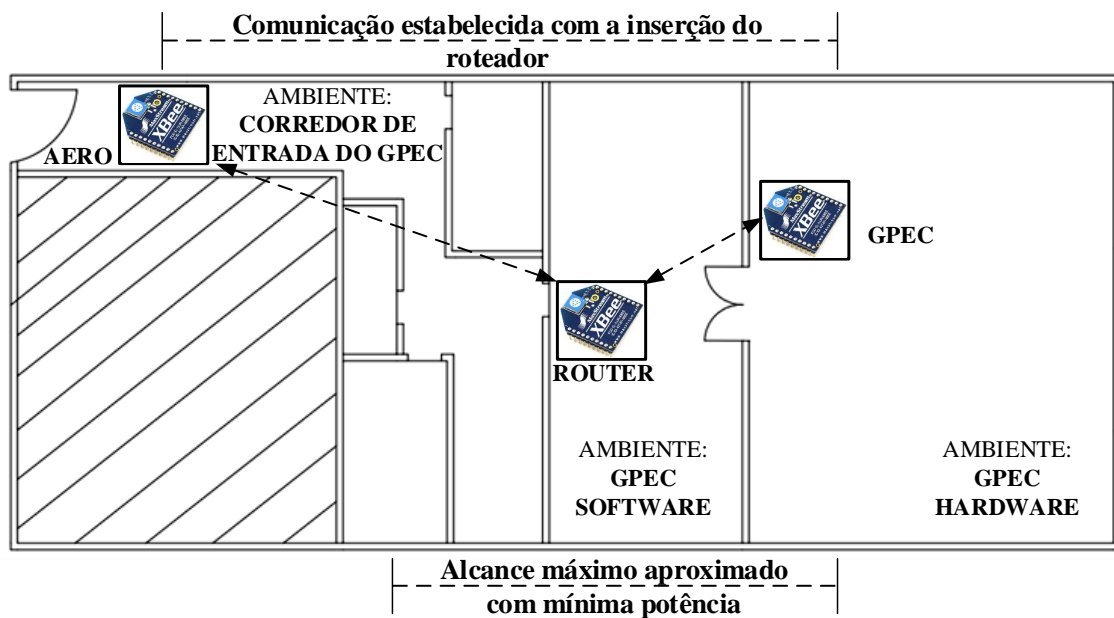
A rede wireless configurada tem como finalidade a estimativa de processos com nós pré-definidos, topologia em árvore e facilidade de expansão para rede em malha através de comandos remotos enviados pelo coordenador, configurado para transmissões *broadcast* e sem características de roteamento.

A comunicação dos módulos com dispositivos externos é realizada através da serial UART, com *BaudRate* de 9600, 8 bits, sem paridade e 1 *stop* bit. Todos os dados recebidos

pela serial são enviados para rede, assim como todos os pacotes recebidos pela antena são enviados pela serial conforme informações de endereçamento.

Foi montada uma minirrede no laboratório com os módulos já configurados, onde somente os alcances dos mesmos foram temporariamente reduzidos para o valor mínimo. Verificou-se primeiramente o alcance máximo entre dois dispositivos no ambiente fechado e, por seguinte, afastou-se os mesmos além da distância obtida anteriormente e acrescentou-se o roteador, verificando uma comunicação estável, com cada módulo operando conforme seu papel na rede. A Figura 4.16 ilustra a disposição da minirrede de teste.

Figura 4.16 – Minirrede para teste da operacionalidade da rede configurada.



Fonte: Próprio autor.

## 5 MONITORAMENTO DA VELOCIDADE DO VENTO

Neste capítulo será abordado o sistema embarcado de monitoramento da velocidade do vento, composto por um anemômetro, um circuito de processamento de sinal e uma fonte de alimentação.

### 5.1 Anemômetro

Para obtenção dos dados de velocidade próximo à turbina, será utilizado um anemômetro tipo concha, modelo NRG 40C, que se caracteriza pela simplicidade de funcionamento e baixo custo financeiro. O mesmo está apresentado na Figura 5.1.

Figura 5.1 – Anemômetro tipo concha, modelo NRG 40C



Fonte: Proprio autor

Considerando as características dos ventos na cidade de Fortaleza, que durante os períodos de ventanias provocadas pelos ventos alísios (geralmente por volta dos meses de agosto, setembro e outubro) apresentam uma média de 40 km/h (11,11 m/s), com rajadas de até 70 km/h (19,44 m/s) (CE, 2013), este anemômetro apresenta uma escala consideravelmente alta, de 1 m/s a 96 m/s, com boa precisão para a faixa de operação correspondente aos ventos na cidade, conforme pode ser observado na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Principais características do anemômetro utilizado.

| Especificações do Anemômetro NRG 40C |   |
|--------------------------------------|---|
| Faixa de medição                     | 1 m/s a 96 m/s  |
| Sinal de saída                       | Tensão senoidal de baixa amplitude e frequência proporcional ao vento |
| Função de transferência              | (Frequência [Hz]) x 0.765 + 0.35 [m/s]                                |
| Precisão                             | 0.1 m/s (faixa de 5 m/s a 25 m/s)                                     |
| Faixa da frequência de saída         | 0 Hz a 125 Hz   |
| Peso                                 | 0.14 kg   |

Fonte: Adaptado de NRG (2007).



Na Tabela 5.1 também é possível observar que sua resposta de saída é um sinal senoidal com frequência ( $f_{anemometro}$ ) diretamente proporcional a velocidade ( $v_{vento}$ ) que incide nas conchas do anemômetro, conforme a expressão (5.1) disponibilizada pela NRG (2007) que relaciona ambos os parâmetros elétricos.

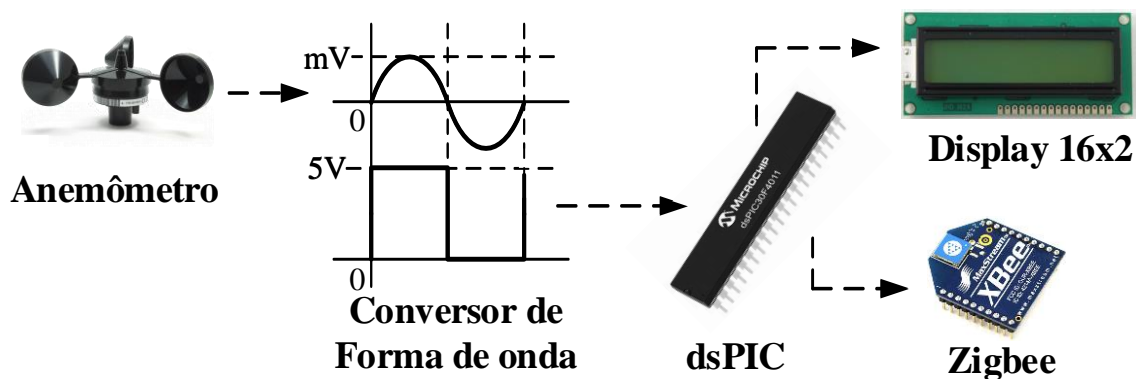
$$v_{vento} = f_{anemometro} \cdot 0,765 + 0,35 \quad (5.1)$$

## 5.2 Circuito de transmissão

Para transmissão dos dados de velocidade do vento, optou-se pela utilização de um microcontrolador, modelo dsPIC 30F4011, da empresa *Microchip*®, conforme a disponibilidade do mesmo no laboratório, o que gerou a necessidade de conversão do sinal analógico de saída do anemômetro em uma onda quadrada de mesma frequência, com nível alto em 5 V e nível baixo em 0 V.

Para leitura dos dados de velocidade, os valores calculados no dsPIC serão inicialmente enviados para um display LCD 16x2 (visualização local), e para a rede sem fio através do dispositivo Zigbee AERO, situado no ponto 1 (visualização remota por um computador pessoal), identificado na Figura 4.4. A Figura 5.2 apresenta o esquema utilizado para a transmissão dos dados de velocidade do vento.

Figura 5.2 – Esquema de transmissão proposto para monitoramento do vento.



Fonte: Proprio autor.

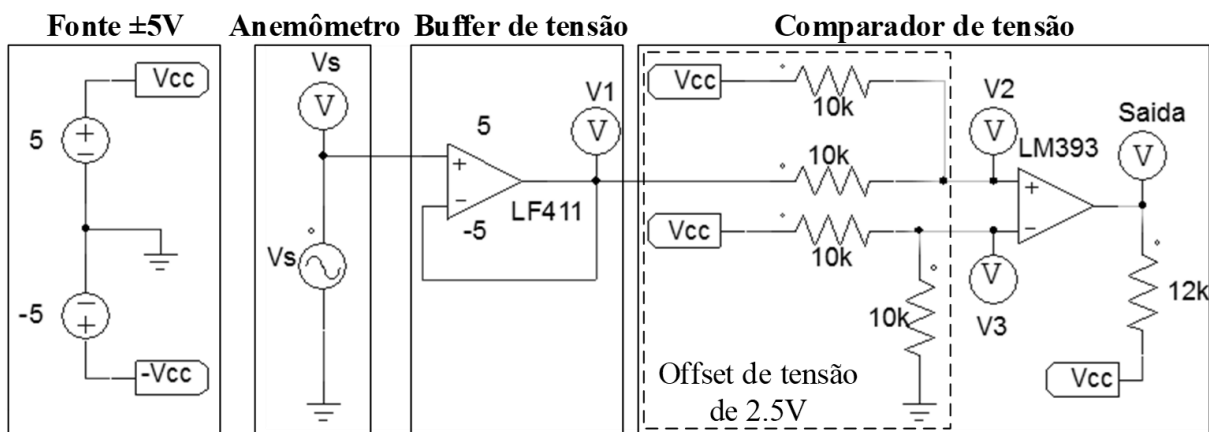
Para instalação do circuito de aquisição no aerogerador, a utilização do display será dispensada, tendo sido utilizado previamente para facilitar os testes em laboratório.

O sistema de transmissão será composto por um circuito conversor de forma de onda, um dsPIC para tratamento via *software* e um Zigbee para a transmissão *wireless*. Também será necessária uma fonte AC/DC para que o circuito seja alimentado diretamente na rede próxima ao sistema eólico. Cada componente será apresentado detalhadamente a seguir.

### 5.2.1 Circuito conversor da forma de onda

Para o tratamento da forma de onda do anemômetro, basicamente foram utilizados dois circuitos integrados (CI): o amplificador operacional LF411CN, atuando como um *buffer* de corrente, e o comparador de tensão LM393. O esquemático do circuito está apresentado na Figura 5.3.

Figura 5.3 – Esquemático do circuito conversor da forma de onda.

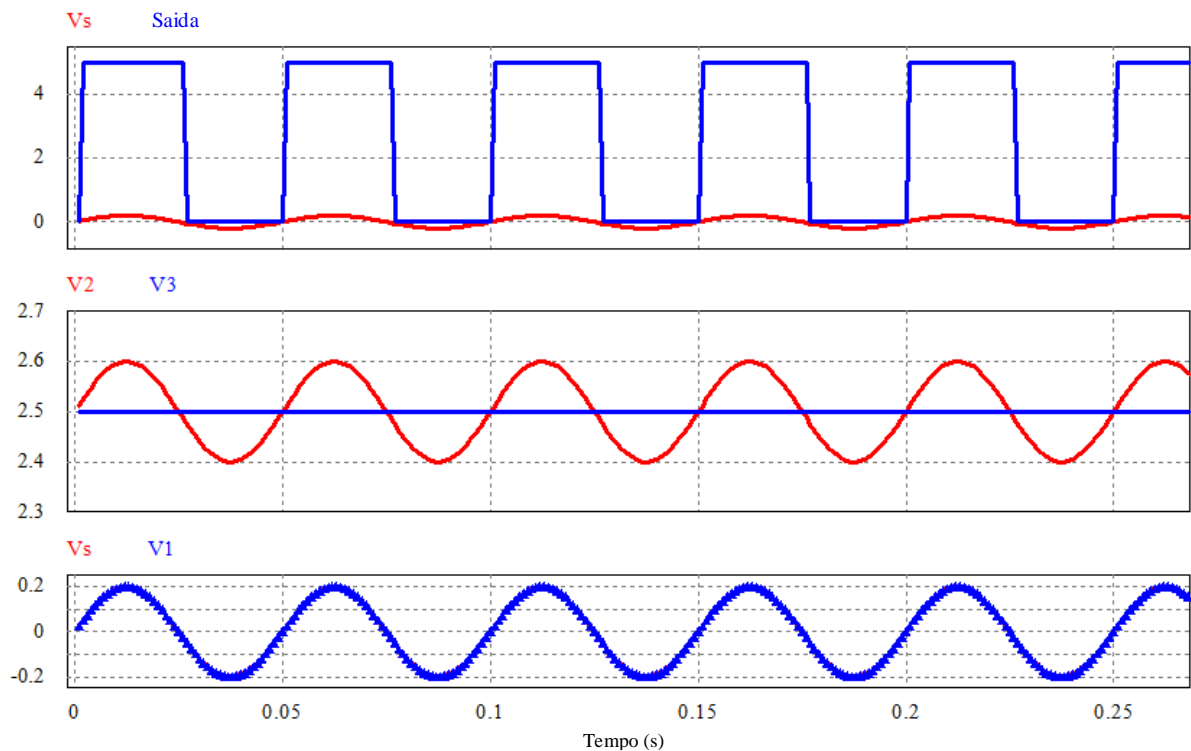


Fonte: Proprio autor.

O buffer de corrente tem como objetivo aumentar a impedância entre o anemômetro e o circuito, de forma que este último seja suprido pela fonte de alimentação do sistema, atuando como uma medida de proteção para o sensor. Já o comparador foi utilizado para gerar a onda quadrada de mesma frequência da senoidal, variando entre 0V, quando a tensão do sensor é negativa, e 5V, quando a tensão do sensor é positiva. Devido à baixa amplitude da tensão de saída do sensor foi necessário gerar um sinal de referência de 2,5V para elevar as tensões de entrada no comparador.

Na Figura 5.4 estão apresentadas as formas de ondas simuladas no software PSIM® através do esquemático da Figura 5.3. O primeiro gráfico faz um comparativo entre a onda quadrada de saída e a tensão do sensor ( $V_s$ ), enquanto o segundo gráfico apresenta as formas de ondas a serem comparadas pelo LM393 com seus respectivos offsets de 2,5 V. O terceiro gráfico somente ilustra a semelhança entre os sinais de entrada ( $V_s$ ) e saída do buffer ( $V_1$ ), sendo somente uma medida de proteção para o anemômetro.

Figura 5.4 – Formas de ondas simuladas para o circuito conversor de forma de onda.



Fonte: Proprio autor.

### 5.2.2 Software de tratamento

A frequência do anemômetro será calculada utilizando o dsPIC 30F4011, da *Microchip*®, no qual também será obtido o valor numérico de velocidade correspondente a ser enviado para o display, pelos periféricos I/O (*Input/Output*), e ao Zigbee, utilizando a UART (*Universal Asynchronous Receiver Transmitter*) do microcontrolador.

#### 5.2.2.1 DSPIC 30F4011

É um microcontrolador da empresa *Microchip*®, da família 30F. Esta última foca em dispositivos de 16 bits para aplicações em controle digital com alta performance, cuja estrutura pode ser dividida em três partes: uma unidade de processamento (CPU - *Central Processing Unit*), integrador de funções do sistema e os periféricos (MICROCHIP, 2006).

A CPU corresponde ao núcleo que contém os recursos necessários para o funcionamento do dispositivo e as interrupções do sistema e periféricos (MICROCHIP, 2006).

Dentro da CPU temos duas classes de instruções: o MCU (*PIC*® *Microcontroller*) e o DSP (*Digital Signal Processor*). No MCU temos a Unidade Lógica Aritmética (ALU - *Arithmetic Logic Unit*) convencional, cujas funções se restringem a adição, subtração e

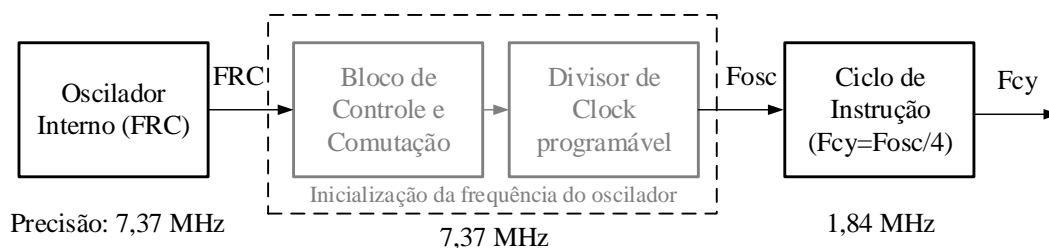
operações simples de lógica e rotação de bits. Já a máquina DSP é um bloco de hardware que, apesar de utilizar o mesmo decodificador de instruções da ALU, permite operações mais complexas e com maior número de bits em menos tempo, através de seus próprios registradores especializados para obtenção dos resultados (MICROCHIP, 2006).

O dsPIC utilizado possui um ALU convencional com dois acumuladores de 16 bits cada, e um DSP com dois acumuladores de 40 bits (MICROCHIP, 2005), porém este último não foi explorado durante o trabalho, embora o mesmo permitisse a redução do tempo de processamento dos cálculos e operações mais complexas.

O integrador de funções do sistema apresenta as principais configurações de operação do dispositivo, ajustados conforme a necessidade de projeto, podendo: diminuir consumo, aumentar a confiabilidade do sistema e a flexibilidade do projeto. Dentro das funções temos o oscilador, cuja configuração é de grande importância para definir o tempo de processamento de diversos comandos internos através da configuração do ciclo de instrução do dispositivo (MICROCHIP, 2006).

Optou-se para o trabalho pela utilização do oscilador interno (FRC) do dsPIC 30F4011, sem PLL (*Phase Locked Loop*), com 7,37 MHz de precisão (MICROCHIP, 2005). Cada ciclo de instrução no dsPIC leva 4 ciclos do oscilador, com isso, teremos uma frequência de instrução de 1,84 MHz (tempo de instrução de 543ns). A sequência de configuração da frequência do sistema está ilustrada na Figura 5.5.

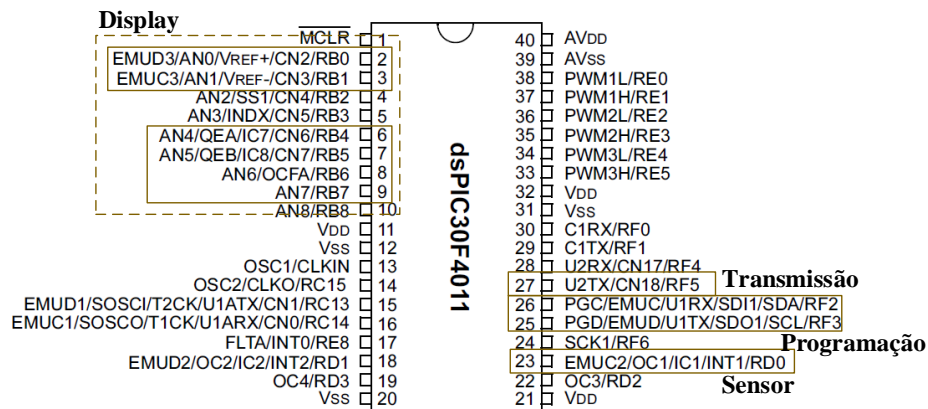
Figura 5.5 – Configuração do oscilador e do ciclo de máquina do dsPIC 30F4011.



Fonte: Proprio autor.

Os periféricos permitem a conexão do dispositivo com o mundo exterior (MICROCHIP, 2006). Dentro dos disponíveis pelo dsPIC 30F4011, foram utilizados os registradores de I/O (*Input/Output Port Control Registers*) para comunicação com o display, os *timers* (TMR 2 e 3), o módulo de captura de entradas (IC - *Input Capture Module*) e o módulo UART 2 (*Universal Asynchronous Receiver Transmitter*). A Figura 5.6 apresenta os pinos do microcontrolador com os respectivos periféricos a serem conectados com os dispositivos externos.

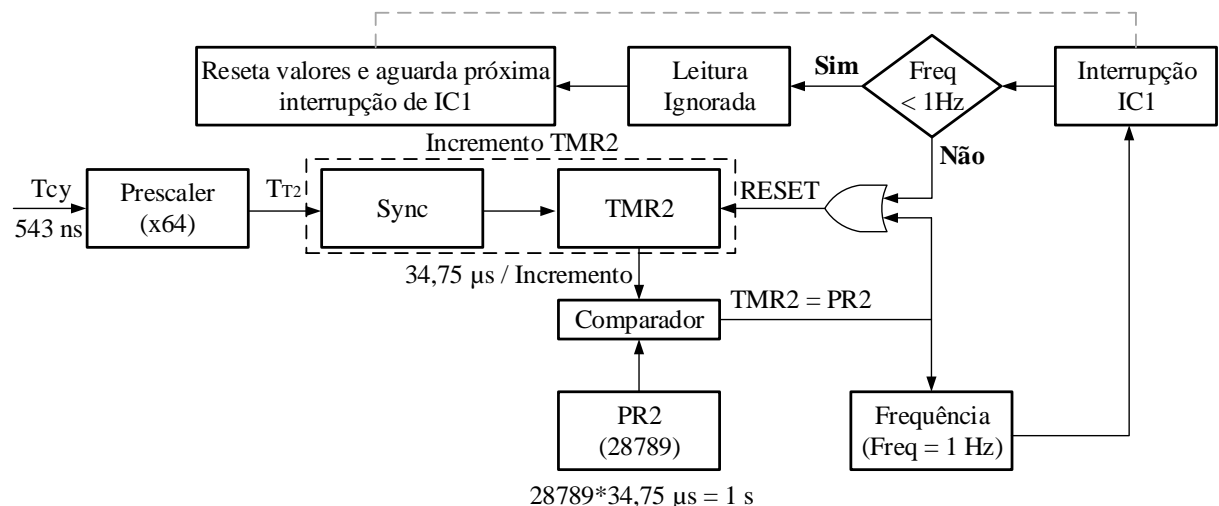
Figura 5.6 – Terminais utilizados do dsPIC 30F4011.



Fonte: Adaptado de Microchip (2006).

A medição da frequência do anemômetro será realizada pela sensibilização do pino IC1 (*Input Capture 1*) em cada mudança do nível lógico aplicado na entrada e o tempo de cada nível será contado pela configuração do TMR2 integrado ao IC1. Para isso, o TMR 2 foi configurado para permitir a captura de frequências superiores a 1 Hz. Caso o tempo de interrupção do IC1 seja maior que 1s, o TMR2 estoura (TMR2=PR2=28789), sendo posteriormente zerado e a próxima leitura do IC1 é descartada. O fluxograma da Figura 5.7 ilustra o processo mais detalhadamente.

Figura 5.7 – Algoritmo para descarte das frequências menores ou igual a 1 Hz.

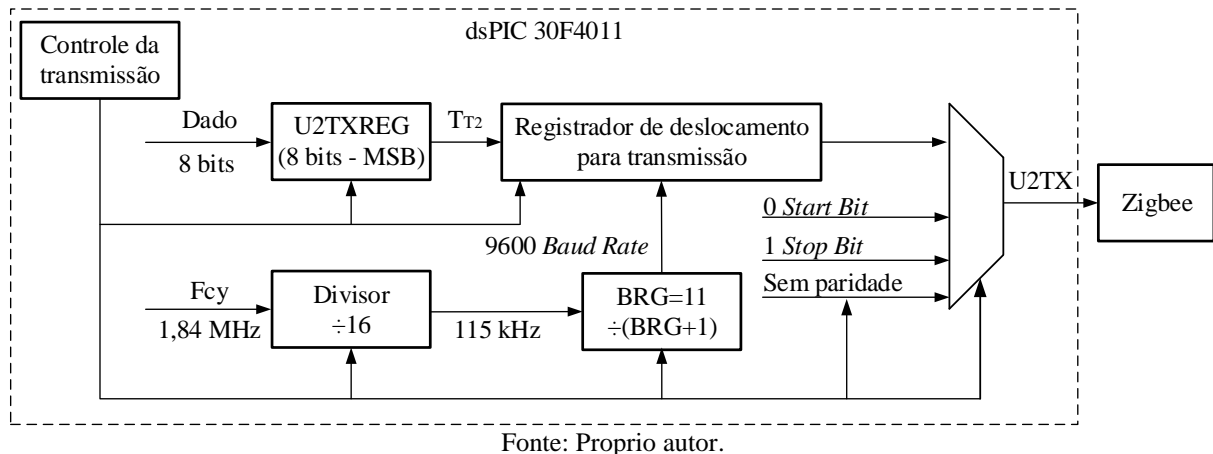


Fonte: Proprio autor.

Já o TMR 3 foi utilizado para definição de uma função *delay* (tempo de espera), para ser ajustado conforme necessário. Foi usado principalmente para configurações do display, além de garantir um tempo de aproximadamente 1 segundo entre o envio das velocidades para a rede wireless.

O módulo UART2 foi utilizado como meio de conexão entre o dsPIC e o Zigbee, configurada com uma taxa de transmissão de 9600 *Baud Rate*, 8 bits, com 1 *stop bit* e sem paridade. A Figura 5.8 ilustra o envio pelo periférico UART 2.

Figura 5.8 – Configuração da transmissão pela UART 2.



A lógica utilizada para programação é detalhada no item 5.2.2.2.

#### 5.2.2.2 Lógica do software

Foi utilizado o software MPLAB® IDE 8.0 e o compilador C30, disponibilizado pela empresa *Microchip®*, para programação do dsPIC 30F4011 em linguagem C. Na Figura 5.9 é apresentado o fluxograma simplificado da lógica utilizada no corpo principal da programação, onde será calculada a velocidade do vento e enviado para os dispositivos de saída (display e Zigbee), enquanto na

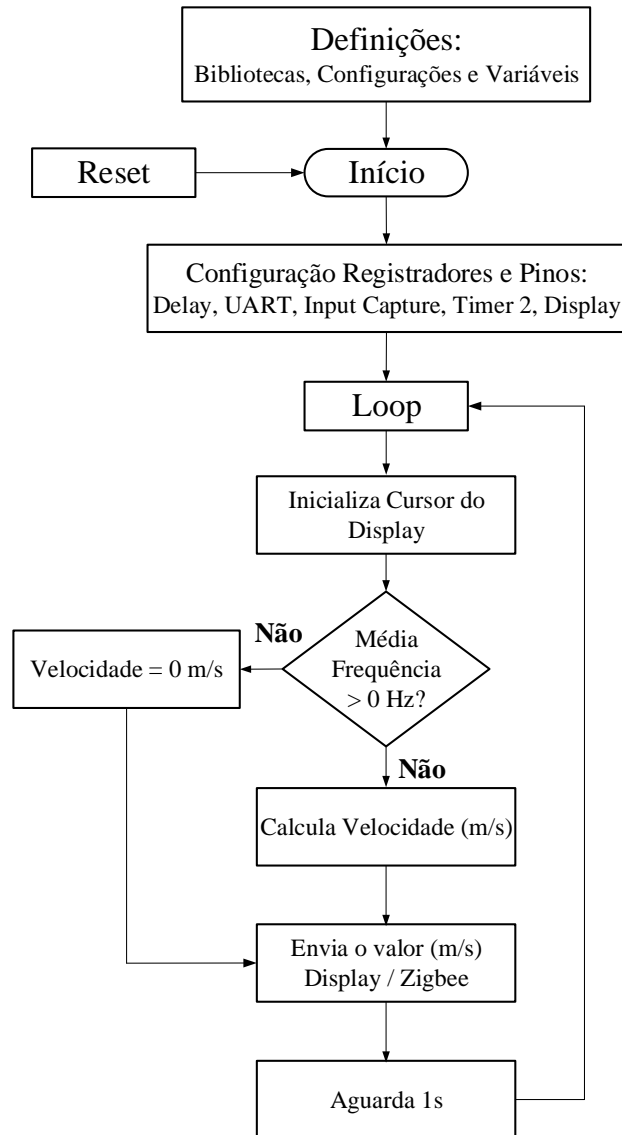
Figura 5.10 é apresentado o fluxograma das interrupções com suas respectivas ordens de prioridade, onde também é apresentada a lógica de cálculo da frequência.

A velocidade do vento é calculada com base na expressão (5.1), apresentada anteriormente no item 5.1.

O processo de leitura da frequência consiste em medir o tempo de cada semiciclo do sinal de entrada através do periférico IC1 configurado conforme descrito anteriormente no item 5.2.2.1. Logo, é preciso considerar o dobro do tempo medido durante o cálculo da frequência, conforme apresentado na expressão (5.2), onde PR2 é o valor programado (28789) e o IC1BUF é o valor do TMR2 armazenado durante o estouro do IC1.

$$F_{medida} = \frac{PR2}{2 \cdot IC1BUF} \quad (5.2)$$

Figura 5.9 – Fluxograma simplificado da estrutura básica do código.

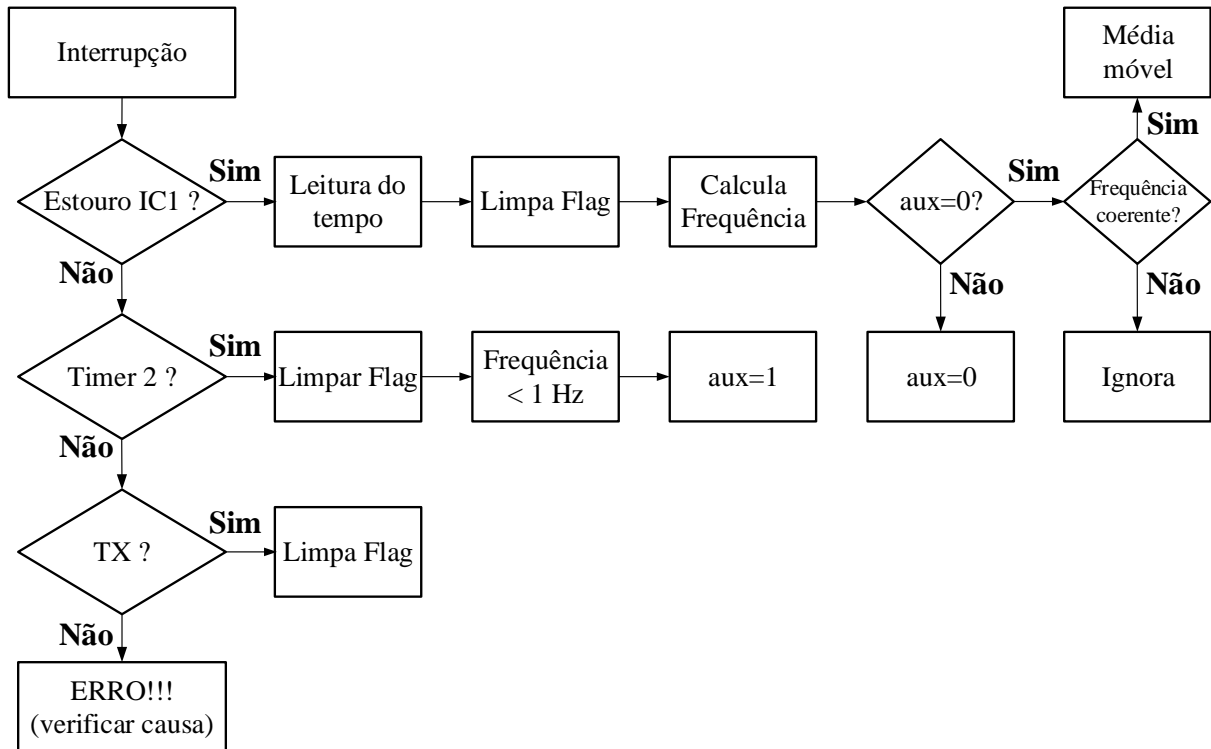


Fonte: Proprio autor.

O valor de frequência a ser considerada para a função da velocidade corresponde ao valor calculado pela média móvel ( $F_{media}$ ), utilizada com o objetivo de filtrar parte do ruído das medições e suavizar variações bruscas de velocidades. Esse método consiste em somar a medida ( $F_{medida}$ ) atual ao valor da média móvel anterior, esta última com um peso igual ao número de medições realizadas anteriormente ( $i-1$ ), e dividir pelo número de medições atual, exemplificado matematicamente pela expressão (5.3).

$$F_{media} = \frac{F_{media} \cdot (i-1) + F_{medida}}{i} \quad (5.3)$$

Figura 5.10 – Fluxograma simplificado das interrupções e medição da frequência.



Fonte: Proprio autor.

Durante as medições também são filtrados, via software, os valores de frequências menores que 1 Hz e maiores que 50 Hz, visto que resultados superiores a esse valor correspondem a velocidades de ventos maiores que 40 m/s, o que não condiz com o ambiente de instalação do anemômetro. Além do filtro passa faixa, também foi organizada mais uma lógica para ignorar variações bruscas de frequência, considerando uma variação máxima entre leituras consecutivas de 10 Hz.

### 5.3 Fonte de alimentação

Como fonte de alimentação optou-se pela utilização de um conversor *Flyback* CA/CC a ser conectado à rede elétrica disponível no local de instalação.

As fontes do tipo *Flyback* são conversores chaveados isolados de baixo custo com uma única chave e rápida resposta, múltiplas saídas e boa regulação cruzada, sendo as mais utilizadas em sistemas de baixas potências e altas taxas de redução de tensão (BARBI, 2006).

A utilização de um conversor chaveado em alta frequência permite a redução de peso e volume, sendo ideal para o sistema embarcado proposto, além de apresentar um alto rendimento quando comparado a fontes lineares.



As especificações do projeto da fonte consistem em uma conversão CA/CC, entrada alternada de 220 V e saída simétrica de  $\pm 5$  V contínuo, com baixo nível de potência e consumo variável conforme as funcionalidades do módulo Zigbee e a distância da transmissão. Visto isto, a potência do conversor foi definida considerando uma margem de expansão das funcionalidades do *Xbee* na rede e a inserção de outros sensores para o monitoramento do aerogerador.

Para geração do barramento CC necessário para o Flyback foi utilizado um retificador em ponte completa e, para uma melhor regulação da tensão de saída, utilizou-se os reguladores de tensão LM 7805 (sinal positiva) e LM 7905 (sinal negativo), cuja entrada de tensão dos mesmos necessita ser superior aos de saída em 3 V. Os valores para projeto estão apresentados na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 – Especificações de projeto para a fonte de alimentação.

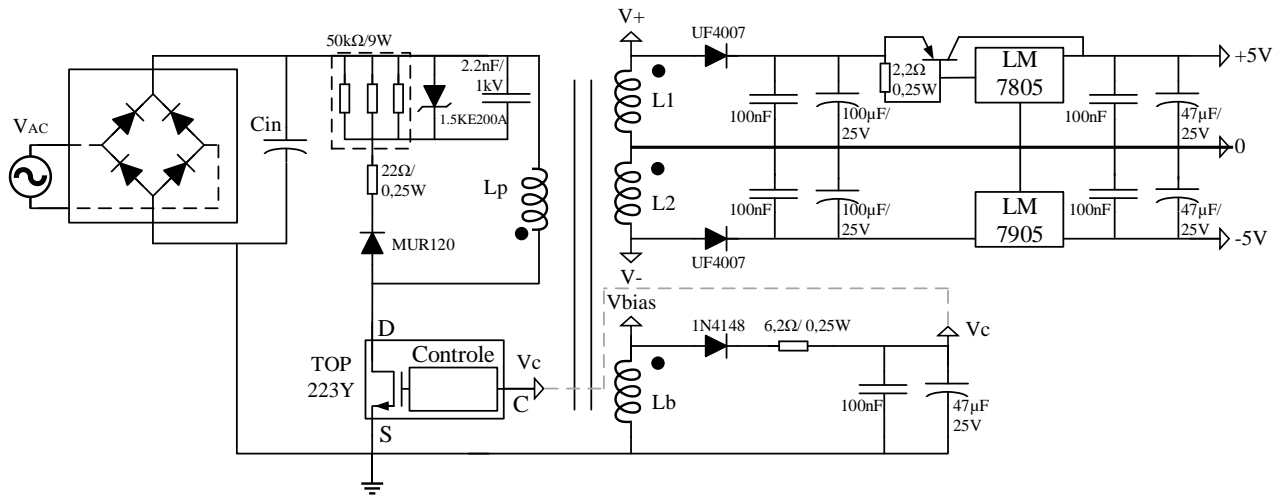
| Parâmetros do Retificador Ponte Completa |         |
|--|---------|
| Tensão nominal                           | 220 V   |
| Oscilação máxima                         | 10%     |
| Frequência                               | 60 Hz   |
| Parâmetros do Flyback                    |         |
| V+                                       | 8,7 V   |
| V-                                       | -8,7 V  |
| Vbias                                    | 6,7 V   |
| I+                                       | 0,9 V   |
| I-                                       | 0,3 A   |
| Ibias                                    | 0,1 A   |
| Potência de Saída                        | 11,11 W |
| Rendimento                               | 70%     |
| Potência de entrada                      | 15,87 W |

Fonte: Próprio autor.

Foi utilizado o Circuito Integrado (CI) TOP223Y para chaveamento e controle do flyback, que permite simplicidade de projeto e redução de tamanho e componentes, suportando até 30 W para tensões de entrada até 265 V. Com este CI torna-se necessário especificar somente o retificador, os magnéticos acoplados e os componentes de saída, estes últimos baseados nas notas de aplicação (AN) do TOPSwitch, disponibilizados pela *Power Integrations*® (2016).

Para reduzir os esforços do regulador LM7805 na saída, utilizou-se um semiconductor TBJ para desviar parte da corrente que circulará pelo CI, evitando sobreaquecimento do mesmo.

Figura 5.11 – Esquemático da fonte de alimentação.



Fonte: Próprio autor.

A Figura 5.11 apresenta o esquemático da fonte projetada, no qual os componentes especificados foram expressos nos datasheets dos circuitos integrados utilizados, enquanto as variáveis indefinidas apresentadas foram dimensionadas e seus valores se encontram na Tabela 5.3. Os cálculos das mesmas são descritos no apêndice A.

Tabela 5.3 – Especificações dos componentes para a fonte de alimentação.

| Parâmetros do Retificador Ponte Completa |                              |            |     |
|--|------------------------------|------------|-----|
| Capacitor (Cin)                          | 100 µF                       |            |     |
| Parâmetros do Flyback                    |                              |            |     |
| Núcleo                                   | NEE - 25/10/6 - IP12 THORTON |            |     |
| Enrolamentos                             | Voltas                       | Nº de fios | AWG |
| Primário (Lp)                            | 136                          | 1          | 32  |
| V+ (L1)                                  | 7                            | 3          | 25  |
| V- (L2)                                  | 7                            | 1          | 26  |
| Vbias (Lb)                               | 5                            | 1          | 30  |

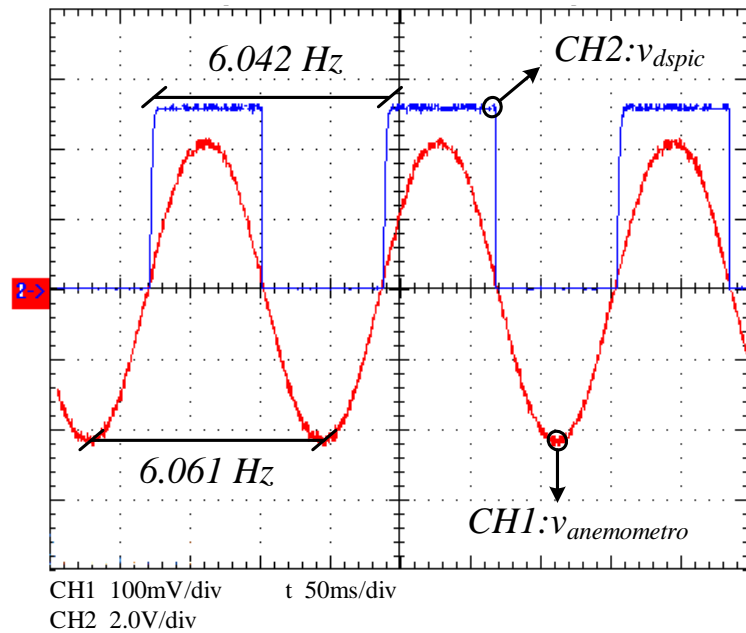
Fonte: Próprio autor.

#### 5.4 Sistema embarcado de supervisão da velocidade do vento

O resultado do circuito de condicionamento da forma de onda do anemômetro está apresentado na Figura 5.12, onde os sinais de entrada e saída estão em fase e praticamente com mesma frequência.

O valor calculado para a velocidade do vento correspondente a frequência da Figura 5.12 é verificado através dos dados enviados ao display e ao Zigbee, apresentados na Figura 5.13 e Figura 5.14, respectivamente.

Figura 5.12 – Formas de ondas do circuito conversor.



Fonte: Proprio autor.

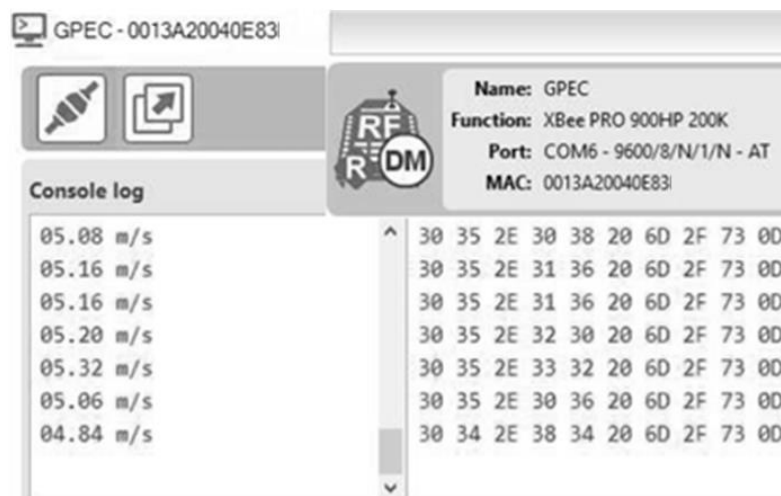
Figura 5.13 – Resultados do sistema através do display LCD.



Fonte: Proprio autor.

A interface da Figura 5.14 corresponde a do programa XCTU, da Digi International®, utilizado para recepção dos dados no computador remoto.

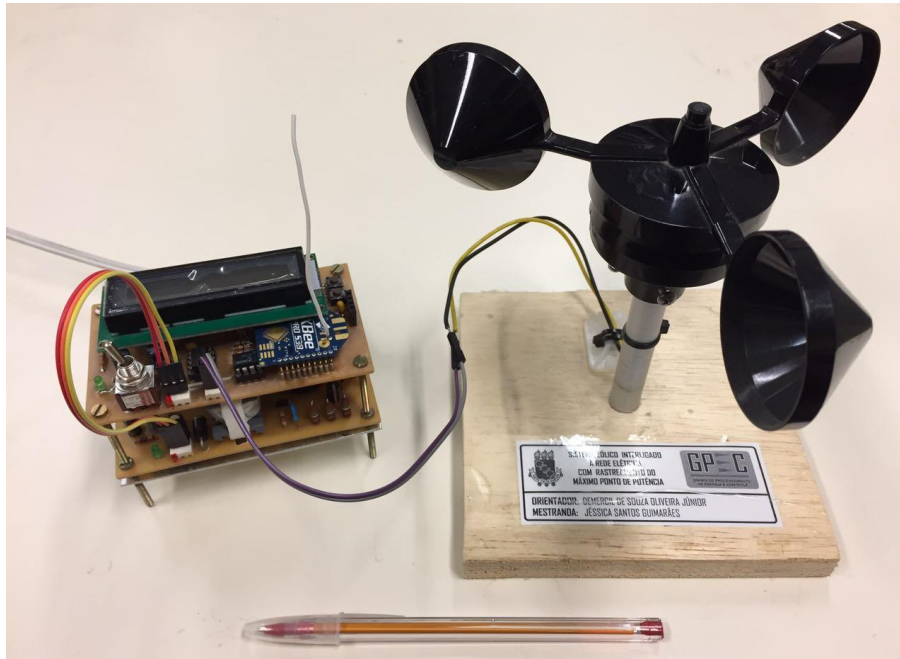
Figura 5.14 – Resultados do sistema através do computador remoto.



Fonte: Proprio autor.

O sistema embarcado completo para monitoramento da velocidade do vento está apresentado na Figura 5.15, composto pelo anemômetro e as placas de circuito impresso do circuito de transmissão e da fonte de alimentação. As placas foram elaboradas utilizando o software *Altium Designer*®.

Figura 5.15 – Sistema embarcado de monitoramento da velocidade do vento.



Fonte: Proprio autor.

## 6 MONITORAMENTO DA POTÊNCIA GERADA

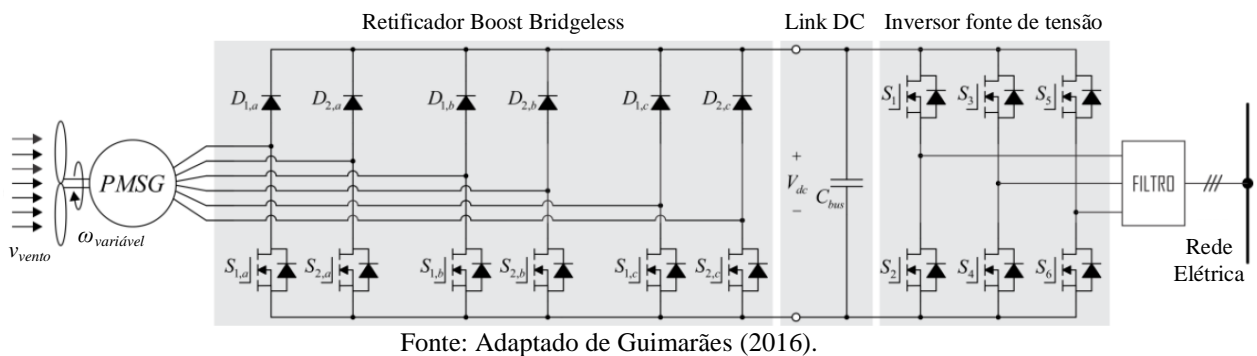
O monitoramento da potência gerada será realizado através da medição da tensão e corrente eficaz que estão sendo injetadas na rede. Partindo do pressuposto que os sinais elétricos trifásicos estejam equilibrados, será necessário supervisionar somente uma das fases do sistema. Com isso, a potência gerada será calculada pela equação (6.1), onde  $V_{RMS}$  e  $I_{RMS}$  são, respectivamente, os valores eficazes de tensão e corrente de fase.

$$P_{fornecida} = 3 \cdot V_{RMS} \cdot I_{RMS} \quad (6.1)$$

### 6.1 Conversor eletrônico de potência

O circuito de processamento de energia proposto em Guimarães (2016) pode ser dividido em dois estágios: um estágio CA/CC utilizando um conversor com topologia *boost bridgeless* trifásico unidirecional pra interligamento da energia fornecida pelo gerador com um link CC; e um estágio CC/CA utilizando um inversor trifásico ponte completa para conexão do link CC com a rede elétrica. A Figura 6.1 ilustra o circuito de processamento proposto para o sistema eólico a ser monitorado.

Figura 6.1 – Circuito de processamento de energia do sistema eólico.



O controle do mesmo é projetado para inserir somente potência ativa na rede.

### 6.2 Tensão e corrente injetados na rede

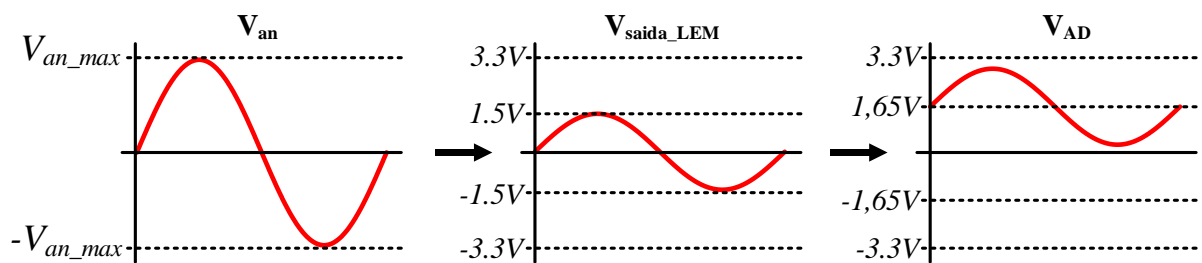
O controle das tensões e correntes a serem injetadas na rede baseia-se na teoria das potências instantâneas, onde os valores de tensão e corrente atuais do inversor são comparados com valores de referência durante o controle do mesmo (GUIMARÃES, 2016).

Logo, para o monitoramento da tensão e corrente gerada pelo sistema, serão enviados os valores de saída dos sensores de tensão e corrente utilizados no controle do

inversor. Este utiliza sensores fabricados pela LEM, modelo LV-25P para a tensão e modelo HO-25 sp33-1000 para a corrente.

O sensor de tensão tem capacidade máxima de 1200 V, cujo valor de entrada corresponde a uma corrente máxima de 14 mA relacionada a tensão pela utilização de uma resistência na entrada do transdutor. Sua saída é limitada a 25 mA, tendo sido utilizado um circuito de condicionamento de tensão composto por resistor, comparador e filtro, para obtenção de um sinal positivo na entrada do A/D do microcontrolador, conforme realizado em Almeida (2016) e apresentado na Figura 6.2.

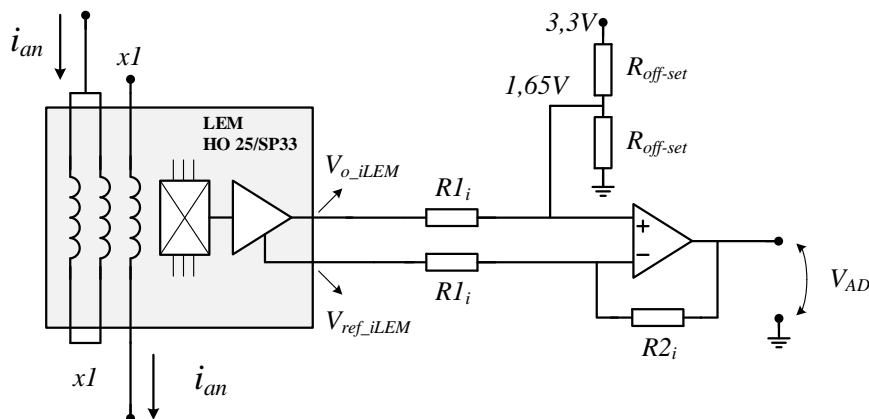
Figura 6.2 – Condicionamento das tensões aplicadas ao pino A/D do microcontrolador.



Fonte: Almeida (2016).

Os sensores de corrente são alimentados com 3,3V e apresentam como saída um sinal de tensão semelhante a saída do circuito de condicionamento da Figura 6.2. Suportam correntes nominais de entrada de 25 A, porém foram configurados para um valor de 12,5 A, conforme disponibilidade do transdutor. A saída dos sensores é medida de forma diferencial, anulando o nível de offset presente do mesmo. Logo, a saída diferencial foi condicionada adicionando-se um ganho para melhorar a resolução e somando-se 1,65 V, também baseado em Almeida (2016) e apresentado na Figura 6.3.

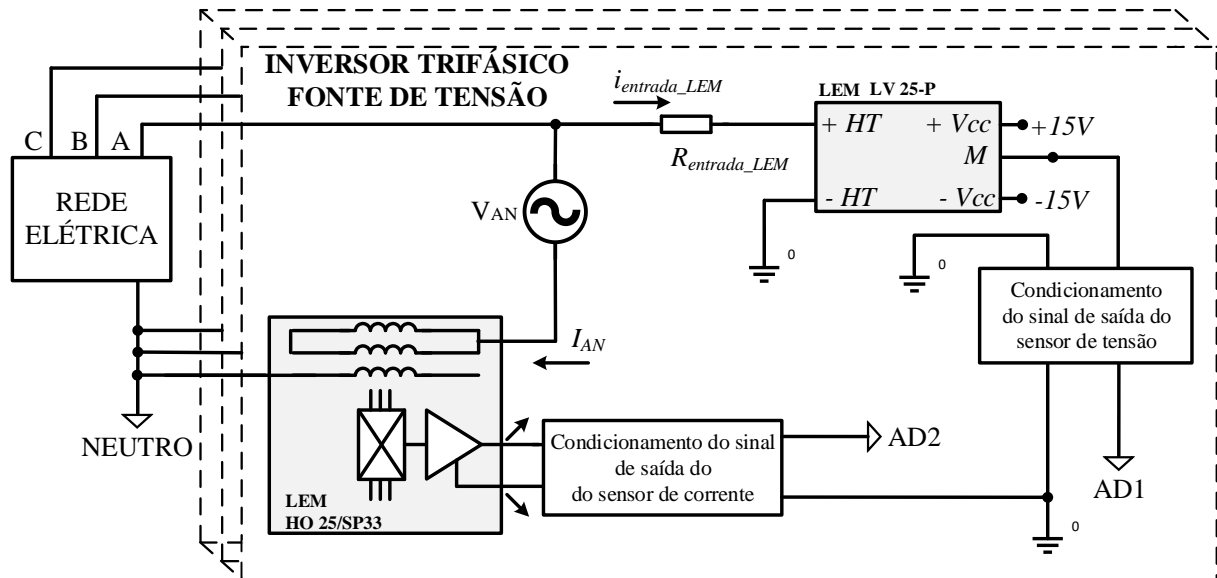
Figura 6.3 – Circuito de condicionamento do sensor de corrente.



Fonte: Adaptado de Almeida (2016).

Na Figura 6.4 temos a representação das medições dos sinais de tensão e corrente em uma das fases de saída do inversor, representados por AD1 e AD2, respectivamente.

Figura 6.4 – Conexão do sistema de monitoramento ao inversor.



Fonte: Próprio autor.

Os valores reais de tensão e corrente são obtidos com base no ganho dos sensores e na configuração das resistências, sendo relacionados com as tensões de saída dos sensores através de um ganho total, conforme apresentado a seguir:

$$V_{AN} = \frac{V_{AD1}}{G_{TENSÃO}} \quad (6.2)$$

$$I_{AN} = \frac{(V_{AD2} - 1,65)}{G_{CORRENTE}} \quad (6.3)$$

Sendo o ganho total de tensão  $G_{TENSÃO}$  de  $6,19 \cdot 10^{-3}$  e o ganho total de corrente  $G_{CORRENTE}$  de  $104,27 \cdot 10^{-3}$  (ALMEIDA, 2016).

Portanto, os valores de tensão dos sensores na saída do inversor,  $V_{AD1}$  e  $V_{AD2}$ , serão amostrados pelo conversor A/D do microcontrolador dsPIC 30F2020, que também será responsável pelo tratamento dos dados e o envio dos mesmos ao módulo Zigbee, cujas fórmulas (6.2) e (6.3) serão aplicadas após a recepção no ponto de acesso aos dados.

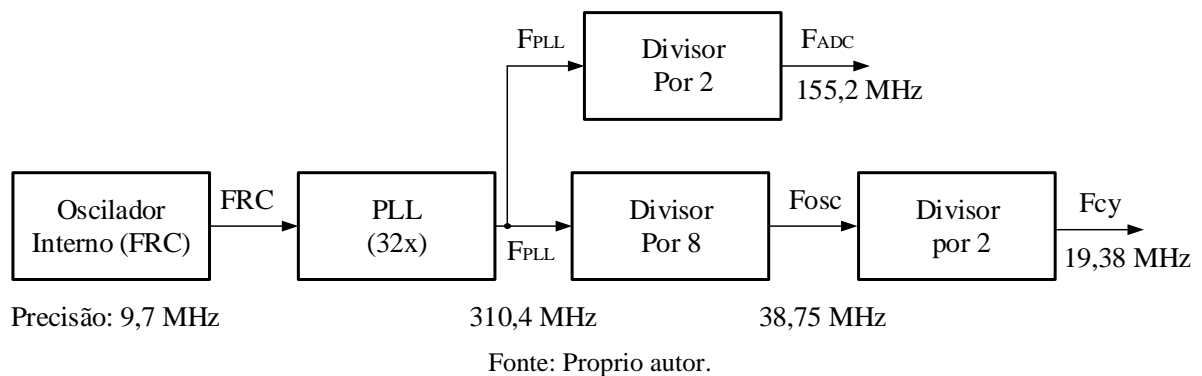
### 6.3 Software de tratamento

Conforme introduzido anteriormente, será utilizado o microcontrolador dsPIC 30F2020, da *Microchip*®, também da família 30F, responsável por amostrar os sinais analógicos, calcular o valor RMS (*Root Mean Square*) e enviá-lo ao módulo Zigbee.

Suas características são semelhantes as do 30F4011. As principais diferenças exploradas entre os dispositivos foram o tamanho reduzido, dois osciladores internos, sendo um na frequência industrial (9,7 MHz a 14,55 MHz) e um estendido (6,4 MHz a 9,7 MHz), e módulos PWM (*Pulse Width Modulation*) mais completos para utilização em controles trifásicos (MICROCHIP, 2006-2014).

O dsPIC foi ajustado com a frequência industrial máxima do oscilador interno (FRC) com 9,7 MHz de precisão e PLL constante de 32x. Durante a derivação do oscilador, as frequências são novamente ajustadas por divisores, obtendo uma frequência final de instrução de 19,38 MHz (tempo de instrução de 51,6 ns) e frequência do ADC de 155,2 MHz (6,44 ns). A sequência de configuração comentada está ilustrada na Figura 6.5.

Figura 6.5 – Configuração do oscilador e do ciclo de instrução do dsPIC 30F2020.



Esses valores de frequência são bases para a configuração dos módulos utilizados para processamento dos sinais.

#### 6.3.1 Processamento digital do sinal analógico

O processamento dos sinais de tensão e corrente foi realizado utilizando o conversor analógico digital (ADC) do dsPIC 30F2020, com uma resolução de 10 bits e tensão contínua de referência de 5 V.

A taxa de amostragem foi ajustada de forma a atender o teorema Nyquist, que afirma que a frequência de amostragem ( $f_s$ ) deve ser maior que o dobro da frequência do sinal

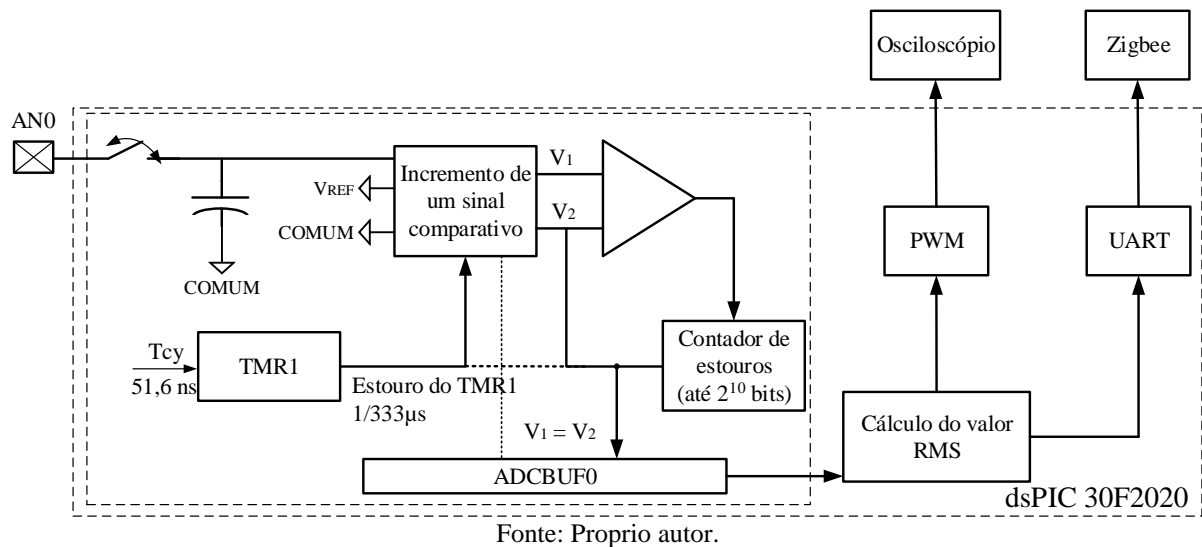


analógico a ser processado ( $f_R$ ). Com isso, teve-se como premissa um  $f_s$  maior que 120 Hz ( $f_R = 60$  Hz). Esta limitação é utilizada para evitar que os pontos amostrados mascarem o formato da onda digitalizada.

O tempo de amostragem é configurado pelo timer 1 associado ao contador do ADC. Para a definição do mesmo adotou-se 32 amostras do sinal por período (16,67 ms), necessitando de um tempo de amostragem de 521  $\mu$ s, valor para o qual foi calculado o estouro do TMR1 (processo semelhante ao do dsPIC 30F4011), correspondendo à um  $f_s$  próximo de 1900 Hz.

Foram utilizadas as entradas analógicas AN0 e AN1 para os sensores de tensão e corrente, respectivamente, cada um com seu respectivo registrador de saída (ADBUF0 e ADBUF1). O módulo AD foi configurado para amostragem simultânea, isto é, os valores de tensão e corrente são salvos em um mesmo instante para garantir a correlação entre os valores medidos. A Figura 6.6 ilustra didaticamente a amostragem do canal AN0.

Figura 6.6 – Ilustração dinâmica do processamento do sinal tensão no dsPIC.



### 6.3.2 Valor Eficaz (RMS)

O valor eficaz ou RMS (*Root Mean Square*) estima a dissipação de calor resultante de um sinal periódico com qualquer forma de onda. Para sinais digitais é calculado a partir da fórmula (6.2).

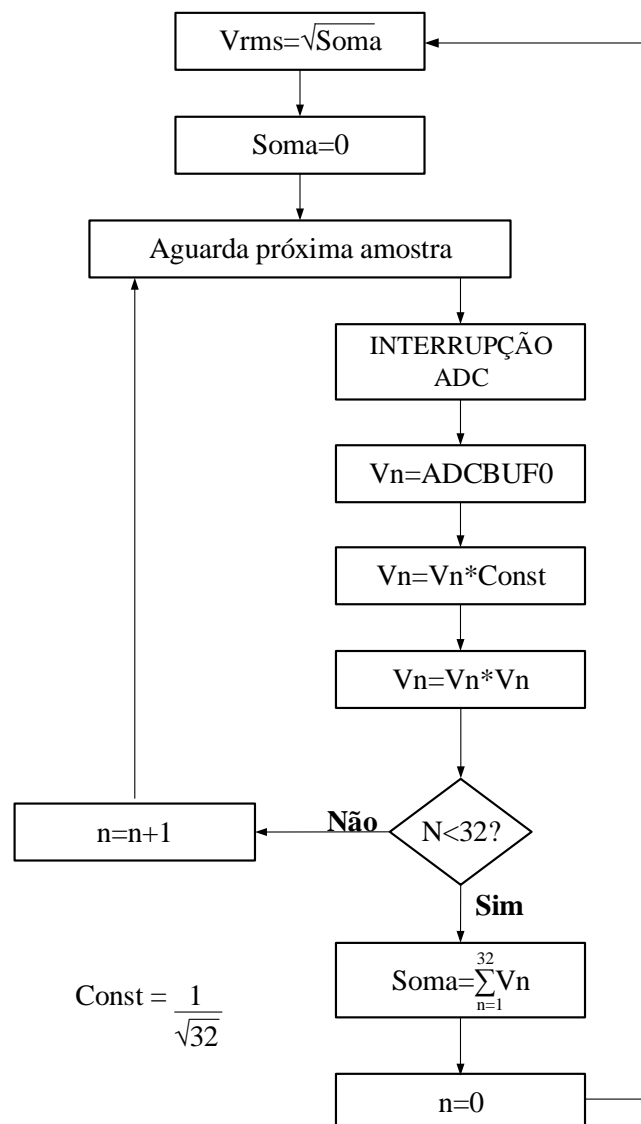
$$X_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N (x_i)^2} \quad (6.2)$$

Onde  $x_i$  são os valores discreto e  $X_{RMS}$  o valor eficaz calculado para N amostras por período (ALMEIDA, B. R. D.; BATISTA, F. A. B.; PETRY, 2010).

O cálculo do valor RMS do programa consistiu na aplicação da fórmula (6.2) para 32 amostras (valores discretizados) em cada período da rede elétrica. Durante o processo, devido as limitações de resolução e processamento da unidade lógica convencional do dsPIC, o somatório foi realizado por etapas, conforme ilustra o fluxograma da Figura 6.7.

A constante  $\frac{1}{\sqrt{32}}$  logo após a leitura do AD foi utilizada para evitar operações de divisões durante o código, agilizando o processamento dos dados e reduzindo a possibilidade de erros de aritmética, sendo 32 o número de amostras e a raiz proveniente da fórmula do valor eficaz, tendo sido inicializada antes do código principal.

Figura 6.7 – Fluxograma da metodologia de cálculo dos valores eficazes.



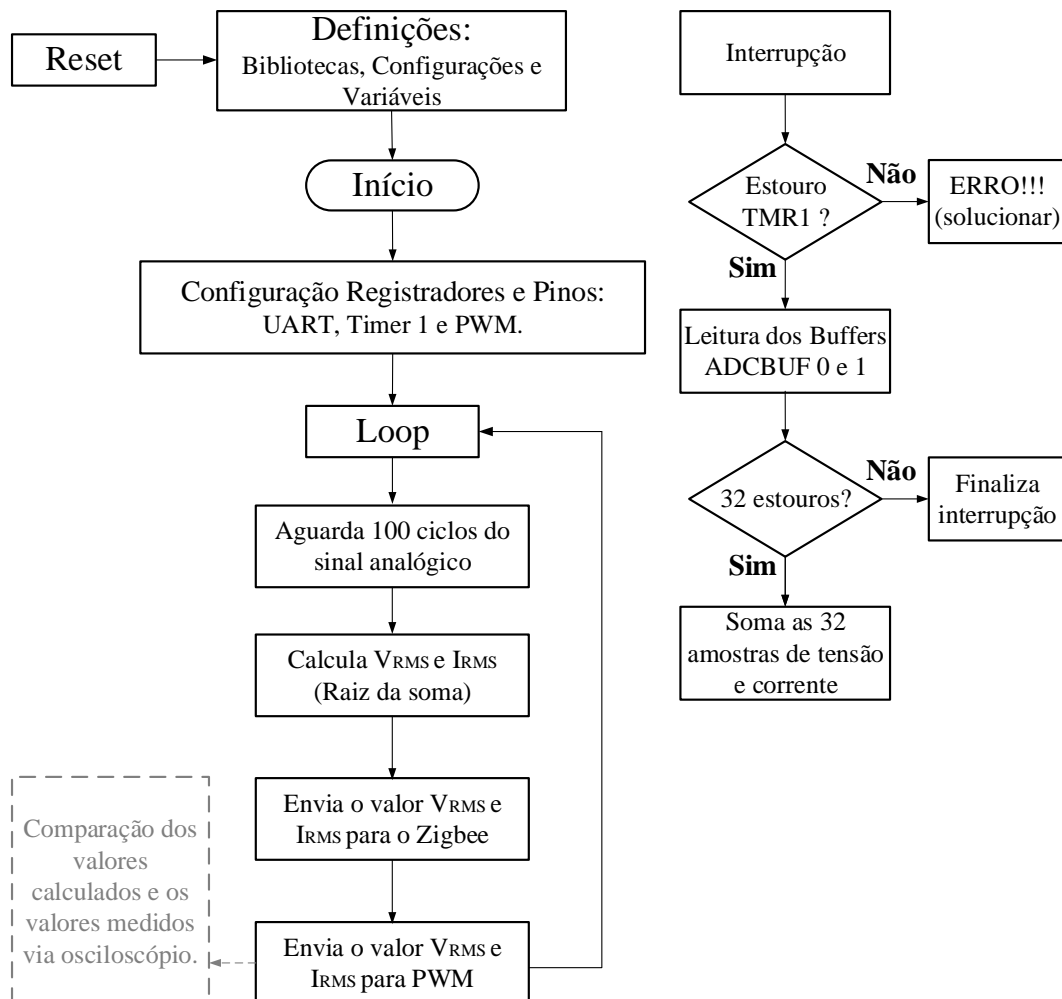
Fonte: Proprio autor.

A desvantagem do fracionamento do cálculo são as perdas por arredondamento em cada etapa, devendo futuramente serem exploradas as funções do DSP interno ou operações com pontos flutuantes para otimização do processamento.

### 6.3.3 Lógica do software

Foi utilizado o software MPLAB® X IDE v3.65 e o compilador XC16, também disponibilizados pela empresa *Microchip*® e mais atual que o anterior, para programação do dsPIC 30F2020 em linguagem C. Na Figura 6.8 é apresentado o fluxograma simplificado da lógica utilizada no processamento.

Figura 6.8 – Fluxograma simplificado da lógica do software.



Fonte: Proprio autor.

Os valores eficazes são calculados conforme explicado anteriormente, porém só são enviados para a UART após 100 ciclos do sinal analógico para garantir o intervalo de envio dos valores.

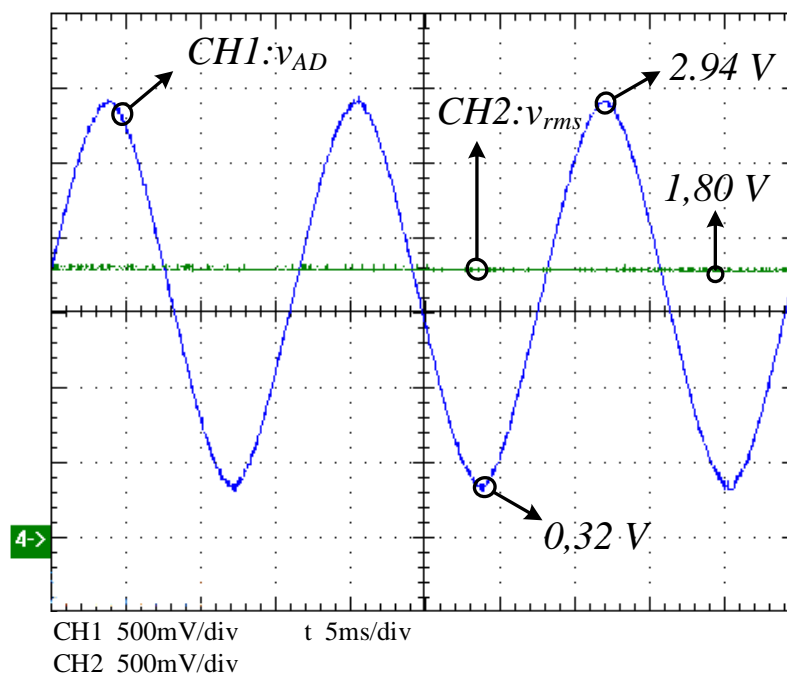
Lembrando que as medições pelo software correspondem aos sinais de saída dos sensores, os valores reais de tensão e corrente serão calculados após recepção dos dados no computador pessoal no GPEC.

O módulo PWM foi utilizado para comparação entre os valores calculados pelo programa e os valores analógicos dos sensores através do display de um osciloscópio.

#### 6.4 Sistema embarcado de monitoramento da potência gerada

A Figura 6.9 ilustra a coerência no valor eficaz calculado através da comparação entre o sinal do sensor, simulado pela configuração de um gerador de função e representado pela onda senoidal azul no canal 1 (CH1), e o sinal de saída do PWM que recebe o valor digital do processamento dos dados amostrados, representado pelo sinal verde do canal 2 (CH2).

Figura 6.9 – Sinal de tensão do sensor simulado comparado ao valor eficaz calculado.

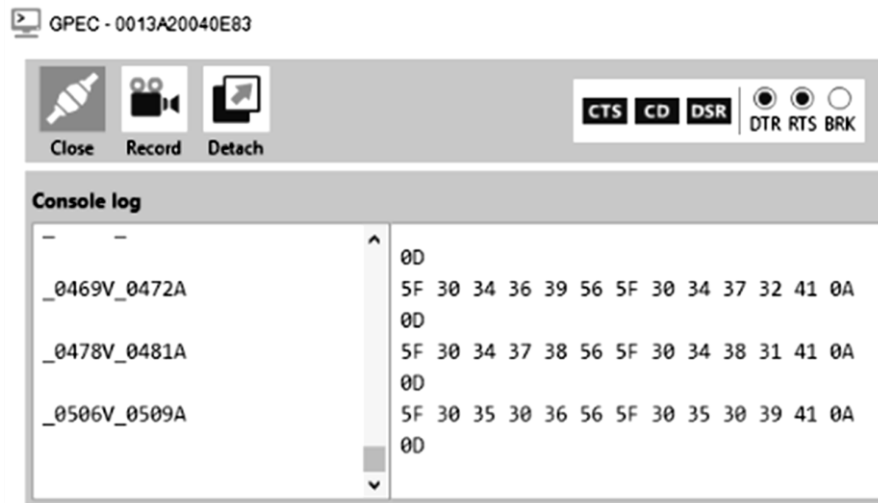


Fonte: Proprio autor.

A interface da Figura 6.10 corresponde a do programa XCTU, da Digi International®, onde observa-se os dados enviados ao coordenador através da rede Zigbee. Os mesmos correspondem aos valores eficazes calculados para os sensores em valor digital.

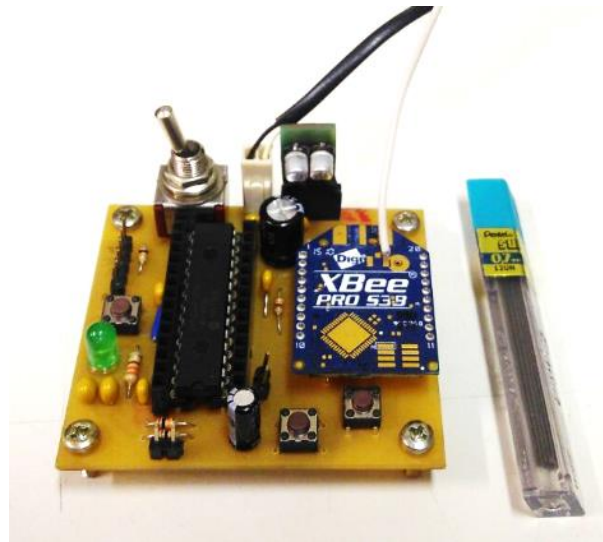
A placa de monitoramento de potência está apresentada na Figura 6.11. A mesma será alimentada com tensão contínua de 5 V disponibilizada pelo circuito de processamento de energia e tem como entrada os sinais dos sensores de tensão e corrente. A placa foi elaborada utilizando o software *Altium Designer*®.

Figura 6.10 – Verificação dos valores eficazes através do computador remoto.



Fonte: Proprio autor.

Figura 6.11 – Placa de monitoramento da potência gerada.

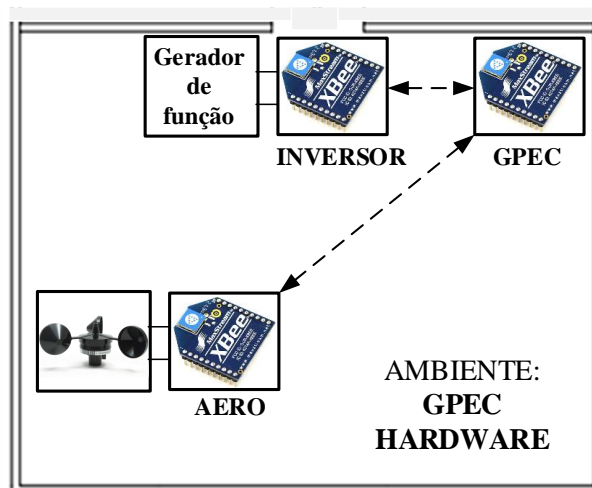


Fonte: Proprio autor.

## 7 SISTEMA COMPLETO DE MONITORAMENTO REMOTO

Após apresentada a configuração da rede wireless e a elaboração dos nós com seus resultados parciais, foi montada uma minirrede no laboratório GPEC, onde manteve-se o alcance dos módulos Xbee nos valores mínimos de forma a reduzir a área de teste. A Figura 7.1 ilustra a disposição da minirrede no ambiente hardware.

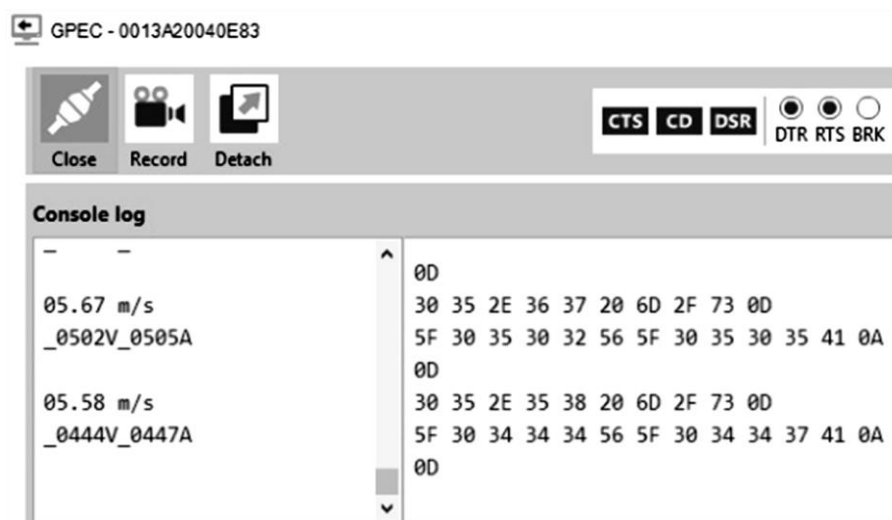
Figura 7.1 – Minirrede de monitoramento.



Fonte: Proprio autor.

Os resultados da recepção simultânea dos dados de monitoramento de vento e da potência estão apresentados na Figura 7.2 através da interface do programa XCTU onde observa-se os valores recebidos pelo coordenador (GPEC).

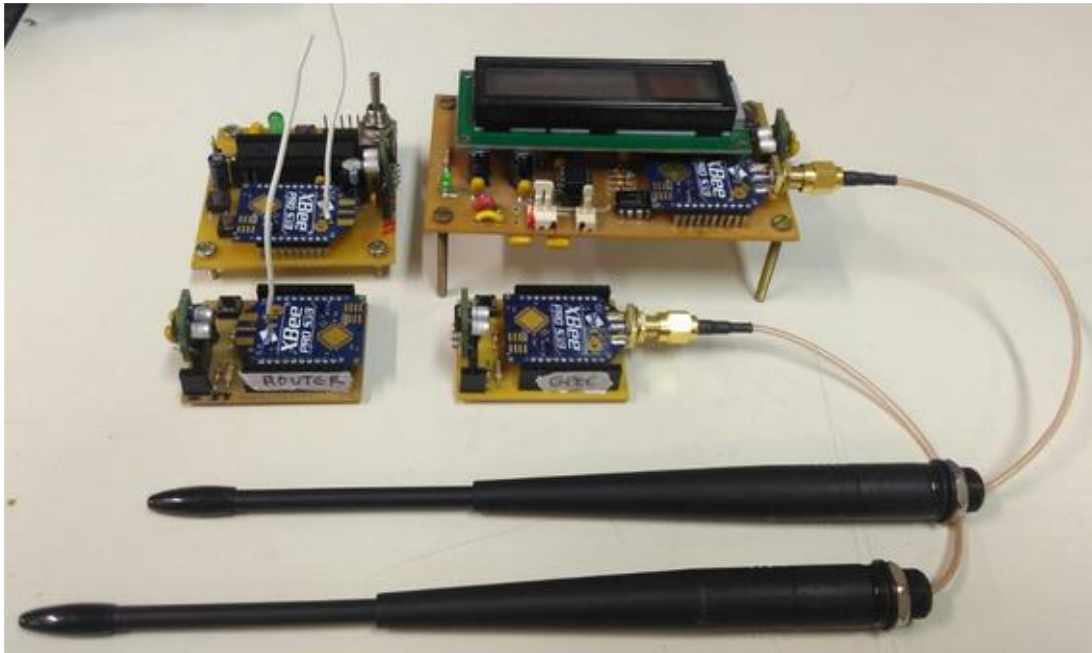
Figura 7.2 – Dados de monitoramento da WECS.



Fonte: Proprio autor.

Todos os módulos do sistema proposto e suas respectivas placas estão apresentados na Figura 7.3.

Figura 7.3 – Módulos e placas utilizados para monitoramento do sistema eólico.



Fonte: Proprio autor.

## 8 CONCLUSÃO

O sistema de monitoramento remoto elaborado neste trabalho atende satisfatoriamente as necessidades do sistema eólico mencionado, tendo sido descrito em quatro etapas: formação da rede wireless utilizando dispositivos Xbee-PRO S3B, montagem do nó de monitoramento do vento, montagem do nó de monitoramento da potência gerada e sistema completo com as três etapas anteriores operando em conjunto.

Para formação da rede wireless foi considerada sua finalidade de estimativa de processos, onde a utilização de nós pré-definidos reduziu a necessidade de funções diversas, como: ausência de sistemas de localização e elementos de movimentação, minimização de transmissões de *broadcast* e de estabelecimento de novas rotas (demandam tempo e potência durante a transmissão), além de sinais de comandos remotos dispensáveis, embora os mesmos tenham sido previstos quando necessário. Dessa forma, foi possível montar uma rede sem fio com consumo e complexidade baixos, onde foram utilizados 4 módulos Zigbee compondo uma topologia em árvore, com facilidade de expansão para rede em malha através de comandos remotos enviados pelo coordenador.

A viabilidade da rede no ambiente proposto e sua operabilidade foram verificadas em duas etapas: estabelecimento de um *link* confiável entre o ambiente da WECS e o laboratório GPEC; comunicação entre os módulos atuando com seus respectivos papéis na rede (coordenador, roteador e dispositivo final). Nas duas etapas os resultados foram satisfatórios, obtendo-se uma comunicação estável, com cada módulo operando conforme sua funcionalidade.

Os resultados dos sistemas embarcados de monitoramento da velocidade do vento e da potência gerada também foram satisfatórios, onde obteve-se dados coerentes e precisos.

Como conclusão do sistema de monitoramento remoto completo, simulou-se a operação no ambiente final através da montagem de uma minirrede no laboratório, utilizando-se dos módulos já configurados e conectados aos respectivos circuitos de monitoramento, onde somente o alcance foi temporariamente reduzido com o objetivo de limitar a área de teste. Nesta última, verificou-se que o funcionamento de cada parte do sistema não é afetado pela operação simultânea de todos os nós na rede, porém é necessário um intervalo maior que 1 segundo entre cada conjunto de dados (velocidade, tensão e corrente) para assegurar a recepção dos mesmos pelo coordenador no ponto final de acesso.



## 8.1 Sugestões para trabalhos futuros:

Como pode ser observado, o sistema elaborado tem como objetivo verificar a potência gerada pelo sistema eólico em teste. Entre diversas possibilidades de implantação e melhoria deste trabalho, destacam-se:

- Estrutura física hermeticamente fechada para alocação das placas de aquisição em ambiente aberto e protegidos contra intempéries.
- Montagem das estruturas no ambiente operacional.
- Sistema de recepção e manipulação de dados no laboratório: interface própria para recepção dos dados no ponto de acesso; cálculo dos valores de potência estimada (velocidade do vento) e gerada (informações do inversor); e banco de dados para armazenamento das informações.
- Segurança da rede.
- Otimização de processamento no dsPIC utilizando ferramentas do DSP interno.
- Armazenamento de dados na nuvem, website e/ou aplicativo para monitoramento dos dados fora do laboratório.

Devido as vantagens comentadas sobre a WPAN elaborada, também pode-se destacar outros ramos de pesquisas utilizando-se da rede Zigbee proposta. Entre as diversas possibilidades, tem-se:

- Controle do conversor: algoritmo de rastreamento de máxima potência (*MPPT* - *Maximum Power Point Tracker*) utilizando-se dos valores instantâneos de velocidade do vento disponíveis na rede.
- Inserção de novas variáveis de monitoramento, como temperatura dos componentes da WECS e direção dos ventos.

## 8.2 Publicações Resultantes

BARBOSA, S. G.; ALMEIDA, B. R.; OLIVEIRA JR., D. S. “**Real-time data monitoring with zigbee wireless transmission applied to a WECS**”, 14th Congresso Brasileiro de Eletrônica de Potência (COBEP). Fortaleza, Brasil, 19 novembro – 22 dezembro 2017.

## REFERÊNCIAS

- ABB. **Technical Application Papers No.13: Wind power plants**. Bergamo 2011.
- ABEEÓLICA. Energia Eólica - O setor. [201-]. Disponível em: <<http://www.abeeolica.org.br/energia-eolica-o-setor/>>. Acesso em: Junho, 2017.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Resolução Normativa N° 687/2015**, 2015. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2015687.pdf>>. Acesso em: 29/11/2017.
- ALMEIDA, B. R. D. **Conversor ca-cc trifásico de único estágio, bidirecional, isolado em alta frequência, com correção de fator de potência**. 2016. 151 [Tese] DEE, UFC, Fortaleza, CE.
- ALMEIDA, B. R. D.; BATISTA, F. A. B.; PETRY, C. A. **Medição digital aplicada a estabilizadores e condicionadores**. 9° IEEE/IAS International Conference on Industry Applications (INDUSCON). São Paulo. SP: 6 p. 2010.
- AMIRAT, Y. et al. **Condition Monitoring and ault Diagnosis in Wind Energy Conversion Systems: A Review**. 2007 IEEE International Electric Machines & Drives Conference, 2007. 3-5 May 2007. p.1434-1439.
- BARBI, I. **Projetos de fontes chaveadas**. 2°. Florianópolis, SC: 2006. 332p
- BARBOSA, S. G.; ALMEIDA, B. R.; OLIVEIRA, D. S. **Real-time data monitoring with Zigbee wireless transmission applied to a wecs**. 14° Congresso Brasileiro de Eletrônica de Potência (COBEP). Juiz de Fora, MG: 6 p. 2017.
- CAMPOS, C. F. P. D. S. **Estudo e especificação de um sistema de instrumentação para unidades de elevação de petróleo utilizando tecnologia sem fio**. Natal, RN: UFRN: 77 p. 2010.
- CE, P. F.-. Cidade de Fortaleza. **INFORMAÇÕES**, Fortaleza, CE, 2013. Disponível em: <<http://www.portal-fortaleza.com/fortaleza.html>>. Acesso em: 12/10/2017.
- CORRÊA, U. et al. **Redes Locais Sem Fio: Conceito e Aplicações**. Florianópolis, SC: 41 p. 2006.
- D'AMBROSIA, J. IEEE 802 LAN/MAN Standards Committee. 2017. Disponível em: <<http://www.ieee802.org/>>. Acesso em: Setembro, 2017.
- DIGIINTERNATIONAL. **XBee-PRO® 900HP and XSC RF Modules: S3 and S3B**. 2015. 199p. [Datasheet]
- \_\_\_\_\_. XCTU User Guide. 2017. Disponível em: <<https://www.digi.com/resources/documentation/digidocs/90001458-13/default.htm>>. Acesso em: 08/11/2017.

EPE. **Plano Nacional de Energia 2030**. 2007. Disponível em: < [http://www.epe.gov.br/PNE/20080512\\_9.pdf](http://www.epe.gov.br/PNE/20080512_9.pdf) >. Acesso em: 07/10/2017.

\_\_\_\_\_. **Energia Renovável: Hidráulica, Biomassa, Eólica, Solar, Oceânica**. Rio de Janeiro, RJ: 452 p. 2016.

GOOGLE. **Google Maps**. 2017. Disponível em: < <https://www.google.com.br/maps/place/Department+of+Electrical+Engineering+UFC/@-3.7414013,-38.5561584,14z/data=!4m8!1m2!2m1!1sufc+dee!3m4!1s0x7c74bdb808c7d13:0xf738a23023623118!8m2!3d-3.7441329!4d-38.5771389> >. Acesso em: 02/06/2017.

GUIMARÃES, J. S. **Sistema de conversão de energia eólica interligado à rede**. 2016. 167 Dissertação (Mestrado) DEE, UFC, Fortaleza, CE.

MELO, P. **Padrão IEEE 802.15.4 - A base para as especificações Zigbee, WirelessHart e MiWi**, [Online], 2017. Disponível em: < <https://www.embarcados.com.br/padrao-ieee-802-15-4/> >. Acesso em: Junho, 2017.

MICROCHIP. **dsPIC30F4011/4012: Data Sheet**. 2005. 228p [Datasheet]

\_\_\_\_\_. **dsPIC30F: Family Reference Manual**. 2006. 772p [Datasheet]

\_\_\_\_\_. **dsPIC30F1010/202X**. 2006-2014. 286 p [Datasheet]

MME. **Energia eólica no Brasil e no mundo**. 2015. Disponível em: < <http://www.mme.gov.br/documents/10584/3894319/Energia+E%C3%B3lica+-+ano+ref++2015+%283%29.pdf/f5ca897d-bc63-400c-9389-582cd4f00ea2> >. Acesso em: Junho, 2017.

NENOKI, E. **Zigbee – Estudo da tecnologia e aplicação no sistema elétrico de potência**. 2013. 51 Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, PR.

NEVES, E. R. **Energia eólica no brasil**. p. 51, 2016. Disponível em: < [http://www.creasp.org.br/arquivos/camaras/ceemm/CEEMM\\_Apres\\_EOLICA\\_CEEII\\_2016\\_02-05-2016.pdf](http://www.creasp.org.br/arquivos/camaras/ceemm/CEEMM_Apres_EOLICA_CEEII_2016_02-05-2016.pdf) >. Acesso em: 10/10/2017.

NRG. **Specifications NRG #40C Anemometer**. [Datasheet]: 2 p. 2007.

PINTO, M. D. O. **Fundamentos de Energia Eólica**. Rio de Janeiro, RJ: LTC, 2013. 368

POWERINTEGRATIONS. **TOP221-227; TOPSwitch-II Family**. 2016. 21p [Datasheet]

RIBEIRO, C. H. P. **Redes de Sensores Sem Fio**. Rio de Janeiro, RJ, 2008. Disponível em: < [https://www.gta.ufrj.br/grad/08\\_1/rssf/Padres.html](https://www.gta.ufrj.br/grad/08_1/rssf/Padres.html) >. Acesso em: 25/09/2017.

RIVERA, A. D. A. **Redes de equipamentos sem fio de uso pessoal: comparação de tecnologias emergentes e análise de tendências**. 2010. 115 Dissertação (Mestrado em Sistemas Eletrônicos), Escola Politécnica, Universidades de São Paulo, São Paulo.

SALEIRO, M.; EY, E. Zigbee: Uma Abordagem Prática., [201-]. Disponível em: < [https://lusorobotica.com/ficheiros/Introducao\\_ao\\_Zigbee\\_-\\_por\\_msaleiro.pdf](https://lusorobotica.com/ficheiros/Introducao_ao_Zigbee_-_por_msaleiro.pdf) >. Acesso em: Julho, 2017.

SEABRA, H. V. M.; LUGLI, A. B. **Redes sem fio para Automação Industrial: Estudo e Aplicação**. Santa Rita do Sapucaí, MG: INATEL: 8 p. 2014.

SILVA, L. H. D. S. **Desenvolvimento de uma Rede de Sensores Sem Fio Utilizando ZigBee para Aplicações Diversas**. 2011. 96 Monografia, Universidade de Pernambuco, Recife, PE.

VICENTIN, D. J. **A Reticulação da banda larga móvel: definindo padrões, informando a rede**. 2016. 271 Tese INSTITUTO DE FILOSOFIA E CIÊNCIAS HUMANAS, UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS, Campinas, SP.

**APÊNDICE A – PROJETO DOS CAPACITORES E MAGNÉTICOS DA FONTE  
DE ALIMENTAÇÃO**

**PROJETO DA FONTE AUXILIAR**  
**Flyback (Modo de Condução Descontínua)**  
**MEMORIAL DE CÁLCULOS**

**1. DADOS DE PROJETO**

**1.1. Geral:**

$$T_{amb} := 50\text{ }^{\circ}\text{C} \quad [\text{Temperatura ambiente}]$$
$$\mu_0 := 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{H}}{\text{m}} \quad [\text{Permeabilidade relativa do ar}]$$
$$\eta := 0.7 \quad [\text{Rendimento}]$$

**1.2. Carga:**

| Tensão $\Delta V_o := 0.05\text{V}$  | Corrente:                 | Resistência:           |
|--|---------------------------|------------------------|
| $V_{o_1} := 8.7\text{V} \quad (+5\text{Va})$   | $I_{o_1} := 0.9\text{A}$  | $R_{o_1} := 9.7\Omega$ |
| $V_{o_2} := 8.7\text{V} \quad (+5\text{Vb})$   | $I_{o_2} := 0.3\text{A}$  | $R_{o_2} := 29\Omega$  |
| $V_{o_3} := 5.7\text{V} + 1.0\text{V} = 6.7\text{V} \quad (\text{Auxiliar})$<br>(Tensão auxiliar de controle: datasheet TOP223Y) | $I_{o_3} := 100\text{mA}$ | $R_{o_3} := 67\Omega$  |

$$k := 1..3$$

$$P_o := \sum_k \left( \left( |V_{o_k}| \cdot |I_{o_k}| \right) \right) = 11.11 \cdot \text{W}$$

$$P_i := \frac{P_o}{\eta} = 15.871 \cdot \text{W}$$

(Controlador adotado TOP223Y)

**1.3. Controlador: TOP223Y**

$$V_{Dmax} := 700\text{V} \quad (\text{Tensão Drain-Source máxima})$$
$$D_{max\_TOP22xY} := 70\% \quad (\text{Máximo valor de Duty cycle do TOP22xY})$$
$$D_{min\_TOP22xY} := 0.7\% \quad (\text{Mínimo valor de Duty cycle do TOP22xY})$$
$$f_s := 100\text{kHz} \quad (\text{frequência de chaveamento do TO223Y})$$

**1.4. Alimentação da rede:**

Tensão de entrada da rede (pico):

$$V_{in\_min} := \sqrt{2} \cdot 220\text{V}(90\%) = 280.014 \cdot \text{V} \quad [\text{Tensão de pico mínima na entrada}]$$

$$V_{in\_max} := \sqrt{2} \cdot 220\text{V}(110\%) = 342.24 \cdot \text{V} \quad [\text{Tensão de pico máxima na entrada}]$$

$$\Delta V_{in} := 10\% \quad [\text{Oscilação da tensão de entrada retificada}]$$

$f_r := 60\text{Hz}$  [Frequência da Rede]  
 $D_{\max} := 0.4$  [Duty Cycle máximo adotado [0.2~0.6]]

## 2. CÁLCULOS DE PROJETO

### 2.1. Cálculo do capacitor de entrada:

Ondulação máxima aceitável de tensão do capacitor de entrada:

$$\Delta V_{in} = 10\% \quad \Delta V_c := \Delta V_{in} \cdot V_{in_{\min}} = 28.001 \cdot V$$

Tensão mínima no capacitor de entrada:

$$V_{c_{\min}} := V_{in_{\max}} - \frac{\Delta V_c}{2} = 328.239 \cdot V$$

$$C_{in} := \frac{2 \cdot \text{Pi}}{f_r \cdot [(V_{in_{\max}})^2 - (V_{c_{\min}})^2]} = 56.359 \cdot \mu\text{F}$$

### 2.2. Cálculo do indutor acoplado:

(kv := 0.4) [Taxa de ocupação]

(ku := 0.4) [Taxa de enrolamento]

$$J := 350 \frac{\text{A}}{\text{cm}^2} \quad [350 \sim 450] \quad [\text{Densidade de corrente}]$$

$\Delta B_{\max} := 0.3\text{T}$  [Variação máxima de densidade de fluxo magnético do núcleo]

$\Delta B := 0.2\text{T}$  [Variação de densidade de fluxo magnético do núcleo adotada]

$B := \Delta B = 0.2 \cdot \text{T}$  [Fluxo magnético do núcleo adotada]

$$(B) = 2 \times 10^3 \cdot \text{G}$$

$$I_p := \frac{2 \cdot P_o}{\eta \cdot V_{in_{\min}} \cdot D_{\max}} = 0.283 \text{ A} \quad [\text{Corrente máxima do primário}]$$

$$d := \frac{D_{\max}}{1 - D_{\max}} = 0.667 \quad [\text{Ganho estático da tensão de desmagnetização}]$$

$$V_{\text{desm}} := 0.7 V_{in_{\min}} = 196.01 \cdot V \quad [\text{Tensão desmagnetizante mínima}]$$

$$L_{p_{\max}} := \frac{V_{\text{desm}} \cdot (D_{\max})}{f_s \cdot I_p} = 2.767 \cdot \text{mH} \quad [\text{Valor máximo de indutância para que seja mantido o MCD}]$$

$$\text{Espiras: } n = \frac{N_p}{N_s}$$

$$n_k := \frac{V_{\text{desm}}}{V_{o_k}}$$

$$A_e A_w := \frac{1.1 \cdot P_o}{k_v \cdot k_u \cdot J \cdot f_s \cdot \Delta B} = 0.109 \cdot \text{cm}^4 \quad [\text{Produto das áreas}]$$

O produto das áreas corresponde com o núcleo **NEE-25/10/6** - IP12 da THORNTON



$$A_e := 6.42^2 \cdot \text{mm}^2$$

$$A_w := 5.18 \text{mm} \cdot 10.5 \cdot \text{mm} = 54.39 \cdot \text{mm}^2$$

$$A_e \cdot A_w = 0.224 \cdot \text{cm}^4$$

Área média das espiras:

$$l_{\text{espméd}} := \left( \frac{18.03 \text{mm} - 8.41 \text{mm}}{4} + \frac{8.41 \text{mm}}{2} \right) \cdot 2 \cdot \pi = 0.042 \text{m}$$

**Entreferro:**

$$\delta := \frac{2 \cdot \mu_o \cdot P_o}{\Delta B^2 \cdot A_e \cdot \eta \cdot f_s} = 0.024 \cdot \text{cm}$$

$$l_g := \frac{\delta}{2} = 0.012 \cdot \text{cm}$$

**Número de espiras:**

$$N_p := \text{ceil} \left[ \frac{B \cdot \delta}{0.4 \cdot \pi \cdot I_p} \cdot \left( \frac{A}{G \cdot \text{cm}} \right) \right] = 136$$

$$N_k := \text{ceil} \left( \frac{N_p}{n_k} \right)$$

$$N_p = 136 \quad N_1 = 7 \quad N_2 = 7 \quad N_3 = 5$$

**Diametro dos fios:**

[efeito pelicular - diâmetro mínimo]

$$\Delta := \frac{7.5}{\sqrt{f_s}}$$

[Profundidade de penetração]

$$\text{AWG}_{\text{min}} := \text{for } n \in 50..1$$

$$= 25 \quad [\text{Valor mínimo de AWG}]$$

$$n \text{ if } \Delta \geq \frac{2.54}{2 \cdot \pi} \cdot 10^{\frac{-n}{20}} \cdot \left( \frac{1}{\sqrt{\text{Hz}}} \right)$$

$$d_{\text{fiomin}} := \frac{2.54}{\pi} \cdot 10^{\frac{-\text{AWG}_{\text{min}}}{20}} \cdot \text{cm} = 0.045 \cdot \text{cm}$$

$$\text{AreaCu}_{\text{min}} := \pi \cdot \left( \frac{d_{\text{fiomin}}}{2} \right)^2 = 1.624 \times 10^{-3} \cdot \text{cm}^2$$

[Enrolamento primário]

$$I_{p_{efmax}} := I_p \cdot \sqrt{\frac{D_{max}}{3}} = 0.103 \text{ A}$$

$$AreaCuP := \frac{I_{p_{efmax}}}{J} = 2.957 \times 10^{-4} \cdot \text{cm}^2$$

$$d_{fioP} := 2 \cdot \sqrt{\frac{AreaCuP}{\pi}} = 0.019 \cdot \text{cm}$$

$$\left( AWG_p := \text{floor} \left[ (-20) \cdot \log \left[ \frac{d_{fioP} \cdot \pi}{2.54} \cdot \left( \frac{1}{\text{cm}} \right) \right] \right] \right)$$

$$AWG_k := \begin{cases} AWG_{min} & \text{if } AWG_{min} \geq AWG_p \\ AWG_p & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$d_{fioP} := \frac{2.54}{\pi} \cdot 10^{-20} \cdot \frac{AWG_p}{\text{cm}} = 0.02 \cdot \text{cm}$$

$$AreaCuP_{AWG} := \left( \frac{d_{fioP}}{2} \right)^2 \cdot \pi = 3.239 \times 10^{-4} \cdot \text{cm}^2$$

$$N_{paraleloP} := \text{ceil} \left( \frac{AreaCuP}{AreaCuP_{AWG}} \right) = 1$$

**Fios adotados:**

$$N_{paraleloP} = 1$$

$$N_{paralelo_1} = 3$$

$$N_{paralelo_2} = 1$$

$$N_{paralelo_3} = 1$$

$$AWG_p = 32$$

$$AWG_1 = 25$$

$$AWG_2 = 26$$

$$AWG_3 = 30$$

**Comprimento dos fios:**

$$l_p := N_p \cdot l_{espmed}$$

$$l_k := N_k \cdot l_{espmed} = \dots$$

$$l_p = 5.648 \text{ m}$$

$$l_1 = 29.072 \cdot \text{cm}$$

$$l_2 = 29.072 \cdot \text{cm}$$

$$l_3 = 20.766 \cdot \text{cm}$$

**Possibilidade de execução:**

$$AreaCu_{total} := N_p \cdot N_{paraleloP} \cdot \left( \frac{\frac{2.54}{\pi} \cdot 10^{-20} \cdot \frac{-AWG_p}{20} \cdot \text{cm}}{2} \right)^2 \cdot \pi \cdot 1.028^2 + \sum_k \left[ 1.028^2 \cdot N_k \cdot N_{paralelo_k} \cdot \left( \frac{\frac{2.54}{\pi} \cdot 10^{-20} \cdot \frac{-AWG_k}{20} \cdot \text{cm}}{2} \right)^2 \cdot \pi \right] = 0.095 \cdot \text{cm}^2$$

$$k_u := \frac{AreaCu_{total}}{Aw} = 17.437\%$$

Se  $k_u < 40\%$ ; **executável**  
Se  $k_u > 40\%$ ; não executável

[Enrolamento secundário]

$$I_{s_k} := \frac{2 \cdot I_{o_k}}{1 - D_{max}}$$

$$I_{s_{efmax_k}} := I_{s_k} \cdot \sqrt{\frac{1 - D_{max}}{3}}$$

$$AreaCuS_k := \frac{I_{s_{efmax_k}}}{J}$$

$$d_{fio_k} := 2 \cdot \sqrt{\frac{AreaCuS_k}{\pi}}$$

$$\left( AWG_k := \text{floor} \left[ (-20) \cdot \log \left[ \frac{d_{fio_k} \cdot \pi}{2.54} \cdot \left( \frac{1}{\text{cm}} \right) \right] \right] \right)$$

$$AWG_k := \begin{cases} AWG_{min} & \text{if } AWG_{min} \geq AWG_k \\ AWG_k & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$d_{fio_k} := \frac{2.54}{\pi} \cdot 10^{-20} \cdot \frac{AWG_k}{\text{cm}}$$

$$AreaCuS_{AWG_k} := \left( \frac{d_{fio_k}}{2} \right)^2 \cdot \pi$$

$$N_{paralelo_k} := \text{ceil} \left( \frac{AreaCuS_k}{AreaCuS_{AWG_k}} \right)$$

### 2.3 Cálculo dos capacitores de saída:

$$C_{o_k} := \frac{V_{o_k} \cdot I_{o_k}}{f_s \cdot \left[ (V_{o_k})^2 - (V_{o_k} - \Delta V_o)^2 \right]}$$

$$C_{o_1} = 90.259 \cdot \mu\text{F} \quad 100\mu\text{F}/35\text{V}$$

$$C_{o_2} = 30.086 \cdot \mu\text{F} \quad 100\mu\text{F}/35\text{V}$$
$$100\mu\text{F}/35\text{V}$$

## 3. RESUMO DE PROJETO DO FLYBACK AUXILIAR

### Indutância projetada:

$$L_{p_{\max}} = 2.767 \cdot \text{mH}$$

### Número de espiras:

$$N_p = 136$$

$$N_1 = 7$$

$$N_2 = 7$$

$$N_3 = 5$$

### Seção dos condutores:

$$\text{AWG}_p = 32$$

$$\text{AWG}_1 = 25$$

$$\text{AWG}_2 = 26$$

$$\text{AWG}_3 = 30$$

### Número de condutores em paralelo:

$$N_{\text{paralelo}_p} = 1$$

$$N_{\text{paralelo}_1} = 3$$

$$N_{\text{paralelo}_2} = 1$$

$$N_{\text{paralelo}_3} = 1$$

### Comprimento dos condutores:

$$(l_p) = 5.648 \text{ m}$$

$$(l_1) = 29.072 \cdot \text{cm}$$

$$(l_2) = 29.072 \cdot \text{cm} \quad (l_3) = 20.766 \cdot \text{cm}$$

**APÊNDICE B - CÓDIGO EM LINGUAGEM DE PROGRAMAÇÃO C PARA  
PROGRAMAÇÃO DOS MICROCONTROLADORES**

## Monitoramento da velocidade do vento: Código de programação do dsPIC 30F4011.

```
#include <p30f4011.h>
#include <stdlib.h>
#include <math.h>

_WFDT(WDT_OFF); //WATCHDOG DESABILITADO
_FOSC(CSW_FSCM_OFF & FRC); //chaveamento de clock e monitor off
//cristal externo com PLL 8X
_FBORPOR(MCLR_EN & PBOR_ON & BORV_27 & PWRT_64); //MASTER CLEAR
HABILITADO
//BROWN OUT HABILITADO
//TENSÃO DE RESET DO BROWN OUT DE 2.7V
//POWER UP TIMER HABILITADO PARA 64ms
_FGS(CODE_PROT_OFF & GWRP_OFF); //proteção de memória desligada
//proteção de escrita na memória de programa desabilitada

#define Fcy 1842500 // Fcy = Fosc/4= FRC/4 = 7,37MHz/4 = 1,8425MHz
#define Tcy 543 // 1/Fcy (nanosegundos)
#define cyc 500/Tcy

//-----DISPLAY-----
#define PRI_TMR3 1 //TIMER 3

#include "TIMER3.h"
#include "LCD_C30.h"
//-----

//-----XBEE-----
#include "XBEE.h"
//-----

//-----LEDS-----
#define LED0 LATFbits.LATF6
#define LED1 LATEbits.LATE8
#define LED2 LATCbits.LATC13
#define LED3 LATBbits.LATB8
//-----

//-----VARIÁVEIS-----
unsigned int i=0, f=0, g=0;
float frequencia=0, freq=0, media=0, media_aux=0, media_freq[80];
float vento=0;
unsigned int logic=0, aux=0;
unsigned int timer=0;
//-----

//-----INICIO DO CÓDIGO-----
int main (void)
{
    ADPCFG = 0xFFFF;

//-----DISPLAY-----
    config_tmr3(f_base,1,1); //Ajuste Timer3
    tmr3_start (1);
//-----

//-----UART-----
    TRISFbits.TRISF4=1; //RECEPÇÃO
```

```

TRISFbits.TRISF5=0; //TRANSMISSÃO

U2MODE=0b0000000000000000;

U2BRG=11;

IFS1bits.U2TXIF=0;
IFS1bits.U2RXIF=0;
IEC1bits.U2TXIE=1;
IEC1bits.U2RXIE=1;
IPC6bits.U2RXIP=5;
IPC6bits.U2TXIP=4;
U2STA=0;
U2STAbits.UTXEN=0;
U2STAbits.URXISEL=0b01;
U2MODEbits.UARTEN=1;
U2STAbits.UTXEN=1;

//-----

//INPUT CAPTURE 1
TRISDbits.TRISD0=1;           //ENTRADA DO SINAL DE FREQUENCIA NO PINO IC1
IPC0bits.IC1IP=5;             //Interrupt priority level IC1IP<2:0> = 1
IEC0bits.IC1IE=1;            //Interrupt Input Compare module enable
IFS0bits.IC1IF=0;
IC1CONbits.ICTMR=1;
IC1CONbits.ICM=1;
IC1CONbits.ICI=0;

//TIMER 2          (T=Tcy*PRE*PRX) 125Hz
PR2=28789;
T2CONbits.TCKPS=0b10;        //PRESCALE = 64
T2CONbits.TON=1;             //Clock interno
IFS0bits.T2IF=0;             //Limpa Flag
IFS0bits.T2IF=0;             //Limpa Flag
IPC1bits.T2IP=1;             //Prioridade      IPC1bits.T2IP=4;
IEC0bits.T2IE=1;            //Interrupção timer1 habilitada

CONFIG_LCD();                //Configuração padrão para o display
delay_ms(10);
LIMPA_LCD();
delay_ms(50);

posicao_lcd(1,1);
FRASE ("WIND: ");
posicao_lcd(2,1);
FRASE ("FREQ: ");
delay_ms(50);

while (1)
{
    posicao_lcd(2,15);
    ENVIA_NUMERO(i, 2, 0, 0); //Contagem de leituras utilizadas para a média.

    if (media>0)    vento= (765*media + 350)/10;    //(16750/cont)*0.765+0.35
    else            vento=0;

    posicao_lcd(1,7);
    ENVIA_NUMERO(vento, 4, 0, 2);
    FRASE (" m/s");
    ENVIA_NUMERO_XB(vento, 4, 0, 2);
}

```

```

        FRASE_XB (" m/s");

        freq=media*100;
        posicao_lcd(2,6);
        ENVIA_NUMERO(freq, 5, 0, 2);
        FRASE (" Hz");

        media=0;
        i=0;
        delay_ms(1000);
    }
}

void __attribute__((__interrupt__)) _T2Interrupt(void)
{
    IFS0bits.T2IF=0;                //Limpa Flag
    aux=1;
    frequencia=0;
    i++;
    media=(media*(i-1) + frequencia)/i;
    // LED3=~LED3;
}

void __attribute__((__interrupt__)) _IC1Interrupt(void)
{
    timer = IC1BUF;
    TMR2=0;
    IFS0bits.IC1IF=0;
    frequencia=14394.5/timer;        //freq=(PR2/IC1BUF)/2

    if (aux==1)
    {
        frequencia=0;
        aux=0;
    }

    if (media_aux<=2 && media_aux>0 && abs(media_aux-frequencia)>=10) frequencia=555;

    if (frequencia>0 && frequencia<=50)    //freq>50: descarta a última contagem
        {                                //de tempo após estouro do timer
            i++;
            media=(media*(i-1) + frequencia)/i;
        }

    media_aux=media;
}

void __attribute__((__interrupt__)) _U2TXInterrupt(void)
{
    IFS1bits.U2TXIF=0;
}

```

## Monitoramento da potência gerada: Código de programação do dsPIC 30F2020.

```
//CONFIGURAÇÃO
#include "config.h"

//BIBLIOTECAS
#include <math.h>
#include "libq.h"
#include <float.h>

//DEFINIÇÃO CONSTANTES-----
#define PWM_MODULO 31040 // Valor máximo do registrador do modulo PWM
#define PWM_OC 969 // Valor máximo do registrador do PWM output compare
//Valores usuais
#define DMAX 27936 // 90% do PWM máximo
#define DMED 15520
#define DMIN 100
//-----

//DEFINIÇÃO REGISTRADORES-----
#define LED1 LATBbits.LATB6 //Pino para teste*/
//-----

//DEFINIÇÃO VARIÁVEIS-----
//PWM
int const conv=30.3125; //Relação entre o valor máximo de PWM e de AD
//UART
int pwm=0;
unsigned char i, j;
//AD
double const c2=0.17678; //1/raiz(32)
unsigned char n=0, aux=0, cont=0;
double v_sum[40], c_sum[40], Vrms=0, Irms=0;
double v=0, c=0, sum1=0, sum2=0, v_sqr=0, c_sqr=0;
//-----

//INICIALIZAÇÃO DAS FUNÇÕES-----
unsigned char ReadChar(void);
void WriteChar(unsigned int c);
void ENVIA_NUMERO (int n, char ndig);
void EndLine(void);
//-----

//CONFIGURAÇÕES-----
void configura_uart();
void configura_pwm();
void configura_timer1();
//-----

//PRINCIPAL-----
int main(void)
{
    TRISA = 0x0000; //Configura o PORTA
    TRISB = 0x0000; //Configura o PORTB
    TRISD = 0x0000; //Configura o PORTD

    //Pinos específicos
    TRISEbits.TRISE6 = 1; //RECEPÇÃO
    TRISEbits.TRISE7 = 0; //TRANSMISSÃO
```



```
TRISBbits.TRISB0 = 1; //Tensão (AN0)
TRISBbits.TRISB1 = 1; //Corrente (AN1)
```

```
LED1 = 0;
sum1=0;
sum2=0;
```

```
configura_uart();
configura_timer1();
configura_pwm();
```

```
while (1)
{
    if (cont==60)
    {
        Vrms=(sqrt(Vrms));
        Irms=(sqrt(Irms));
        PDC1 = Vrms*conv;
        WriteChar('_');
        ENVIA_NUMERO (Vrms, 4);
        WriteChar('V');
        WriteChar('_');
        ENVIA_NUMERO (Irms, 4);
        WriteChar('A');
        cont=0;
        EndLine();
    }
}
}
```

```
//AMOSTRAGEM
```

```
void __attribute__((__interrupt__, no_auto_psv)) _T1Interrupt(void)
{
    IFS0bits.T1IF=0;
    v = ADCBUF0;
    c = ADCBUF1;
    v = v*c2;
    c = c*c2;
    v=v*v;
    c=c*c;
    n=n+1;
    v_sum[n] = v;
    c_sum[n] = c;
    if (n==32)
    {
        while (n>0)
        {
            sum1=sum1+v_sum[n];
            sum2=sum2+c_sum[n];
            n=n-1;
        }
        Vrms=sum1;
        Irms=sum2;

        sum1=0;
        sum2=0;
        n=0;

        cont=cont+1;
    }
}
```

```

    }
}

//CONFIGURAÇÕES DOS PERIFÉRICOS-----
void configura_uart()
{
    U1MODE=0x0400;
    U1STA=0x0000;
    U1BRG=125;
//Limpar flags
    IFS0bits.U1TXIF=0;
    IFS0bits.U1RXIF=0;
//Habilitar interrupções
    IEC0bits.U1TXIE=0;
    IEC0bits.U1RXIE=0;
//Habilitar Transmissão
    U1MODEbits.UARTEN=1;
    U1STAbits.UTXEN=1;
}

void configura_pwm()
{
    PTCON=0x0000;
    PTPER=PWM_MODULO;
    MDC = DMED;
//Modulo PWM1
    PWMCON1=0x0080;
    IOCON1=0xc400;
    PDC1 = DMIN;
//HHabilitar PWM
    PTCONbits.PTEN = 1;
}

void configura_timer1()
{
    //Timer 1 para o AD
    //9600, 8bit, sem paridade e 1 stop bit
    T1CONbits.TON=0;
    T1CONbits.TSIDL=0;
    T1CONbits.TCKPS=0x0;
    T1CONbits.TSYNC=0;
    T1CONbits.TCS=0;
    TMR1=0;
    PR1=10103;
//Parâmetros AD
    ADCONbits.ADSIDL = 0;
    ADCONbits.FORM      = 0;
    ADCONbits.EIE      = 0;
    ADCONbits.ORDER    = 0;
    ADCONbits.SEQSAMP = 0;
    ADCONbits.ADCS     = 0b001;

    ADPCFG = 0xFFFC;
    ADSTAT = 0;
    ADCPC0bits.TRGSRC0 = 0xC;
    ADSTAT=0;
    ADCPC0bits.IRQEN0 = 0;
//Limpar flags
    IFS0bits.T1IF=0;
}

```

```

    IFS0bits.ADIF=0;
//Habilitar interrupções
    IEC0bits.T1IE=1;
//Habilitar Amostragem
    ADCONbits.ADON = 1;          /* Operate in Idle Mode */
    T1CONbits.TON=1; //Habilitar Timer 1
}
//-----

```

```

//FUNÇÕES BÁSICAS-----

```

```

//Recepção de caractere
unsigned char ReadChar(void)

```

```

{
    while(!IFS0bits.U1RXIF);
    IFS0bits.U1RXIF = 0;
    if(U1STAbits.OERR)
    {
        U1STAbits.OERR = 0;
        return 0x00;
    }
    else
    {
        return U1RXREG;
    }
}

```

```

//Transmissão de caractere
void WriteChar(unsigned int c)

```

```

{
    while(U1STAbits.UTXBF);
    U1TXREG = c;
    while(!U1STAbits.TRMT);
}
//-----

```

```

//FUNÇÕES ESPECÍFICAS-----

```

```

void ENVIA_NUMERO (int n, char ndig)

```

```

{
//n = numero a ser escrito
//ndig = numero de digitos
    unsigned int i,r,num;

    num=(unsigned int)n;

    r = num;
    i = (unsigned int)(r / (unsigned int)(10000));
    if(ndig==5) {WriteChar(i+48);}
    r = r - (unsigned int)(i*(unsigned int)10000);
    i = r / (1000L);
    if(ndig>3) {WriteChar(i+48);}
    r = r - (unsigned int)(i*(unsigned int)1000);
    i = r / (unsigned int)100L;
    if(ndig>2) {WriteChar(i+48);}
    r = r - (unsigned int)(i*(unsigned int)100);
    i = r / 10;
    if(ndig>1) {WriteChar(i+48);}
    r = r - (i*10);
    WriteChar(r+48);
}

```

```
void EndLine(void)
{
    WriteChar(10);
    WriteChar(13);
}
//-----
```