

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

CÉSAR HUEGEL RICHÁ

**PROPOSTA DE SOLUÇÃO BASEADA EM REDES DE SENSORES
SEM FIO PARA O MONITORAMENTO REMOTO PERIÓDICO
DOS PARÂMETROS FÍSICO-QUÍMICOS DA ÁGUA AO LONGO DE
UMA BACIA HIDROGRÁFICA**

**Bagé
2016**

CÉSAR HUEGEL RICHA

**PROPOSTA DE SOLUÇÃO BASEADA EM REDES DE SENSORES
SEM FIO PARA O MONITORAMENTO REMOTO PERIÓDICO
DOS PARÂMETROS FÍSICO-QUÍMICOS DA ÁGUA AO LONGO DE
UMA BACIA HIDROGRÁFICA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Bacharelado em Engenharia de Computação como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Computação.

Orientador: Leonardo Bidese de Pinho
Co-orientador: Alexandro Gularte Schäfer

**Bagé
2016**

R499p Richa, César Huegel

Proposta de solução baseada em redes de sensores sem fio para o monitoramento remoto periódico dos parâmetros físico-químicos da água ao longo de uma bacia hidrográfica / César Huegel Richa. – dezembro, 2016.

114 f.: il.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade Federal do Pampa, Campus Bagé, Engenharia de Computação, 2016.

“Orientação: Leonardo Bidese de Pinho; Co-orientação: Alexandro Gularte Schäfer”.

1. Planejamento de Rede. 2. Redes de Sensores Sem Fio. 3. Monitoramento Remoto. 4. Sistema de Informação Geográfica. 5. Bacia Hidrográfica. I. Título.

CÉSAR HUEGEL RICHÁ

**PROPOSTA DE SOLUÇÃO BASEADA EM REDES DE SENSORES
SEM FIO PARA O MONITORAMENTO REMOTO PERIÓDICO
DOS PARÂMETROS FÍSICO-QUÍMICOS DA ÁGUA AO LONGO DE
UMA BACIA HIDROGRÁFICA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Bacharelado em Engenharia de Computação como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Computação.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em: 3 de Dezembro de 2016.

Banca examinadora:

Prof. Dr. Leonardo Bidese de Pinho
Orientador
UNIPAMPA

Prof^ª. Dr^ª. Ana Paula Lüdtke Ferreira
UNIPAMPA

Prof. Dr. Sandro da Silva Camargo
UNIPAMPA

AGRADECIMENTO

Aos meus pais Ana e Luiz e ao meu irmão Matias que, com muito amor, não mediram esforços oferecendo as condições necessárias para vencer mais esta etapa da minha vida. À minha namorada, Luana, obrigado por estar ao meu lado sempre que precisei, nos bons e nos maus momentos.

Ao Prof. Dr. Leonardo Bidese de Pinho, pela dedicação, orientação, incentivo e apoio recebido durante a realização deste trabalho. Agradeço também os sábios conselhos e sobretudo pela verdadeira contribuição no meu crescimento pessoal e profissional. Sinto-me privilegiado pela oportunidade que tive de conviver e trabalhar com esta pessoa, que tenho como referência profissional.

Ao Prof. Dr. Alexandro Gularte Schäfer, pela coorientação deste trabalho e oportunidades a mim oferecidas ao longo da graduação. Em especial, poder ter trabalhado com a equipe do Laboratório de Modelagem e Simulação Computacional (LMSC) sob sua orientação, contribuiu, significativamente, na realização deste trabalho com muitos conhecimentos adquiridos e aprimorados durante o período que lá estive.

Ao Jean Ferreira, pelo auxílio e dedicação de parte do seu tempo e conhecimento em sistemas de informação geográfica e sensoriamento remoto.

Aos professores André Gündel e Wladimir Hernandez Flores que, gentilmente, cederam equipamentos necessários para a concretização de parte deste trabalho.

Aos membros da banca examinadora pelas críticas construtivas, que contribuíram para a qualidade técnica deste trabalho.

Aos membros do Grupo HECO (High Efficiency COmputing), pela contribuição mútua entre este e outros trabalhos/projetos realizados, além da troca de experiências.

À FAPERGS e à PROPESQ/UNIPAMPA, pelo auxílio financeiro que possibilitou, por meio dos editais de Apoio aos Grupos de Pesquisa, a aquisição de equipamentos utilizados neste trabalho.

À Embrapa Pecuária Sul, ao Pedro Pereira Trindade e à equipe do Laboratório de Estudos em Agroecologia e Recursos Naturais (LABECO), pela troca de conhecimentos, que permitiu vislumbrar a contribuição deste trabalho em outros contextos, sob diferentes perspectivas.

À todos que contribuíram, de uma forma ou outra, na realização e êxito deste trabalho.

RESUMO

Os recursos hídricos têm sofrido impactos nos últimos tempos em função de diversos fatores, com destaque para o crescimento populacional e a expansão industrial. Estes impactos levam à degradação dos recursos hídricos e, como consequência, ocorre o decréscimo na saúde e na qualidade de vida dos habitantes urbanos. A gestão dos recursos hídricos, segundo a Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH), é distribuída em bacias hidrográficas e os planos diretores, instituídos por esta política, visam fundamentar e orientar sua implementação, contendo conteúdos mínimos, dentre os quais estão metas relacionadas à qualidade da água. Neste contexto, uma solução baseada em Redes de Sensores Sem Fio (RSSF), capaz de realizar o monitoramento remoto periódico dos referidos parâmetros da água em pontos de interesse, se apresenta como ferramenta de significativo potencial. Entretanto, para que a solução seja adequada, escalável e custo-efetiva, o seu planejamento deve levar em consideração as características da tecnologia e do cenário de aplicação. A partir destas premissas, este trabalho apresenta uma solução para o planejamento e implementação de uma RSSF, incorporada a um Sistema de Informação Geográfica (SIG), com foco na escolha dos elementos e do seu posicionamento, amparada por um método inovador de planejamento (*planning*) da RSSF ajustada às características do monitoramento em uma bacia hidrográfica, bem como na análise de viabilidade de adaptação de nós sensores com elementos sensores de características elétricas de acoplamento similares às necessárias para a aplicação. A avaliação experimental da solução, realizada com auxílio de ferramentas SIG, é apresentada em detalhes, incluindo resultados relevantes, tendo em vista que permitiu a identificação de pontos de instalação dos elementos de interconexão com grande potencial de operação, reduzindo os custos com *survey in loco*. Mais precisamente, a metodologia de avaliação adotada produziu resultados relevantes, em especial no que se refere à otimização da solução final, com a minimização do número de elementos da rede e da quantidade de estruturas em termos de quantidade e elevação das antenas. Por fim, apresenta-se a integração dos componentes da solução e os resultados sobre a integração de um sensor resistivo a um nó sensor comercial, utilizado como prova de conceito para avaliação da viabilidade e dificuldade de acoplamento de um elemento sensor genérico ao nó sensor fabricado pela Digi.

Palavras-chave: Planejamento de Rede. Redes de Sensores Sem Fio. Monitoramento Remoto. Sistema de Informação Geográfica. Bacia Hidrográfica.

ABSTRACT

Water resources have been impacted in recent times due to several factors, especially by population growth and industrial expansion. These impacts lead to the degradation of water resources and, consequently, there is a decrease in health and quality of life of urban citizens. According to the National Water Resources Policy (NWRP), management of water resources is distributed in watersheds based on Water Resources Plans. Such plans aim to support and guide NWRP's implementation, containing a minimal content that includes goals related to water quality. Taken the information on the water quality as essential for the correct diagnosis and efficient management of water resources, an effective monitoring of physical-chemical parameters of water along a river basin is fundamental. In this context, systems based on Wireless Sensor Networks (WSN) appears as a potential solution to perform remote periodic monitoring of these water parameters at points of interest. However, for the solution to be suitable, scalable and cost-effective, its planning should take into account application singularities and also the characteristics of the scenario. From these premises, this work presents a solution both for the planning and implementation of a WSN focusing on the choice of elements and their positioning. The solution presented consists of an innovative planning method of a WSN adjusted to monitor the characteristics of a river basin, as well as the sensor nodes issues regarding to the adaptation process needed for the coupling of sensing elements with some special electrical characteristics. The preliminary experimental evaluation of the solution, conducted using GIS software, is presented in details, including relevant results as it was able to identify installation points for the interconnection elements with a great potential of successful operation, which will be able to significantly reduce the costs of *in loco* surveys. More precisely, the evaluation methodology produced relevant results, particularly regarding to the optimization of the final solution, which was able to minimize the amount of network elements and the structures in terms of quantity and elevation of the antennas. Finally, it was possible to present results on the integration of a resistive analog sensor to the commercial sensor node, chosen as a proof of concept to evaluate the feasibility and coupling difficulty of a generic sensor element to the sensor node manufactured by Digi.

Keywords: Network Planning. Wireless Sensor Networks. Remote Sensing. Remote Monitoring. Geographic Information System. Hydrographic Basin.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Esquema da classificação de Horton modificada por Strahler.....	22
Figura 2	Classificação dos cursos d'água da bacia hidrográfica do Rio Negro - RS	23
Figura 3	Perfil topográfico: característica comum às bacias hidrográficas.....	24
Figura 4	Perfil topográfico de um trecho sinuoso	26
Figura 5	Arroio Bagé com trechos na área urbana do município	27
Figura 6	Sensor analógico: relação entre a resistência e a umidade do solo	30
Figura 7	Sensor analógico: relação entre a tensão e o valor pH	31
Figura 8	Exemplo de curva característica de um sensor digital	31
Figura 9	Aplicações de redes de sensores sem fio	32
Figura 10	Arquitetura simplificada de um nó sensor	34
Figura 11	Diagrama da arquitetura de pilha de protocolo ZigBee.....	37
Figura 12	Topologias de rede ZigBee	39
Figura 13	Comunicação PtP em uma rede ZigBee	40
Figura 14	Esquema de comunicação PtP	41
Figura 15	Zona de Fresnel	41
Figura 16	Potência do sinal em uma comunicação PtP	46
Figura 17	Comunicação local e comunicação remota	48
Figura 18	Estrutura do UART <i>Data Frame</i>	49
Figura 19	Estrutura do quadro <i>Frame Data</i> do UART <i>Data Frame</i>	50
Figura 20	Diagrama conceitual do método de planejamento.....	57
Figura 21	Mapa de visibilidade.....	59
Figura 22	Processo de reclassificação	60
Figura 23	Álgebra de mapas: mapa de visibilidade completo	60
Figura 24	Transformação matricial/vetorial do mapa de visibilidade completo.....	61
Figura 25	Extração das áreas com potencial	61
Figura 26	Pontos de maior relevância.....	62
Figura 27	Reposicionamento dos pontos de monitoramento	63
Figura 28	Mapas de visibilidade com alvo em diferentes elevações	64
Figura 29	Reclassificação de viewshed com os valores de altura	64
Figura 30	Cálculo do mapa de elevações mínimas	65

Figura 31	Visão geral do sistema de monitoramento	66
Figura 32	Esquema lógico do banco de dados modelado	67
Figura 33	Função para qualificar dados amostrados	70
Figura 34	Interface inicial	71
Figura 35	Gráfico de temperatura	71
Figura 36	Sistema de notificação	72
Figura 37	Definição de qualificadores	72
Figura 38	Nó sorvedouro	73
Figura 39	Pontos de monitoramento	76
Figura 40	Mapa de visibilidade gerado	78
Figura 41	Mapa de visibilidade reclassificado	78
Figura 42	Consulta aos valores dos mapas em um determinado ponto	79
Figura 43	Mapa de visibilidade completo com elevação de 10 metros	80
Figura 44	Mapa vetorial de visibilidade e áreas extraídas	81
Figura 45	Pontos de maior relevância	82
Figura 46	Mapa de visibilidade pontos “1234” e “2345”	83
Figura 47	Áreas de visada ao longo do curso d’água	84
Figura 48	Reposicionamento do ponto de monitoramento 5	85
Figura 49	Mapa de elevações mínimas com observador “1234” a 10 metros de altura..	86
Figura 50	Mapa de <i>path loss</i> obtido com <i>r.cost231</i>	88
Figura 51	Sensor de umidade Watermark modelo 200SS	89
Figura 52	XBee Sensor ZB L/T/H (XS-Z16-CB2R)	89
Figura 53	Diagrama elétrico de acoplamento do sensor ao XBee S2	90
Figura 54	XStick USB adapter	91
Figura 55	Leitura da tensão de água em centibars	92
Figura 56	Diagrama elétrico de acoplamento do sensor ao XBee Sensor	93
Figura 57	Adaptação do XBee Sensor ZB L/T/H (XS-Z16-CB2R)	94
Figura 58	Amostragem de tensão de água no solo	94
Figura 59	Amostragem de temperatura do solo e do ambiente	95
Figura 60	Ambiente de avaliação	96
Figura 61	Potência dissipada em um ciclo de atividade	96
Figura 62	Potência dissipada no início da fase ativa	97

Figura 63 Comparativo da potência média dissipada.....	98
Figura 64 Potência no melhor caso avaliado.....	99

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Alguns tipos de <i>frames</i> do modo API.....	51
Tabela 2	Estrutura de um <i>frame</i> API: <i>AT Command</i>	51
Tabela 3	Estrutura de um <i>frame</i> API: <i>AT Command Response</i>	52
Tabela 4	Estrutura de um <i>frame</i> API: <i>Remote AT Command Request</i>	53
Tabela 5	Estrutura de um <i>frame</i> API: <i>Remote AT Command Response</i>	54
Tabela 6	<i>Triggers</i> da solução de armazenamento.....	69
Tabela 7	Localização geográfica dos pontos de monitoramento.....	77
Tabela 8	Regras para reclassificação dos mapas de visibilidade.....	79
Tabela 9	Regra para recodificação dos mapas de visibilidade	86
Tabela 10	Dados de altura mínima das antenas	87
Tabela 11	Configurações avaliadas	98

LISTA DE ABREVIATURAS

μA	Microampere
$^{\circ}\text{C}$	Grau Celsius
cbar	Centibar
Conf	Configuração
dB	Decibel
dB _i	Decibel isotrópico
dB _m	Decibel milliwatt
div	Divisão
GHz	Gigahertz
k Ω	Quiloohm
kbps	Quilobit por segundo
km ²	Quilômetro quadrado
km	Quilômetro
kPa	Quilopascal
mA	Miliampere
MHz	Megahertz
ms	Milissegundo
mV	Milivolt
mW	Miliwatt
pH	Potencial hidrogeniônico
s	Segundo
V	Volt

LISTA DE SIGLAS

ACK	<i>Acknowledgment</i>
ADC	<i>Analog Digital Converter</i>
API	<i>Application Programming Interface</i>
APL	<i>Application Layer</i>
APP	Área de Preservação Permanente
APS	<i>Application Sub Layer</i>
ASCII	<i>American Standard Code for Information Interchange</i>
AT	<i>Transparent</i>
BHRN-RS	Bacia Hidrográfica do Rio Negro - RS
DARPA	<i>Defense Advanced Research Projects Agency</i>
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio
DSN	<i>Distributed Sensor Networks</i>
FFD	<i>Full Function Device</i>
FOSS	<i>Free and Open Source Softwares</i>
I/O	<i>Input/Output</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
LED	<i>Light Emitting Diode</i>
LOS	<i>Line of Sight</i>
LR-WPAN	<i>Low-Rate Wireless Personal Area Networks</i>
LSB	<i>Least Significant Byte</i>
MAC	<i>Medium Access Control</i>
MDE	Modelo Digital de Elevação
MIT	<i>Massachusetts Institute of Technology</i>
MSB	<i>Most Significant Byte</i>
nLOS	<i>Near Line of Sight</i>
NLOS	<i>Non Line of Sight</i>
NWK	<i>Network Layer</i>
OTA	<i>Over The Air</i>

PAN ID	<i>Personal Area Network IDentification</i>
PHY	<i>Physical</i>
PL/pgSQL	<i>Procedural Language/PostgreSQL</i>
PNRH	Política Nacional de Recursos Hídricos
PRH	Plano de Recurso Hídrico
PtP	<i>Point-to-point</i>
RFD	<i>Reduced Function Device</i>
RSSF	Rede de Sensores Sem Fio
RX	<i>Receiver</i>
S/N	<i>Signal-to-noise</i>
SensIT	<i>Sensor Information Technology</i>
SERH-RS	Sistema Estadual de Recursos Hídricos do Rio Grande do Sul
SGBD	Sistema de Gerenciamento de Banco de Dados
SIG	Sistema de Informação Geográfica
SOAP	<i>Simple Object Access Protocol</i>
SR	Sensoriamento Remoto
SRTM	<i>Shuttle Radar Topography Mission</i>
TCC	Trabalho de Conclusão de Curso
TX	<i>Transmitter</i>
UART	<i>Universal Asynchronous Receiver/Transmitter</i>
UNIPAMPA	Universidade Federal do Pampa
WPAN	<i>Wireless Personal Area Network</i>
WSN	<i>Wireless Sensor Network</i>
ZC	<i>ZigBee Coordinator</i>
ZDO	<i>ZigBee Device Objects</i>
ZED	<i>ZigBee End Device</i>
DC	<i>Direct Current</i>
DSNW	<i>Distributed Sensor Nets Workshop</i>
OD	Oxigênio Dissolvido
ZR	<i>ZigBee Router</i>

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
1.1 Motivação.....	18
1.2 Objetivos	19
1.3 Metodologia	19
1.4 Estrutura do Trabalho.....	20
2 REFERENCIAL TEÓRICO	22
2.1 Monitoramento da qualidade da água em bacias hidrográficas.....	22
2.2 Redes de sensores sem fio	29
2.2.1 Aplicações.....	30
2.2.2 Características e fatores diferenciais.....	32
2.2.3 Elementos da RSSF	33
2.2.4 Arquitetura do nó sensor.....	34
2.3 XBee Series 2	47
2.3.1 <i>Application Programming Interface</i> (API)	49
2.4 Sensoriamento remoto	55
3 SOLUÇÃO PROPOSTA	57
3.1 O método de planejamento	57
3.1.1 Definição dos pontos de monitoramento.....	58
3.1.2 Áreas com potencial para instalação de elementos da rede	58
3.1.3 Otimização da solução	62
3.2 Integração dos componentes da solução	65
3.2.1 Solução de gerenciamento e monitoramento	67
3.2.2 Nó sorvedouro.....	73
3.2.3 Configurações OTA.....	74
4 AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL	75
4.1 Definição dos pontos de monitoramento	76
4.2 Áreas com potencial para instalação de elementos da rede	77
4.3 Otimização da solução	83
4.3.1 Alternativas para o problema de LOS	83
4.3.2 Elevação mínima das antenas	85
4.4 Análise de <i>Path Loss</i> e Cálculo do <i>Link Budget</i>	88

4.5 Acoplamento de elementos sensores.....	89
4.6 Avaliação do subsistema de energia.....	95
5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	100
REFERÊNCIAS.....	102
APÊNDICE A — DOCUMENTO DE DESCRIÇÃO DA SOLUÇÃO	106

1 INTRODUÇÃO

O crescimento populacional e a expansão industrial, acentuados e desordenados dos últimos tempos, vêm impactando de forma intensa e negativa os recursos hídricos. Em virtude disto, ocorrem problemas de escassez deste recurso em determinadas regiões que, conforme ressaltam Schafer et al. (2015), não é apenas quantitativa, mas também qualitativa. Quantitativa na medida em que o deficit hídrico, quando o volume de precipitação é menor que o volume total de evaporação e transpiração no ciclo hidrológico, gera conflitos entre os múltiplos usos da água tais como: abastecimento público; pesca e agricultura; geração de energia; transporte de dejetos; processos industriais; e navegação. Qualitativa pois deve satisfazer os diferentes níveis de qualidade das águas exigidos por estes usos. A água destinada ao abastecimento público, por exemplo, deve apresentar níveis de qualidade superiores aos exigidos pela indústria e pelo setor de navegação. De acordo com o que afirma Barbosa (2003), mesmo que haja superavit hídrico, situação oposta ao deficit hídrico, é preciso que a qualidade seja adequada a cada um dos múltiplos usos da água.

Segundo Silva (2010), são muitos os impactos, mas destaca-se o impacto na saúde e na qualidade de vida dos habitantes, que se apresenta com maior intensidade em regiões urbanas com deficit hídrico. Nestas regiões, o decréscimo na qualidade da água dos cursos d'água é percebido, principalmente, pelo seu aspecto visual e pelo odor, decorrente, sobretudo, do aumento da concentração de poluentes. Por outro lado, o próprio aumento da frequência com que ocorrem enchentes, em determinadas regiões, pode indicar que o processo de assoreamento de um curso d'água está sendo intensificado pelas atividades desenvolvidas pelo homem. Isto afeta a saúde e a qualidade de vida dos habitantes urbanos e a sociedade como um todo, despertando a preocupação dos órgãos gestores.

A gestão dos recursos hídricos, segundo a divisão do território brasileiro adotada pela Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH), instituída com a promulgação da Lei Federal 9.433/1997, é distribuída em bacias hidrográficas (BRASIL, 1997). Constatam dentre os instrumentos trazidos por esta política os Planos de Recursos Hídricos (PRHs), que são planos diretores que visam fundamentar e orientar a implementação da PNRH e o gerenciamento destes recursos. Os PRHs deverão conter conteúdos mínimos, dentre os quais estão metas relacionadas à qualidade da água. De acordo com Barbosa (2003), essa política caracteriza a gestão como descentralizada (com a bacia hidrográfica como unidade de planejamento e gestão, por meio dos comitês de bacias hidrográficas) e

participativa (com participação do governo e da comunidade).

Entre as diretrizes para que os objetivos apresentados pela PNRH sejam alcançados, estão a adequação da gestão dos recursos hídricos às características locais e a sua integração à gestão ambiental, de uso e ocupação do solo. A imposição de parte do controle da ocupação do solo ao poder municipal, devido ao crescimento urbano, apesar do uso e ocupação do solo serem regidos por políticas federais e estaduais, juntamente com necessidade de adequação às características locais, aproxima a gestão dos recursos hídricos do planejamento urbano. Em outras palavras, integrar a gestão dos recursos hídricos à política de uso e ocupação do solo, como determina a Lei Federal 9.433/97, promove a necessidade da sua integração ao planejamento urbano (SILVA, 2010).

Em seu relatório técnico, a Agência Nacional de Águas (ANA, 2013) considera a informação sobre a qualidade da água essencial para o diagnóstico correto e gestão eficiente dos recursos hídricos no país. Destaca, ainda, que os órgãos de recursos hídricos descentralizados são as principais fontes de informação sobre a qualidade das águas. Estes dados são utilizados na elaboração de estudos e na definição de políticas públicas. Por outro lado, ressalta a existência de desigualdades na densidade de estações de monitoramento em operação por região hidrográfica no Brasil. Estas desigualdades, por vezes, dificultam a elaboração de planos e políticas públicas que minimizem os impactos das áreas urbanas nos recursos hídricos, na medida em que não se tem um real entendimento a respeito dos efeitos das atividades humanas sobre determinados corpos d'água.

Nestes casos, um monitoramento mais detalhado acaba sendo realizado por instituições como o departamento de água e esgoto com sua equipe e/ou em conjunto com instituições de ensino superior inseridas na região, como no caso do trabalho de (SCHAFER et al., 2015). Convencionalmente, este monitoramento é feito por meio da coleta frequente de amostras de água nos pontos de interesse. Esta coleta ocorre manualmente, o que requer o deslocamento até os pontos que, em geral, são distantes entre si. Além do tempo de deslocamento, que impossibilita a coleta simultânea em todos os pontos, existe a dificuldade de acesso a alguns. Estes fatores dificultam a obtenção de uma taxa de amostragem em conformidade com a necessidade da aplicação e, por conseguinte, um monitoramento efetivo.

Neste contexto, uma solução baseada em Redes de Sensores Sem Fio (RSSF) para o monitoramento remoto periódico dos parâmetros físico-químicos da água em pontos de interesse constitui uma ferramenta bastante promissora. Esta ferramenta,

atrelada a um sistema de armazenamento de dados integrado a um Sistema de Informação Geográfica (SIG), permite o cruzamento dos dados espaciais e temporais de qualidade da água com informações de uso e ocupação do solo. O sistema resultante da integração destas soluções, em conjunto com um volume de dados e uma taxa de amostragem maior, possibilita que os usuários finais (profissionais envolvidos na gestão hídrica e territorial) façam a extração de informações de maior relevância, aplicando sobre estes dados técnicas de tratamento estatístico e de mineração de dados, o que os auxiliará no entendimento dos efeitos das atividades humanas e de fenômenos naturais sobre um determinado corpo d'água, dando suporte à tomada de decisões no que tange à gestão dos recursos hídricos integrada ao planejamento urbano.

Entretanto, para que a solução seja adequada, permitindo que a RSSF implementada seja escalável¹ e custo-efetiva², a metodologia de planejamento para sua implantação em bacias hidrográficas deve levar em consideração: a quantidade e o posicionamento dos elementos da RSSF; a cobertura de sinal, baseando-se na Linha de Visada, do termo em inglês *Line of Sight* (LOS), e na intensidade do sinal.

Assim, este trabalho, como parte do processo de desenvolvimento de uma solução inovadora para o monitoramento remoto de bacias hidrográficas baseado em RSSF, parte de um estudo das soluções existentes para elementos da RSSF e propõe um método de planejamento, no contexto de uma bacia hidrográfica, utilizando ferramentas e conceitos de SIG e Sensoriamento Remoto (SR) a partir da análise do Modelo Digital de Elevação (MDE). Por fim, apresenta a integração dos dos diferentes componentes da solução e uma avaliação experimental desta solução.

1.1 Motivação

A tecnologia de RSSF possui grande potencial de aplicabilidade nas mais diversas áreas. A sua capacidade de monitoramento remoto, vinculada à sua flexibilidade de instalação, configuração e manutenção, a torna uma potencial solução para monitoramento hídrico de uma bacia hidrográfica. Contudo, é necessário um estudo técnico e um planejamento da RSSF, baseado na contextualização do problema, considerando ainda, uma análise topográfica da região de interesse.

A realização deste trabalho, contribui com o avanço do estado-da-técnica com

¹Solução expansível conforme o aumento na demanda.

²Solução efetiva e de menor custo possível.

um novo método de planejamento para sistemas de monitoramento remoto baseados em RSSF aplicados à bacias hidrográficas, tendo como estudo de caso a sua aplicação na região hidrográfica onde está inserida a Universidade Federal do Pampa (UNIPAMPA), o qual poderá servir de ferramenta de apoio à tomada de decisões no gerenciamento dos recursos hídricos e planejamento urbano.

1.2 Objetivos

O objetivo geral deste trabalho consiste em propor uma solução escalável e custo-efetiva, baseada em RSSF, para o monitoramento remoto periódico dos parâmetros físico-químicos da água, possibilitando uma melhora na gestão dos recursos hídricos à medida que este permitirá um entendimento mais preciso sobre os efeitos das atividades humanas e de fenômenos naturais sobre estes parâmetros.

Objetivos Específicos

- Investigar o histórico referente às técnicas de monitoramento de corpos d'água e suas dificuldades;
- Propor um método inovador de planejamento de RSSF aplicada ao monitoramento de bacias hidrográficas;
- Avaliar a dificuldade de acoplamento de um sensor resistivo ao nó sensor comercial fabricado pela Digi;
- Avaliar o consumo de energia do nó sensor comercial fabricado pela Digi;
- Disponibilizar um sistema funcional capaz de armazenar os dados coletados;
- Discutir os resultados parciais e finais obtidos ao longo da execução do trabalho;
- Apontar sugestões para trabalhos futuros.

1.3 Metodologia

A partir da definição do escopo do trabalho e dos seus objetivos, foi definida a seguinte metodologia de execução, baseada no modelo PDCA (*Plan, Do, Check, and Action*): Planejamento - visa identificar ações e recursos necessários para atingir os

objetivos, com metas; Execução - compreende a execução do plano de ações proposto; Verificação - caracteriza-se pela observação dos resultados obtidos na execução, se estão sendo atingidos conforme planejado; Ação - consiste em agir de forma a corrigir os problemas identificados na fase de verificação (PACHECO et al., 2012).

A fase de planejamento está subdividida em etapas, conforme segue: pesquisa histórica; contextualização do problema; planejamento da execução; e planejamento da verificação. Já a fase de execução está dividida em: planejamento da RSSF; estudo de caso com *Watermark Soil Moisture Sensor*; estudo das alternativas para alimentação dos elementos da RSSF; implementação de um sistema de armazenamento; e integração deste sistema de armazenamento à uma plataforma SIG. Na fase de verificação, serão validados os resultados obtidos e ações serão disparadas para solução de falhas e otimização da solução proposta. Por fim, são discutidos e analisados os resultados obtidos ao longo de todo o desenvolvimento do trabalho. Assim, descreve-se a seguir, de forma detalhada, todas as etapas envolvidas no desenvolvimento deste trabalho.

Inicialmente é realizada uma pesquisa bibliográfica, que visa estudar o histórico da problemática do monitoramento dos parâmetros físico-químicos da água. Este estudo serve de base para a contextualização do problema, onde são identificados parâmetros relevantes a serem monitorados ao longo de um curso d'água, avaliando ainda características do cenário de estudo que impactam na solução a ser proposta. Em paralelo é definida a metodologia de execução e de verificação, embasadas por uma pesquisa exploratória por meio da investigação das técnicas de planejamento de uma RSSF. A definição da metodologia de execução consiste em determinar, a partir das diferentes abordagens, qual melhor se ajusta ao estudo proposto. Já a definição da metodologia de verificação resume-se em estabelecer experimentos preliminares específicos para validação das partes que compõem a solução proposta. Com isso, aplica-se a metodologia de execução e submete-se os resultados à etapa de verificação. Por fim, é proposto e avaliado um sistema integrado especializado para o monitoramento remoto de bacias hidrográficas. A última etapa consiste em discutir os resultados obtidos ao longo de todo o trabalho e identificar trabalhos futuros.

1.4 Estrutura do Trabalho

O presente trabalho está organizado em cinco capítulos, conforme descrito a seguir. O capítulo 2 consiste em um referencial teórico acerca dos conhecimentos

fundamentais para o entendimento deste trabalho. Mais especificamente, são abordados: conceitos de monitoramento da qualidade da água em bacias hidrográficas, explorando as características do cenário que impactam na solução final; Redes de Sensores Sem Fio, explorando os principais conceitos, características, fatores diferenciais, elementos e a arquitetura do nó sensor; sensoriamento remoto, onde são apresentadas ferramentas e operações de SIG e sensoriamento remoto como apoio ao processo de planejamento da solução proposta. Na sequência, o capítulo 3 detalha a solução de monitoramento remoto proposta, apresentando as diferentes etapas de um método inovador de planejamento de rede que busca dispensar a necessidade de *survey in loco*, acompanhado da descrição do processo de adaptação e preparação de um nó sensor, com o acoplamento de um elemento de sensor com características elétricas similares às da aplicação, além da descrição da interface *web* de gerenciamento e monitoramento, bem como a sua integração com o nó sorvedouro. Posteriormente, o capítulo 4 apresenta a avaliação experimental da solução proposta, incluindo o uso de uma ferramenta SIG que possui funcionalidades compatíveis com as necessidades do método. Além disso, apresenta-se a avaliação da dificuldade do processo de acoplamento de um elemento sensor à um nó comercial e a análise do consumo de energia. Por fim, o capítulo 5 apresenta as principais conclusões, discorrendo sobre os resultados obtidos ao longo do desenvolvimento deste trabalho, e aponta sugestões para trabalhos futuros.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

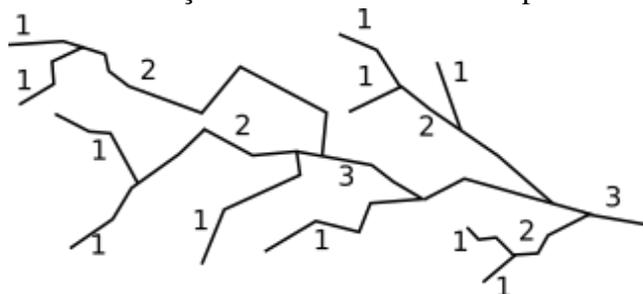
Neste capítulo realiza-se uma explanação quanto aos conceitos envolvidos no monitoramento remoto da qualidade da água em bacias hidrográficas, bem como sobre as características do cenário que exercem influência na solução a ser proposta. Também discorre-se sobre as tecnologias empregadas na concepção de uma RSSF para a finalidade a que se propõe, desafios e possíveis soluções. Dá-se grande ênfase à comunicação, por ser o principal subsistema a ser tratado neste trabalho, bem como ao subsistema de sensoriamento, o qual precisa ser compatível com as necessidades da aplicação, e ao subsistema de energia, no que se refere ao consumo energético dos nós, que impacta as alternativas de fornecimento de energia. Por fim, descreve-se técnicas de sensoriamento remoto como apoio ao planejamento da solução proposta.

2.1 Monitoramento da qualidade da água em bacias hidrográficas

Bacias hidrográficas são porções de terra separadas entre si por divisores de águas. Estas porções de terra são drenadas por rios e seus afluentes e as águas que escoam das áreas mais altas para as mais baixas, através destes, drenam para um único ponto de saída: um rio maior, lago ou oceano. Teodoro et al. (2007) apresentam outros conceitos de bacia hidrográfica encontrados na literatura.

Um melhor entendimento sobre o conceito de bacia hidrográfica é possível por meio de dois aspectos: a rede hidrográfica e o relevo. A rede hidrográfica é, basicamente, um conjunto de cursos d'água organizados em uma determinada hierarquia, onde os rios de primeira ordem correspondem às nascentes, e o de maior ordem vem a ser o rio principal, para onde converge todo o escoamento superficial gerado no interior da bacia hidrográfica (SOUZA, 2010).

Figura 1 – Esquema da classificação de Horton modificada por Strahler



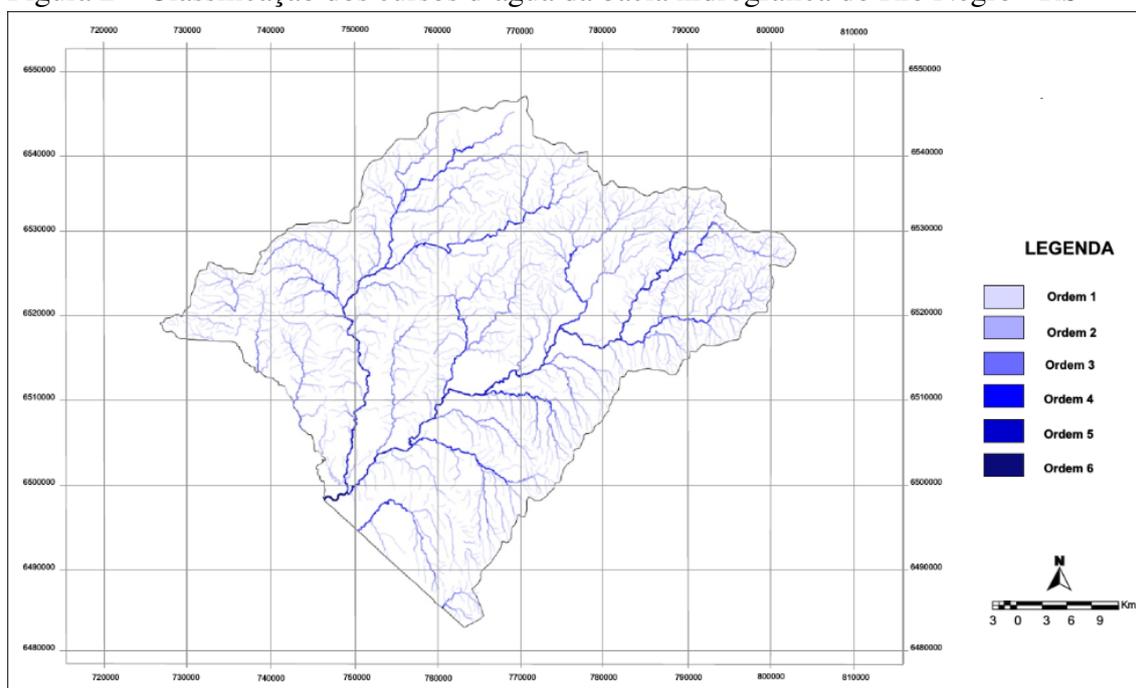
Fonte: adaptado de Strahler (1957)

A figura 1 apresenta um esquemático da classificação proposta por Horton (1945) e modificada por Strahler (1957). Nela todos os afluentes que não se ramificam são considerados de primeira ordem. Os demais trechos de cursos d'água são classificados como sendo de ordem subsequente a ordem de pelo menos dois afluentes de maior ordem (RICHA; SCHAFER, 2013). A classificação dos cursos d'água quanto a sua ordem reflete o grau de ramificação dentro de uma bacia hidrográfica.

A análise da ordem máxima de uma bacia hidrográfica exprime, de certa forma, sua extensão e a quantidade de rios e afluentes que possui. Souza (2010) classifica em microbacias as que possuem os rios principais com no máximo 3ª ordem, enquanto em bacias hidrográficas maiores, como a do Rio Tietê, podem haver rios que chegam até a 10ª ordem.

A bacia hidrográfica do Rio Negro, por exemplo, contém rio principal de 6ª ordem e uma extensão territorial de aproximadamente 2.998.809,21 km². Apresenta-se na figura 2 a hierarquia fluvial desta bacia hidrográfica.

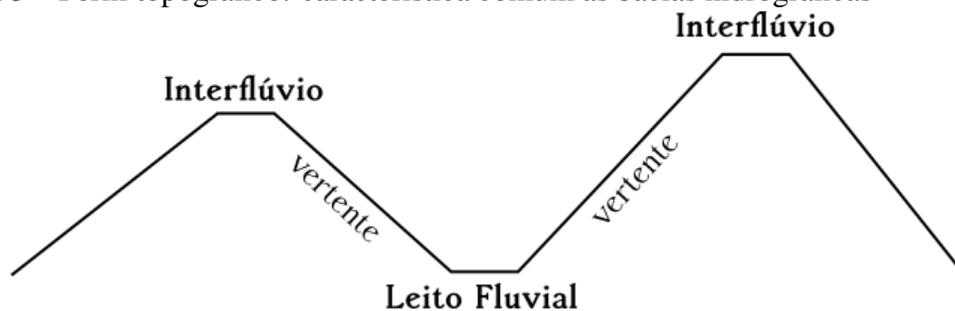
Figura 2 – Classificação dos cursos d'água da bacia hidrográfica do Rio Negro - RS



Fonte: Richa e Schafer (2013)

Souza (2010) explica que, de modo geral, a caracterização de uma bacia hidrográfica é melhor realizada por meio da análise do seu perfil topográfico. A figura 3 expõe um perfil topográfico representativo de bacias hidrográficas.

Figura 3 – Perfil topográfico: característica comum às bacias hidrográficas



Fonte: adaptado de Souza (2010)

Interflúvios são regiões mais elevadas de uma bacia hidrográfica, denominados divisores topográficos ou divisores de água. Já as vertentes são as superfícies com inclinação suficiente para haver escoamento superficial de água e estabelecem a conexão dinâmica entre os topos dos interflúvios e o leito fluvial. O leito fluvial é o canal de escoamento de um curso d'água e onde deve ocorrer o monitoramento da qualidade da água (SOUZA, 2010).

Características geométricas e hidrográficas como a extensão territorial de uma bacia hidrográfica, extensão de seus corpos d'água, seu comprimento axial e a ordem máxima de seus afluentes indicam, de certa forma, a dimensão do cenário a ser monitorado e possíveis dificuldades relacionadas à quantidade e distribuição dos elementos sensores, assim como ao estabelecimento de enlaces (*links*) de longa distância, de dezenas, centenas ou milhares de quilômetros. Teodoro et al. (2007) citam outras características geométricas, topográficas e da rede de drenagem, dentre as quais algumas que impõem desafios à implementação de uma RSSF para monitoramento em bacias hidrográficas.

Um desafio está relacionado à obtenção de visada direta (discutida na subseção 2.2.4) entre os elementos da rede. Este desafio está relacionado ao perfil topográfico e à variação de altitude na direção longitudinal e latitudinal da bacia hidrográfica. Além da localização dos elementos da RSSF, que naturalmente estarão em pontos de altitude mais baixa (leito fluvial) em relação aos interflúvios, grandes variações de altitude e a própria amplitude altimétrica são questões que podem afetar o estabelecimento da visada direta. Outras características importantes nesta análise dos desafios são a densidade hidrográfica, a densidade de drenagem e o índice de sinuosidade.

A densidade hidrográfica é a relação existente entre a quantidade de cursos d'água e a área de drenagem da bacia hidrográfica expressa pela equação 1. A densidade hidrográfica pode servir de métrica para comparar a frequência ou a quantidade de cursos d'água existentes por área (km^2). Complementarmente, a densidade de drenagem,

definida pela equação 2, permite correlacionar o comprimento total dos cursos d'água com a área de drenagem (CHRISTOFOLETTI, 1969 apud TEODORO et al., 2007).

$$D_h = \frac{N}{A} \quad (1)$$

onde D_h é a densidade hidrográfica, N é o número de cursos d'água no interior da bacia hidrográfica e A é a sua área de drenagem, e

$$D_d = \frac{L}{A} \quad (2)$$

onde D_d é a densidade de drenagem, L é o somatório do comprimento de todos os cursos d'água no interior da bacia hidrográfica e A é a sua área de drenagem.

A quantidade de elementos sensores em uma RSSF para monitoramento remoto da qualidade da água em bacias hidrográficas está diretamente relacionada a duas classes de fatores: a quantidade de sensores, que depende da quantidade de cursos d'água a serem monitorados e dos critérios utilizados para definição dos pontos monitoramento; e à densidade de elementos sensores, cuja quantidade está relacionada com a densidade hidrográfica e com a densidade de drenagem.

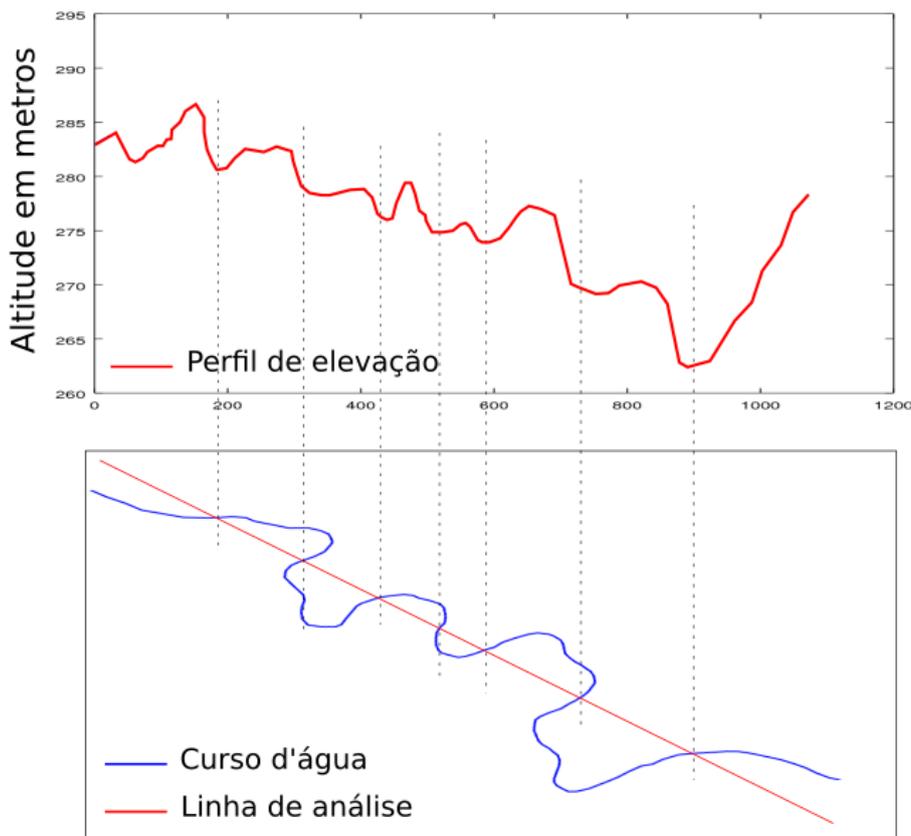
Outro fator relevante a ser considerado é o índice de sinuosidade, descrito pela equação 3, o qual remete à existência de curvas ao longo de um curso d'água. Segundo Alves e Castro (2003 apud TEODORO et al., 2007), este índice é a relação entre o comprimento do curso d'água e a distância, em linha reta, entre seus extremos.

$$L_s = \frac{L}{D} \quad (3)$$

onde L_s é o índice de sinuosidade, L é o comprimento do curso d'água e D é a distância, em linha reta, entre seus extremos.

O índice de sinuosidade de um curso d'água, mais especificamente em um trecho onde existe a necessidade de monitoramento de vários pontos não distantes entre si, pode antecipar o problema da obtenção de visada direta entre todos estes pontos e um possível elemento central ou até mesmo entre si. Esta análise é possível quando realizada em conjunto com o perfil de elevação ao longo dos segmentos de reta que representam as linhas de visada entre os elementos de interesse.

Figura 4 – Perfil topográfico de um trecho sinuoso



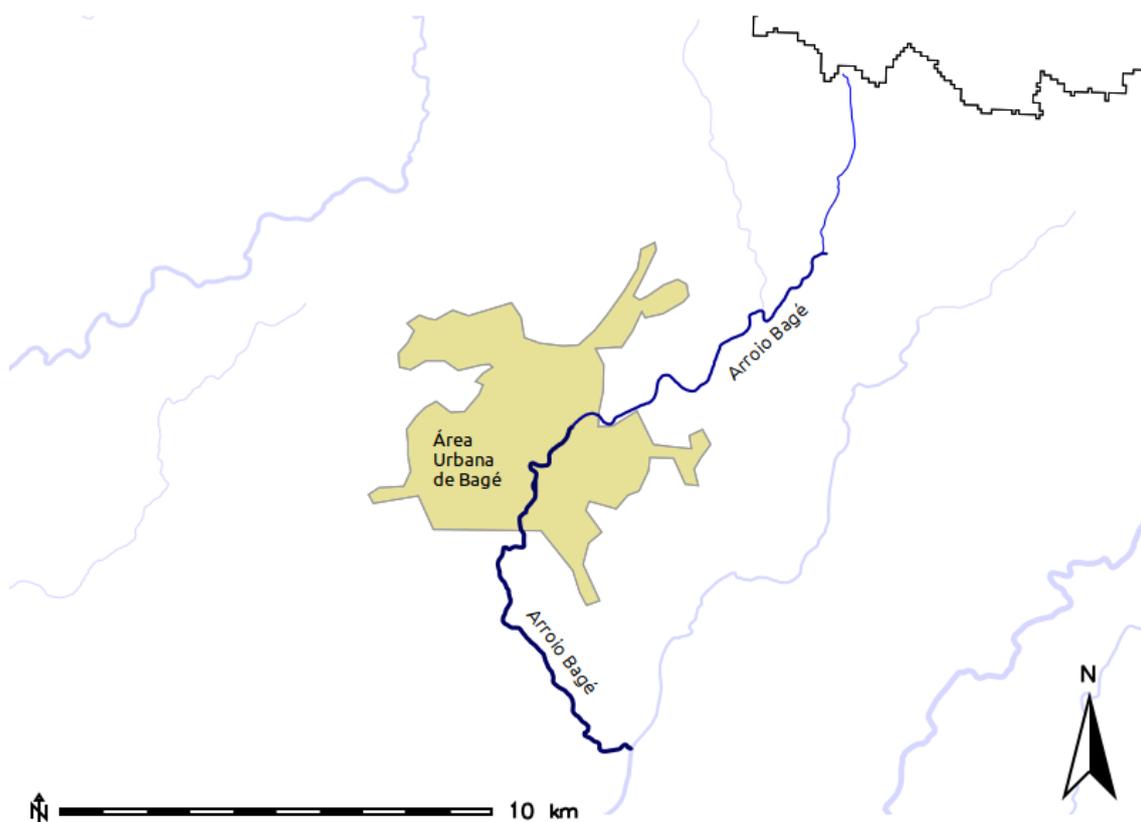
Fonte: Próprio autor (2016)

A figura 4 ilustra um exemplo de cenário no qual o índice de sinuosidade e a variação de altitude são relevantes. Neste caso, existe maior probabilidade de surgirem dificuldades relacionadas à visada direta. Em termos práticos, um alto índice de sinuosidade aponta a presença de muitas curvas no curso d'água, o que indica a existência de vários trechos de leito fluvial paralelos com escoamento em direções opostas e intercaladas. Estes trechos de leito fluvial estão separados geograficamente pelos divisores de água (interflúvios) que, devido à significativa variação de altitude, possuem seus topos muito acima do leito fluvial. Como consequência, a visada direta entre os pontos e um possível elemento concentrador, ou até mesmo entre si, tende a estar obstruída pelos interflúvios.

Um outro fator a ser considerado é o desenvolvimento das áreas urbanas ao longo dos cursos d'água. Os principais cursos d'água de uma bacia hidrográfica muitas vezes possuem trechos em área urbana. Por exemplo, uma das principais bacias hidrográficas do Rio Grande do Sul é a Bacia do Rio Negro, a qual tem formato de losango com eixo sul-norte menor de aproximadamente 70 km e eixo maior oeste-leste de aproximadamente

90 km. O sentido de fluxo de água é para o sul em direção à fronteira com o Uruguai, tendo como principal curso d'água o Rio Negro, sendo o seu principal afluente de despejo urbano o Arroio Bagé que passa pela cidade de mesmo nome (MPRS, 2008). Mais precisamente, este arroio possui trechos na área urbana da cidade, como ilustra a figura 5, tratando-se de um curso d'água que possui trechos de ordens 1, 2, 3 e 4, com extensão total de aproximadamente 24,63 km.

Figura 5 – Arroio Bagé com trechos na área urbana do município



Fonte: Próprio autor (2016)

Os pontos de monitoramento da qualidade da água em uma bacia hidrográfica são comumente definidos de acordo com características da localização que a tornam potencialmente importante. Assim, o estudo do monitoramento da qualidade da água nestes diferentes pontos tenderá a identificar que estes estarão eventualmente em altitudes diferentes, espaçados em distâncias de dezenas ou centenas de quilômetros e em meio aos diferentes usos do solo.

No monitoramento da qualidade da água alguns parâmetros são considerados importantes para avaliação, os quais devem ser definidos pelos interessados no monitoramento. Dentre os possíveis parâmetros físico-químicos indicadores de qualidade

da água existentes, Costa (2013) apresentou os mais utilizados, conforme segue:

- condutividade elétrica;
- temperatura;
- turbidez;
- sólidos dissolvidos;
- potencial hidrogeniônico (pH);
- oxigênio dissolvido (OD);
- demanda bioquímica de oxigênio (DBO).

Atualmente já existem soluções comerciais baseadas em RSSF para monitoramento remoto de diferentes parâmetros das mais diversas naturezas. Identifica-se, neste contexto, soluções mais complexas e flexíveis e outras mais simples porém limitadas. Estas soluções, de modo geral, consistem em elementos de *hardware* específico para o sensoriamento e processamento dos dados, que se comunicam por meio de um módulo de comunicação. A tecnologia de comunicação mais comum em RSSF é a ZigBee, utilizada como referência neste trabalho. Apresenta-se, a seguir, algumas soluções comerciais baseadas em RSSF.

Desenvolvido e comercializado pela Libelium Comunicaciones Distribuidas S.L., o *Smart Water* é um produto (nó sensor) da linha encapsulada, intitulada “*Plug & Sense!*”. Este produto encapsulado é destinado ao monitoramento da qualidade da água em rios, lagos, piscinas, no mar, entre outros, sendo capaz de medir vários parâmetros, dentre os quais estão os listados anteriormente.

Outra solução é a desenvolvida pela Digi International. Os nós sensores pertencentes a família de *kits* XBee Sensor implementam o protocolo ZigBee, são alimentados por um conjunto de baterias, compostos por um módulo de comunicação XBee e componentes de um circuito eletrônico responsável pelo sensoriamento dos fenômenos monitorados (CARVALHO, 2015).

Um deles, o XBee Sensor ZB L/T/H (XS-Z16-CB2R), permite o monitoramento da luminosidade, temperatura e umidade. No sentido de realizar o monitoramento de outras variáveis, incluindo parâmetros da água, pode-se explorar a adaptação (acoplamento) de outros tipos de elementos sensores a este nó sensor que possui entradas e saídas analógicas e digitais.

Nós sensores, como o XBee Sensor ZB L/T/H, cujo processamento está concentrado no módulo de comunicação, estão limitados a sensorear um número de

parâmetros determinado pelas suas configurações. O módulo XBee Series 2, por exemplo, possui onze pinos que podem ser configurados como entradas ou saídas digitais, sendo que quatro destes podem ser configurados como entradas analógicas (CARVALHO, 2015).

2.2 Redes de sensores sem fio

Uma rede de sensores sem fio (RSSF), ou em inglês *wireless sensor network* (WSN), como definem Potdar et al. (2009), consiste em um conjunto de estações base e eventualmente dezenas ou milhares de nós sensores distribuídos em um determinado espaço físico. Em RSSF, os espaços físicos nos quais estas são empregadas são usualmente divididos em *indoor* e *outdoor*, ou seja, casos nos quais os nós sensores operam na parte interna de uma construção ou em ambientes externos, significativamente amplos, descobertos e livres de efeitos de confinamento. Estas redes são comumente utilizadas com o objetivo de monitorar eventos ou fenômenos das mais diversas áreas.

Complementarmente, uma RSSF pode ser definida como uma infraestrutura composta por elementos de medição, de computação e de comunicação que, integrados, dão ao seu administrador a capacidade de monitorar os fenômenos que ocorrem em um ambiente específico. Esta rede pode ser vista como uma composição de quatro componentes básicos: um conjunto de nós sensores distribuídos; uma conexão de rede (normalmente baseada em tecnologia sem fio); um elemento concentrador; e um sistema computacional capaz de lidar com os dados (SOHRABY et al., 2007).

A RSSF é uma tecnologia emergente e tem impulsionado pesquisas no mundo todo, principalmente nas últimas décadas. Assim como a maioria das tecnologias, as RSSF surgiram com propósitos militares. Em 1978, a *Defense Advanced Research Projects Agency* (DARPA) organizou o *Distributed Sensor Nets Workshop* (DSNW), com foco em tecnologias de rede, técnicas de processamento de sinal e algoritmos distribuídos. Posteriormente, no início dos anos 80, a DARPA também gerenciou o programa *Distributed Sensor Networks* (DSN), que foi seguido pelo programa *Sensor Information Technology* (SensIT), dando início às pesquisas modernas nesta área (DARGIE; POELLABAUER, 2010).

Desde então, segundo Dargie e Poellabauer (2010), eclodiram esforços movidos, principalmente, por instituições acadêmicas, acentuando a curva crescente de uso das tecnologias de RSSF. Nas últimas décadas esforços comerciais também surgiram e atualmente empresas como National Instruments Corporation, MEMSIC Inc., Libelium

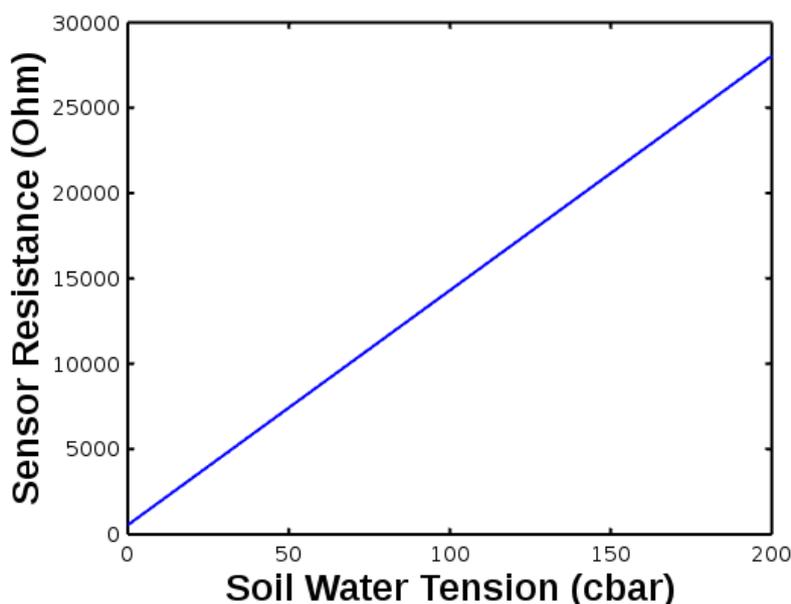
Comunicaciones Distribuidas S.L. e Digi International , entre outras, atuam neste ramo. Estas fornecem soluções de *hardware* e *software* prontas para a implantação de RSSF com foco em diversas aplicações.

2.2.1 Aplicações

O monitoramento é realizado por meio de unidades de detecção (elementos sensores) que correspondem às variáveis monitoradas. Silva (2006) cita exemplos de fenômenos físicos que podem ser monitorados por meio de diferentes tipos de elementos sensores, tais como: temperatura; umidade; movimento de pessoas ou objetos; intensidade luminosa; pressão; composição de certos tipos de objetos; velocidade e direção de objetos.

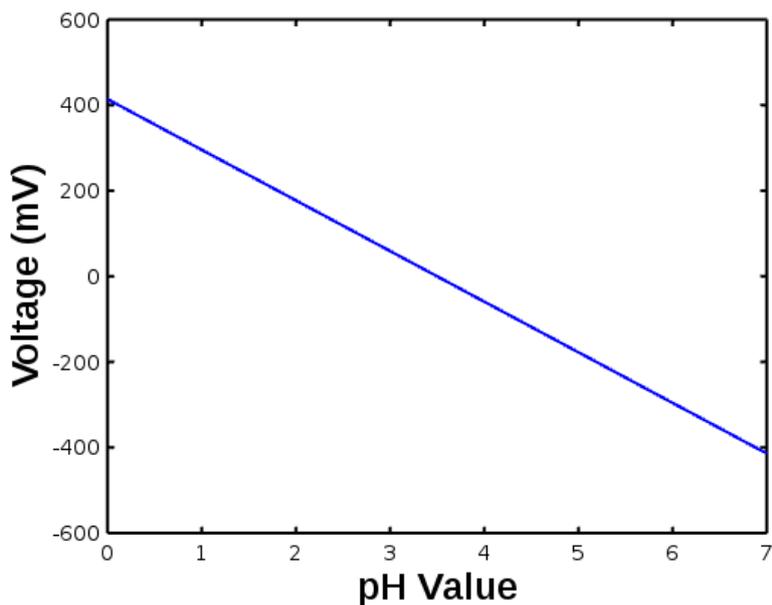
Segundo Wendling (2010), os sensores são dispositivos sensíveis a alguma forma de energia do ambiente e podem ser classificados em analógicos ou digitais. Os sensores analógicos podem assumir valores reais, ao longo do tempo, dentro da sua faixa de operação, que corresponde à variação da grandeza física sensoreada. O *Watermark Sensor* e o *Industrial pH Electrode* são exemplos de elementos sensores analógicos e suas respectivas curvas características estão ilustradas nas figuras 6 e 7.

Figura 6 – Sensor analógico: relação entre a resistência e a umidade do solo



Fonte: Próprio autor (2016)

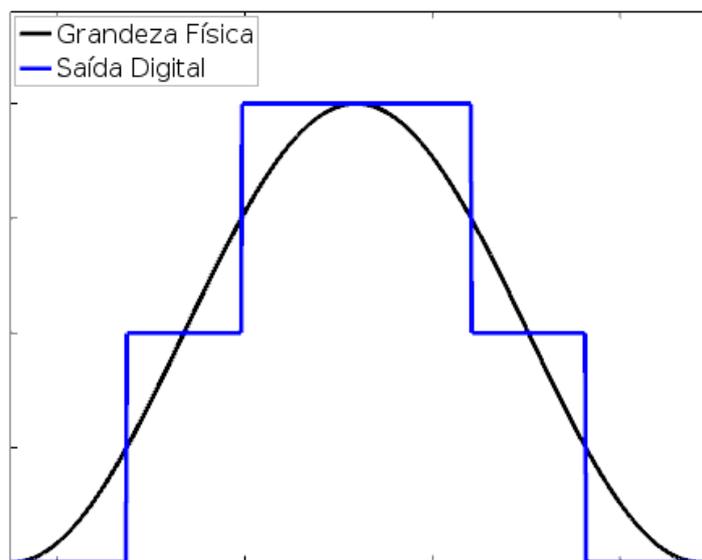
Figura 7 – Sensor analógico: relação entre a tensão e o valor pH



Fonte: Próprio autor (2016)

Já os sensores digitais (ou binários), podem assumir apenas dois valores de saída, que geralmente são interpretadas como valores lógicos “0” ou “1” (saída *on/off*). Estes sensores são utilizados comumente para detecção de eventos como a passagem de objeto ou alcance do nível máximo de caixa d’água (WENDLING, 2010). A figura 8 apresenta um exemplo de saída de um sensor digital.

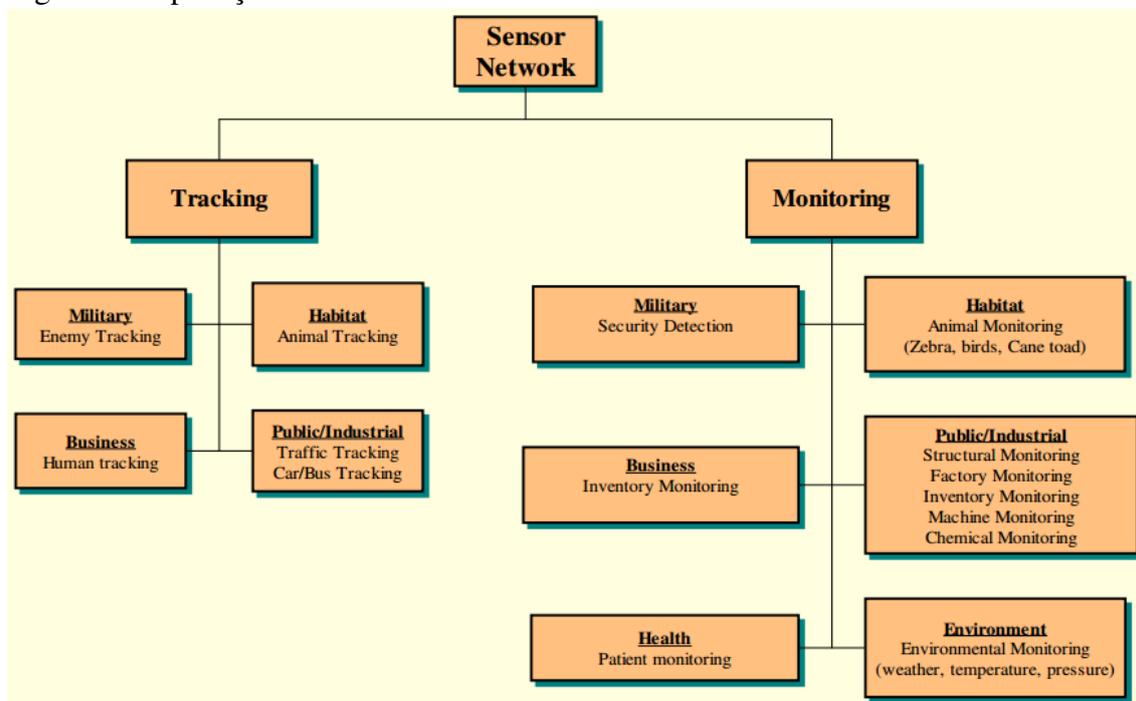
Figura 8 – Exemplo de curva característica de um sensor digital



Fonte: Próprio autor (2016)

A existência de diversos tipos de sensores permite a aplicação de RSSF em variadas áreas. Observando o infográfico apresentado na figura 9, pode-se identificar exemplos de diferentes aplicações potenciais.

Figura 9 – Aplicações de redes de sensores sem fio



Fonte: Yick et al. (2008 apud DOMINGUES, 2012)

Em particular, dentre as aplicações potenciais, nota-se o monitoramento de parâmetros da água. Estas e outras aplicações estão apresentadas e detalhadas em Silva (2006), Sohraby et al. (2007), Dargie e Poellabauer (2010), Karl e Willig (2007).

2.2.2 Características e fatores diferenciais

As diversas aplicações das RSSF apresentam diferentes exigências e abrangem características como: (i) o baixo consumo de energia, buscando longo tempo de vida operacional para os elementos da rede, normalmente alimentados por bateria; (ii) a otimização da conectividade, levando a eficiência energética dos módulos de rádio por meio do estabelecimento de enlaces de menor distância; capacidade de recuperação de falhas e erros, permitindo o funcionamento contínuo da rede; agregação eficiente de dados, minimizando o tráfego de dados na rede; a segurança do sistema, protegendo dados e comandos disseminados pela rede; curto tempo de desenvolvimento; facilidade de instalação e manutenção para maior aceitação (PAPADOPOULOS, 2015).

No contexto do monitoramento da água em uma bacia hidrográfica, considerando os desafios identificados na seção 2.1, os fatores limitantes de maior relevância e impacto estão relacionados à energia restrita, à comunicação e ao custo da solução. Sendo foco principal deste trabalho a minimização do custo da solução por meio de um novo método de planejamento da RSSF para o cenário de aplicação, baseado em ferramentas SIG, tendo como estudo de caso a bacia hidrográfica do Rio Negro.

2.2.3 Elementos da RSSF

Uma RSSF é composta, minimamente, por nós sensores e um nó sorvedouro (*sink*) mas também pode conter nós roteadores. Apresenta-se a seguir cada um destes, conforme descrições encontradas na literatura.

Um nó sensor, também chamado de dispositivo final (*end device*), é o dispositivo que implementa efetivamente o sensoriamento da variável monitorada a partir da utilização de sensores. Após os sinais dos sensores serem discretizados em um conversor analógico-digital, do termo em inglês *Analog Digital Converter* (ADC), as medições são disseminadas pela rede e, normalmente através de múltiplos saltos, encaminhados a um nó sorvedouro. Quanto ao seu posicionamento, no tempo, os nós podem ser fixos ou móveis (BURATTI et al., 2009 apud DOMINGUES, 2012).

De forma simplificada, os nós sensores são formados por quatro subsistemas: (i) um subsistema de sensoriamento (*sensing*), composto pelos sensores e por conversores analógico-digital; (ii) um subsistema de processamento (*processing*), composto por uma memória e um processador de sinais; (iii) um subsistema de comunicação (*communication*), composto por um transceptor e uma antena; e (iv) um subsistema de energia (*power*) (DARGIE; POELLABAUER, 2010). Segundo Ginatto (2008), seu tamanho pode variar de acordo com sua complexidade, capacidade de energia, processamento e transmissão.

O nó sorvedouro, segundo Buratti et al. (2009 apud DOMINGUES, 2012), também é denotado por outros termos, como: concentrador, controlador, coordenador ou monitor. Ele é o dispositivo que concentra as informações de todos os nós sensores adjacentes a ele e, usualmente, encaminha estes dados para serem armazenados em um Sistema de Gerenciamento de Banco de Dados (SGBD) remoto.

O nó roteador, ou nó de encaminhamento, possui as mesmas características de um nó sensor porém, adicionalmente, funciona como elemento intermediário entre nós. Por

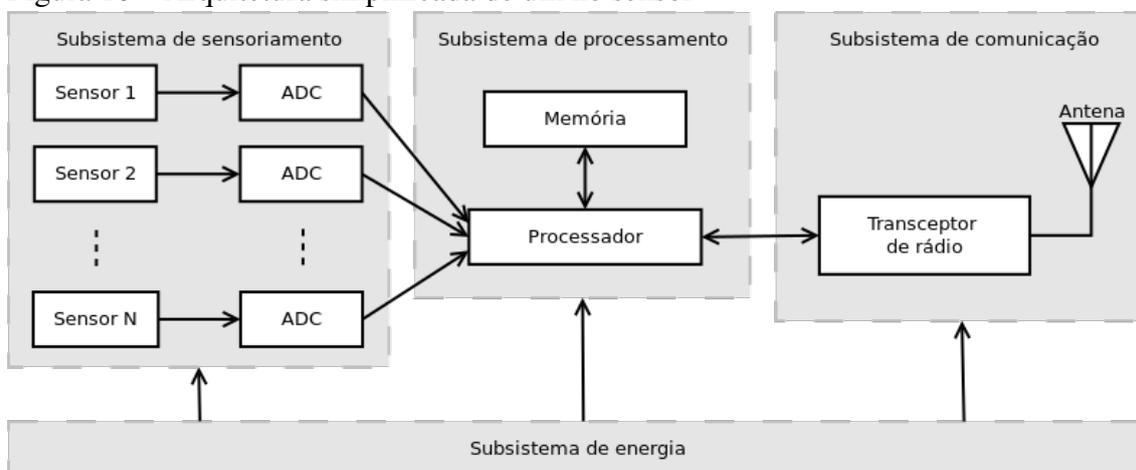
meio deste dispositivo é possível a expansão da rede. Segundo Soares (2012), para suprir as necessidades de escalabilidade da rede, os roteadores, assim como os nós sensores, podem ser utilizados em grande quantidade.

2.2.4 Arquitetura do nó sensor

O projeto de um nó sensor é um passo crítico, devido à qualidade dos dados extraídos a partir dele ser fortemente influenciada pelos recursos físicos disponíveis. Além disso, existe uma gama de opções para construção e montagem dos subsistemas de um nó sensor programável (DARGIE; POELLABAUER, 2010). Apresenta-se a seguir algumas decisões de projeto e seus efeitos.

Conforme Dargie e Poellabauer (2010), no subsistema de sensoriamento, a escolha de um ADC determina a resolução dos dados de sensoriamento. Já no subsistema de processamento de um nó, a escolha do processador determina o compromisso entre flexibilidade e eficiência, tanto em termos de energia quanto desempenho. E no subsistema de comunicação, a definição do regime de funcionamento do transceptor é determinante no consumo do nó, já que é o que possui maior demanda por energia. A frequência de manutenção do sensor é muitas vezes determinada pelo projeto do subsistema de energia, que é comumente composto apenas por bateria e, eventualmente, conforme a necessidade da aplicação, complementado por outro elemento associado a uma fonte de energia renovável.

Figura 10 – Arquitetura simplificada de um nó sensor



Fonte: adaptado de Dargie e Poellabauer (2010)

A figura 10 apresenta, em alto nível, a arquitetura de um nó sensor organizada nos diferentes subsistemas que o compõem. Os elementos apresentados estão descritos a seguir.

O sensor é o elemento sensível do sistema, ele responde aos estímulos físico-químicos do ambiente em forma de sinal elétrico. De acordo com Dargie e Poellabauer (2010), de uma perspectiva técnica, um sensor converte parâmetros ou eventos no mundo físico em sinais que podem ser medidos e analisados. Entretanto, os sinais elétricos nem sempre estão adequados para processamento imediato, assim, faz-se necessário um condicionamento do sinal, onde uma variedade de operações podem ser aplicadas como ampliações, atenuações e filtrações. Após o condicionamento, o sinal é discretizado por um ADC.

O subsistema de processamento é composto, minimamente, por um processador e uma memória. Seu principal objetivo é realizar o processamento referente à detecção e comunicação de forma a preparar e organizar os dados para efetiva disseminação pela rede (DARGIE; POELLABAUER, 2010).

Em virtude da impossibilidade de fornecer energia através de redes elétricas de distribuição, seja pela indisponibilidade desta em áreas remotas ou mesmo pelo fator móvel do sensor, as baterias são alternativas viáveis para o fornecimento de energia ao sistema. Sendo a energia um fator crítico, todos os componentes devem operar de modo a equilibrar o *trade-off* entre o consumo mínimo de energia e a necessidade de cumprir suas tarefas de forma satisfatória (KARL; WILLIG, 2007).

Dada a quantidade finita de carga das baterias, existe a necessidade de troca destas ou reposição da energia consumida. Uma das alternativas para reposição da energia consumida é a utilização de células solares como meio para recarga da bateria.

Por fim, o subsistema de comunicação é responsável pela transmissão e recepção de dados na rede. Nele, o transceptor converte uma sequência de *bits* (ou *frames*) em ondas de rádio, e vice versa. Estas ondas eletromagnéticas são recebidas ou propagadas por meio de uma antena (KARL; WILLIG, 2007).

Com base no exposto, o subsistema de sensoriamento tem seus requisitos relacionados à qualidade dos dados amostrados, determinada de acordo com a aplicação. Já o subsistema de processamento tem seus requisitos definidos com base na necessidade de pré-processamento e/ou de armazenamento dos dados, também dimensionada de forma genérica conforme a aplicação.

Diferentemente destes, o subsistema de energia possui restrições extremas e é projetado mantendo uma aplicação em mente, ou seja, está diretamente relacionado com as características específicas do cenário e da aplicação propriamente dita (POTDAR et al., 2009). O mesmo também ocorre com o subsistema de comunicação, que tem seu projeto fortemente atrelado ao posicionamento dos elementos. Posicionamento cuja distribuição, no contexto da bacia hidrográfica, depende da definição dos critérios de escolha dos pontos de interesse e de uma análise topográfica da região.

Assim, faz-se necessário um planejamento detalhado e eficiente destes dois últimos subsistemas, levando em consideração as características específicas da aplicação. A importância dos demais subsistemas é reconhecida, porém resume-se a uma questão de escolha de configurações que melhor se ajustam à aplicação.

Detalhamento do subsistema de energia

Como dito anteriormente, energia é um recurso bastante limitado em aplicações de RSSF. Segundo Casilari et al. (2010), o consumo de energia é um aspecto chave no desempenho das RSSF. De modo geral, o fornecimento de energia aos elementos da rede é feito por meio de baterias, que podem ser recarregáveis. Se não forem eficientes e houver a necessidade de manutenção frequente dos elementos da rede, além do impacto no custo operacional da solução, esta se torna menos escalável, já que a demanda por assistência humana aumenta com o número de elementos da rede. Ademais, o tempo de vida operacional da rede acaba sendo limitado pela capacidade de fornecimento de energia ao referido subsistema (DELICATO, 2005).

O subsistema de energia é responsável por controlar e fornecer a quantidade correta de energia para os demais subsistemas supracitados. Devido a sua importância na arquitetura do nó sensor, diversas técnicas baseadas na exploração de eficiência energética foram introduzidas com o objetivo de prolongar a vida da rede e de seus elementos (NIKOLIC et al., 2014). Dargie (2012) e Roundy et al. (2004) tratam especificamente deste tema.

De acordo com Nikolic et al. (2014), as baterias são caracterizadas por várias desvantagens, incluindo: necessidade de substituição ou recarga periódica; e grande tamanho e peso quando comparadas com a eletrônica do elemento sensor. Soluções baseadas na captação de energia do ambiente têm sido empregadas para vencer estas desvantagens, dentre as quais estão: captação de energia solar por meio de painéis fotovoltaicos; gerador micro-termoelétrico, baseado na transformação de gradientes de

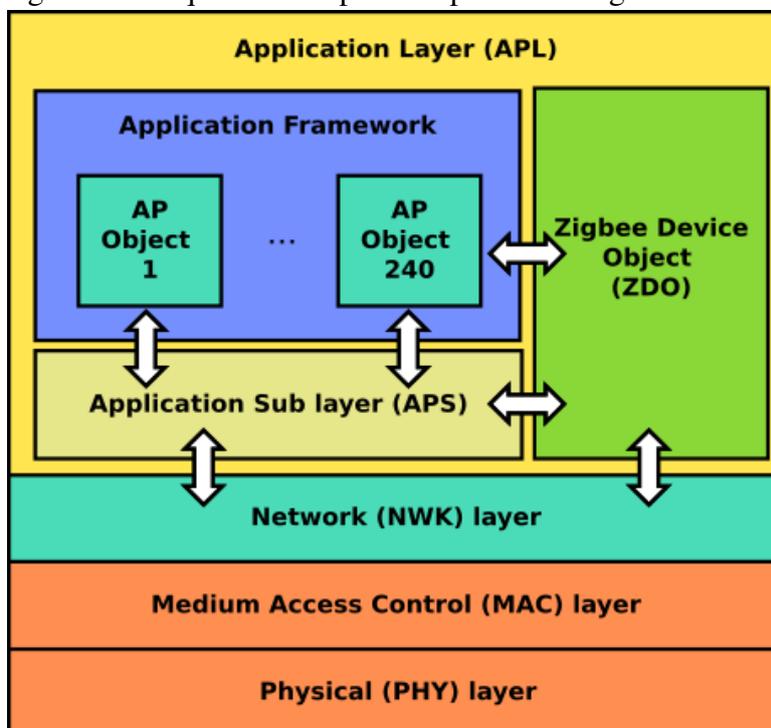
temperatura em eletricidade; e energia eólica, por meio de aerogeradores, dentre outras (ROUNDY et al., 2004).

Detalhamento do subsistema de comunicação

O módulo de comunicação pode ser uma implementação de diversos padrões de comunicação sem fio, normalmente de curta distância (usualmente de dezenas a centenas de metros), que incluem Bluetooth, Wi-Fi, ZigBee, entre outras (CHENGBO et al., 2009). Diferentemente da maioria dos padrões de comunicação, o ZigBee foi desenvolvido para atender às necessidades comuns à maioria das aplicações de RSSF, como: baixo custo; baixo consumo de energia; e a utilização de baixas taxas de transferência de dados.

O padrão IEEE 802.15.4, no qual baseia-se o ZigBee, define as camadas *Physical* (PHY) e *Medium Access Control* (MAC), para redes sem fio de baixa taxa de transmissão, em inglês *Low-Rate Wireless Personal Area Networks* (LR-WPAN). As camadas superiores da pilha de protocolos, acima do IEEE 802.15.4, *Network Layer* (NWK) e *Application Layer* (APL), são implementadas pelo padrão ZigBee.

Figura 11 – Diagrama da arquitetura de pilha de protocolo ZigBee



Fonte: adaptado de Baronti et al. (2007 apud CARVALHO, 2015)

Ativação e desativação do transceptor (*transceiver*), seleção de canal, estimativas de qualidade do enlace (*link*), detecção de energia dentro do canal atual e avaliação de

canais disponíveis são algumas das funcionalidades suportadas pela camada PHY. Esta camada atua em três faixas de frequência: 868 MHz, com 1 canal de 20 kbps; 915 MHz, com 10 canais de 40 kbps; e 2450 MHz, com 16 canais de 250 kbps (CARVALHO, 2015).

O controle de acesso a um canal compartilhado e a garantia de uma entrega de dados confiável são responsabilidades da camada MAC. A otimização do uso do meio de comunicação sem fio é extremamente importante nas WPAN, pois operam em bandas compartilhadas por várias outras tecnologias (NENOKI, 2013).

A NWK é a camada responsável pela organização e pela prestação de serviço de roteamento na comunicação de múltiplos saltos (*multihop*). Uma característica importante da camada NWK é a de permitir o crescimento espacial da rede, ou seja, a ampliação da área geográfica coberta pela rede, sem a necessidade de transceptores de alta potência, além de comportar grande quantidade de nós mantendo uma baixa latência (ZigBee Alliance, 2012). Segundo Nenoki (2013), o aumento do alcance de comunicação por meio da inserção de nós roteadores dispensa a necessidade de grandes infraestruturas de antenas e de alta potência de transmissão.

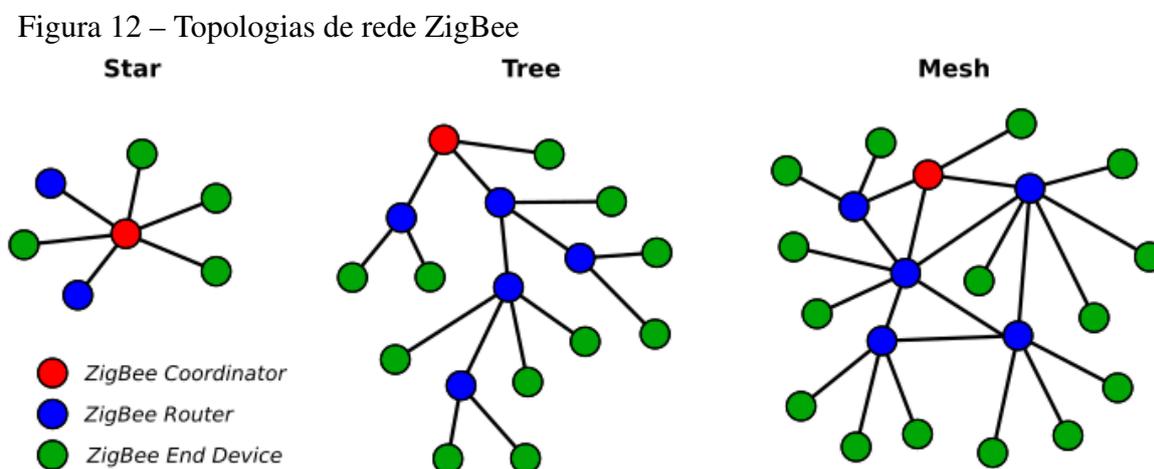
Já a camada APL é composta pela subcamada *Application Sub Layer* (APS), pelo *ZigBee Device Objects* (ZDO) e pelo *Application Framework*, que consiste nos objetos de aplicação definidos pelo fabricante. A APS oferece uma interface entre a camada NWK e a camada APL, por meio de um conjunto de serviços que são utilizados por ZDO e pelo *Application Framework* (ZigBee Alliance, 2012).

Existem dois tipos de dispositivos, definidos pela camada MAC: *Full Function Device* (FFD), são os dispositivos da rede com funções completas da camada MAC, podendo exercer função lógica de coordenador (*coordinator*), roteador (*router*) ou dispositivo final (*end device*); e *Reduced Function Device* (RFD), dispositivos de funções reduzidas que exercem apenas função lógica de *end device* (ZigBee Alliance, 2012). Carvalho (2015) discorre sobre a quantidade destes dispositivos em uma rede, relacionando-a com suas funções lógicas: um ou mais dispositivos RFD (ou FFD) correspondendo a *end devices*; um ou mais dispositivos FFD com capacidades de roteamento da rede (*router*); e um *coordinator* único da rede, sendo um FFD, gerenciando toda a rede.

Segundo Kinney et al. (2003 apud NENOKI, 2013), a classificação dos nós é dada em função da disponibilidade de funções do dispositivo (FFD ou RFD) e o seu posicionamento na topologia da rede. Nenoki (2013) descreve a classificação dos nós conforme segue:

- **Coordenador (*Coordinator*):** é o nó coordenador da rede. Este é o dispositivo que inicia a rede selecionando um identificador da rede, em inglês *Personal Area Network IDentification* (PAN ID), único no seu raio de alcance. O coordenador se mantém em estado ativo constante e é geralmente alimentado por fonte de energia contínua;
- **Roteador (*Router*):** são usados para a expansão da rede, em topologias de malha (*mesh*) e *cluster*, explorando os *multihops*. Estes nós possuem tabelas de roteamento e por meio de requisições de rota (*route request*) em *broadcast* são capazes de atualizá-las com as rotas mais eficazes. É este mecanismo que permite a autorregeneração da rede em caso de falha de outros nós roteadores;
- **Dispositivo Final (*End device*):** estão localizados nas extremidades da rede. Este nós não realizam funções de roteamento nem de coordenação da rede e por isso se comunicam unicamente com um roteador adjacente ou com o coordenador da rede, exceto na ocorrência de uma falha do enlace adjacente onde a regeneração da rede o conectará a outro nó roteador ou coordenador. Usualmente estes nós implementam funções de *sleep*, reduzindo o consumo de energia quando inativo. É nestes nós que ocorre o acoplamento de sensores e atuadores.

A camada NWK do padrão ZigBee suporta as topologias de rede estrela (*star*) e par-a-par (*peer-to-peer*), definidas pelo padrão IEEE 802.15.4. Além destas, o padrão ZigBee suporta topologias mais complexas como árvore (*tree*) e malha (*mesh*). A figura 12 ilustra exemplos de formação destas topologias, detalhadas na sequência conforme ZigBee Alliance (2012).

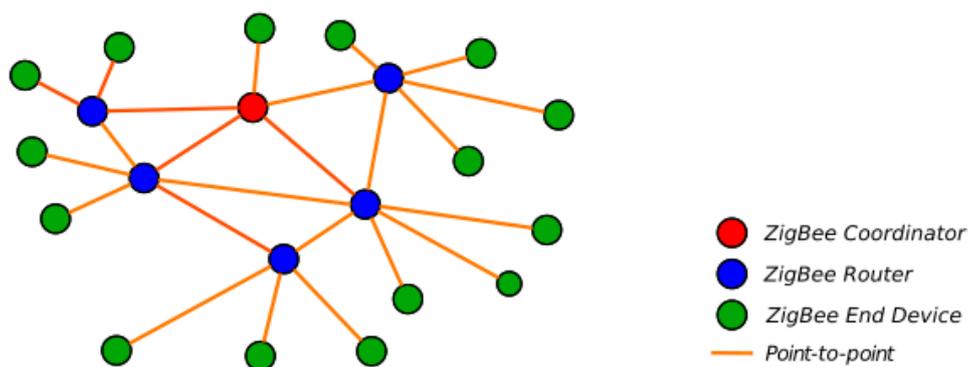


- **Estrela (*Star*):** sua representação esquemática lembra uma estrela, onde o elemento núcleo é o *ZigBee Coordinator (ZC)*, dispositivo único que controla a rede. Todos os outros dispositivos da rede se comunicam diretamente com o ZC;
- **Árvore (*Tree*):** possui estrutura de árvore, tendo em sua raiz o ZC. Este elemento inicia a rede definindo determinados parâmetros básicos. Nesta topologia, os *ZigBee Router (ZR)* são responsáveis por direcionar os dados e mensagens de controle pela rede com o uso de algoritmos de roteamento hierárquico;
- **Malha (*Mesh*):** possui uma estrutura menos comportada. Assim como nas demais topologias, existe um único elemento que controla a rede, entretanto, não há uma hierarquia bem definida. *ZigBee End Device (ZED)* podem estar conectados à um ZR ou ao ZC. ZRs podem estar conectados entre si ou ao ZC. A topologia *mesh* pode ser uma composição das outras topologias.

O subsistema de comunicação é sensível aos pontos de coleta. Esta sensibilidade está relacionada aos desafios apontados em seção 2.1. Em linhas gerais o maior desafio está em planejar o posicionamento dos elementos e a infraestrutura necessária para implementação da rede, isto é, resolver o problema da comunicação.

Em uma análise minimalista do problema da comunicação em uma rede sem fio, independentemente da topologia de rede adotada. Este problema se resume à comunicação *Point-to-point (PtP)* entre pares de elementos da rede (TX/RX). A figura 13 ilustra as comunicações PtP em uma rede ZigBee.

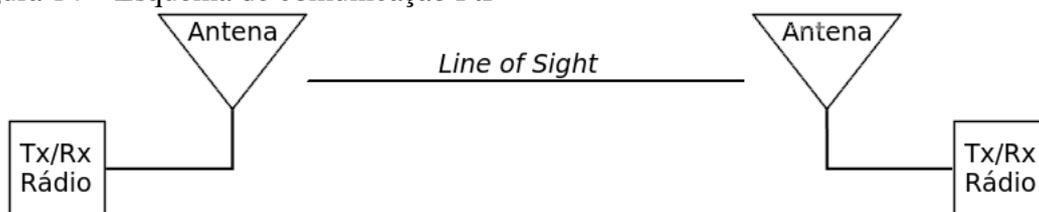
Figura 13 – Comunicação PtP em uma rede ZigBee



Fonte: Próprio autor (2016)

Essencialmente, não importa quantos elementos existem na rede, nem se a comunicação ocorre em um salto (*onehop*) ou múltiplos saltos (*multihop*), pois para cada salto o problema se resume à viabilidade de comunicação direta, em nível físico, entre um TX e um RX. A figura 14 apresenta um esquema da comunicação PtP.

Figura 14 – Esquema de comunicação PtP



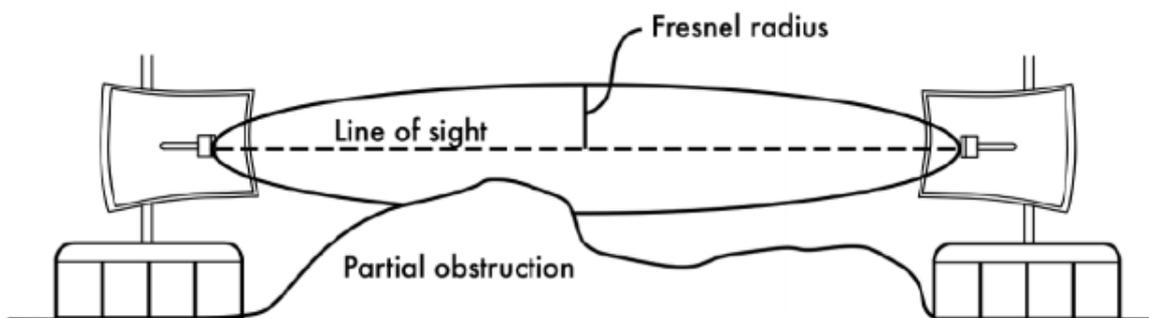
Fonte: adaptado de Butler et al. (2013)

Segundo Butler et al. (2013), um dos principais requisitos para o estabelecimento de uma conexão PtP sem fio ideal é a existência de visada direta entre TX (*Transmitter*) e RX (*Receiver*). A condição de visada é determinante em um sistema de radio comunicação, pois diz respeito à qualidade do enlace estabelecido entre os seus elementos.

As linhas de visada podem ser classificadas em três categorias: *Line of Sight* (LOS), onde não há obstáculos entre as antenas; *Near Line of Sight* (nLOS), onde há obstrução parcial da linha de visada; e *Non Line of Sight* (NLOS), quando a linha de visada está completamente obstruída (L-com Global Connectivity, 2016).

Butler et al. (2013) explica que a linha de visada não é apenas uma linha estreita e que este conceito pode ser melhor compreendido por meio do entendimento da teoria da zona de Fresnel. A zona de Fresnel, ilustrada na figura 15, é definida como um série de elipses concêntricas em torno da linha de visada. De acordo com Felice (2005), a zona de Fresnel é um volume no espaço contido em um elipsoide (“elipsoide de Fresnel”), cujos focos tem o posicionamento de cada um dos elementos do enlace.

Figura 15 – Zona de Fresnel



Fonte: Butler et al. (2013)

De acordo com Felice (2005), a análise da zona de Fresnel permite identificar a existência de obstáculos interferentes entre o TX e o RX, sendo fundamental para a definição dos locais de instalação das antenas e do tamanho da infraestrutura necessária.

Apesar dos inúmeros elipsoides de Fresnel em torno da linha de visada, somente o primeiro precisa ser considerado, isto porque a maior parte da energia está concentrada em seu núcleo. Assim, uma zona de Fresnel pode ser considerada livre se não houver obstrução ou se a obstrução não ultrapassar um limiar. Para Felice (2005), um limite máximo aceitável de obstrução está em torno de 40% do raio de Fresnel para frequências entre 1 e 3 GHz. Isto corresponde à desobstrução total da primeira zona de Fresnel, pois é nela que está concentrada a maior parte da energia eletromagnética. Denomina-se de visada direta o caso em que não há obstrução entre as antenas ou a obstrução existente está abaixo deste limiar. Embora, conforme exposto acima, existam três casos de visada, doravante o termo visada será usado como sinônimo de visada direta, a menos que expressamente explicitado em contrário.

Por outro lado, cabe destacar que se caracteriza como fenômeno natural a ocorrência de perdas de qualidade do sinal de uma comunicação em um rádio enlace, isto é, ocorre uma redução gradual da intensidade do sinal (atenuação ou desvanecimento) denominada *path loss* (ou *path attenuation*), a qual cresce com a distância, decorrente das características físicas do meio de propagação. Entretanto, a obstrução parcial da zona de Fresnel pode aumentar estas perdas ao intensificar os efeitos dos fenômenos de propagação com a inserção de obstáculos no caminho das ondas eletromagnéticas. Abaixo são apresentados os principais fenômenos de propagação que impactam a comunicação por ondas de rádio (FELICE, 2005; BUTLER et al., 2013):

- **Reflexão (*Reflection*):** as ondas de rádio são refletidas ao colidirem com um obstáculo de proporções maiores que o comprimento destas ondas e cujo material possui características que o fazem refletir o sinal. A reflexão pode ser: especular, onde raios paralelos seguem paralelos após a reflexão em uma superfície plana; e difusa, quando as ondas de rádio colidem em uma superfície irregular, sendo refletidos em diferentes direções. Na reflexão, o ângulo de incidência é sempre igual ao ângulo de reflexão;
- **Difração (*Diffraction*):** ocorre quando as ondas de rádio colidem com obstáculos cujas dimensões são bem maiores que o seu comprimento. Entretanto, a difração acontece nas bordas do obstáculo, onde as ondas são desviadas no seu entorno;
- **Refração (*Refraction*):** ocorre devido ao índice de refração variável da atmosfera, fazendo com que as ondas eletromagnéticas não se propaguem em linha reta. Este fenômeno causa variação na intensidade do sinal recebido, devido às flutuações nos parâmetros atmosféricos;

- **Dispersão ou Espalhamento (*Spreading*):** quando bloqueadas por obstáculos cujas dimensões são menores ou comparáveis ao comprimento de onda ocorre a dispersão. Sua natureza é semelhante ao da difração, exceto pelo espalhamento das ondas eletromagnético em muitas direções;
- **Absorção (*Absorption*):** fenômeno pelo qual acontece a atenuação de ondas eletromagnéticas devido à atmosfera. Ocorre na transição entre níveis de energia no interior das moléculas de gás atmosférico. Em resumo, a intensidade de ocorrência deste fenômeno depende não só da composição da atmosfera mas também da frequência do sinal.

Em suma, a ocorrência destes fenômenos geram efeitos que alteram o comportamento das ondas eletromagnéticas que se propagam entre o TX e o RX de um rádio enlace. Em particular, o efeito *multipath* (multipercurso ou múltiplos caminhos) é resultante da reflexão, da difração, da refração e da dispersão das ondas eletromagnéticas em propagação.

No efeito *multipath*, as ondas eletromagnéticas emitidas pelo TX não seguem um único caminho de propagação, elas se propagam em inúmeras direções, ou seja, diversas “versões” do sinal percorrem caminhos diferentes, com distâncias diferentes e atingem o alvo (RX) em tempos diferentes e com intensidades diferentes (BUTLER et al., 2013).

Segundo Felice (2005), em determinadas circunstâncias onde existam muitas ondas refletidas, este efeito pode causar a degradação do sinal e tende a provocar instabilidade no sinal sentido pelo RX. As perdas relacionadas ao efeito de *multipath* são referidas como desvanecimento de multipercurso ou *multipath fading*.

Em contrapartida, o efeito *multipath* possui potencial de estabelecimento de radiovisibilidade. Diferentemente da visada direta, citada anteriormente, o estabelecimento de radiovisibilidade (ou rádio visão) não exige, necessariamente, que exista visibilidade óptica, ou seja, visão entre as duas extremidades do enlace. A radiovisibilidade leva em consideração o conceito da zona de Fresnel e seus critérios de desobstrução (FELICE, 2005).

Para o estabelecimento de um link de comunicação, em um sistema de radiofrequência, é necessário que o sinal transmitido seja recebido com uma intensidade mínima, de acordo com a sensibilidade do RX. Assim, a viabilidade do link é analisada a partir do *link budget*, comumente traduzido como “orçamento do link”, que consiste na quantificação da performance do link através da contabilização dos ganhos e perdas existentes do TX ao RX (BUTLER et al., 2013).

No cálculo do *link budget* são considerados parâmetros relacionados às características do equipamento. Segundo Butler et al. (2013), as principais características a serem consideradas são:

- **Potência de transmissão (*TX power*):** a potência de transmissão, medida em miliwatts ou dBm, depende da construção do módulo de comunicação, da sua aplicação e, frequentemente, da taxa de transmissão. Em geral ela é especificada pelo fabricante no *datasheet* do equipamento. Um exemplo é o dispositivo XBee Series 2 que, de acordo com o fabricante, possui uma potência de transmissão de 2 mW (+3 dBm) e possui taxa de transferência de 250 kbps;
- **Ganho da antena (*Antenna Gain*):** uma antena é um dispositivo passivo do sistema que possui, devido a sua forma física, a propriedade de amplificar o sinal. Esta propriedade é quantificada através do ganho da antena e é expresso em dBi, não importando se está em modo de transmissão ou recepção, isto é, o ganho ocorre em ambos os sentidos. O ganho da antena está diretamente relacionado ao seu tipo e assume valores típicos a seguir: parabólicas, ganho de 19 a 24 dBi; omnidirecionais, de 5 a 12 dBi; e setoriais, de 12 a 15 dBi;
- **Sensibilidade do RX (*RX Sensitivity*):** expressa o nível mínimo da intensidade do sinal para uma recepção efetiva. A sensibilidade do RX é medida em dBm negativo (-dBm) e corresponde à menor potência de sinal que o RX consegue distinguir. O mínimo ficará tipicamente entre -75 e -95 dBm. Assim como a potência de transmissão, deve ser especificada pelo fabricante. Como exemplo, o módulo de rádio XBee Series 2 possui uma sensibilidade de -98 dBm. Este nível mínimo é sempre mensurado em relação ao ruído existente, ou seja, a comunicação só é viável quando a relação sinal-ruído, do termo em inglês *signal-to-noise* (S/N), iguala ou supera o limite mínimo de dBm especificado pelo fabricante do transceptor;
- **Perda nos cabos e conexões (*Cable Losses*):** os cabos e conectores, entre o módulo de rádio e a antena, são responsáveis por parte da perda de intensidade do sinal. Esta perda é dependente da formação do cabo e seu comprimento. Conectores e cabos coaxiais curtos, juntos, causam perdas na faixa de 2 a 3 dB.

Em termos gerais, devem ser consideradas as perdas na intensidade do sinal decorrentes dos efeitos de perda em espaço livre (*free space loss*), atenuação (*attenuation*), e espalhamento do sinal (*scattering*), causados pelos fenômenos citados anteriormente. Butler et al. (2013) descreve-os conforme a seguir:

- **Perda de espaço livre (*Free Space Loss*):** a perda de espaço aberto ocorre devido ao espalhamento geométrico natural da frente de onda e independe do ambiente, apenas da distância entre TX e RX. A equação 4 expressa em dB a perda de espaço livre.

$$L_{fsl} = 32,4 + 20 * \log_{20}(D) + 20 * \log_{20}(f) \quad (4)$$

onde L_{fsl} é a perda de espaço livre, D é a distância do TX em km e f é a frequência em MHz. Em geral a perda pelo uso de uma frequência maior é equilibrada pelo ganho das antenas;

- **Atenuação (*Attenuation*):** a atenuação ocorre na absorção de parte da energia quando a onda eletromagnética colide com objetos, tais como árvores, paredes, janelas, pisos e o próprio solo. A atenuação pode variar muito, dependendo das características do objeto e sua quantificação é difícil. Árvores, por exemplo, adicionam perdas entre 10 e 20 dB caso estejam no direto do sinal e paredes em torno de 10 a 15 dB dependendo do seu material constituinte;
- **Espalhamento do sinal (*Scattering*):** o espalhamento do sinal ocorre ao deixar a antena de transmissão. Parte do sinal emitido pelo TX atinge diretamente o RX, outras parcelas acabam colidindo em objetos e no solo e são refletidas. Parte das parcelas refletidas atingem posteriormente o RX, porém em alguns casos os sinais refletidos somam-se sem causar problemas e em outros eles podem enfraquecer ou até mesmo se anular, devido às diferenças de fase do sinal.

Um elemento determinante no desempenho de um rádio enlace é a antena. A antena é o dispositivo responsável por irradiar ou receber ondas de rádio. Na transmissão a energia elétrica é convertida em energia eletromagnética e irradiada no ar. Na recepção ocorre o processo inverso. Existem vários tipos de antena, com diferentes características e padrões de irradiação (*antenna patterns*) do sinal que as tornam adequadas para fins específicos. Em geral, sua escolha adequada é uma das considerações mais importantes na implementação de uma rede sem fio (OLEXA, 2004).

Uma antena perfeita é conhecida como isotrópica e gera uma esfera perfeita de energia em torno de si mesma. Antenas isotrópicas perfeitas só existem em teoria. A antena dipolo é a mais simples do mundo real, consiste em dois fios de comprimento igual que sejam ressonante à frequência desejada. O padrão de irradiação gerado por um dipolo tem a forma de um toroide. As antenas isotrópicas e dipolos são omnidirecionais,

ou seja, geram um campo de 360° em seu entorno. Já as antenas direcionais, como as parabólicas, são construídas para concentrar a irradiação em um determinado espaço. O ganho dessas antenas está relacionado a seu padrão de irradiação. De forma geral, o padrão de irradiação determina a área na qual será concentrada a energia, quanto menor a área, maior o ganho (OLEXA, 2004).

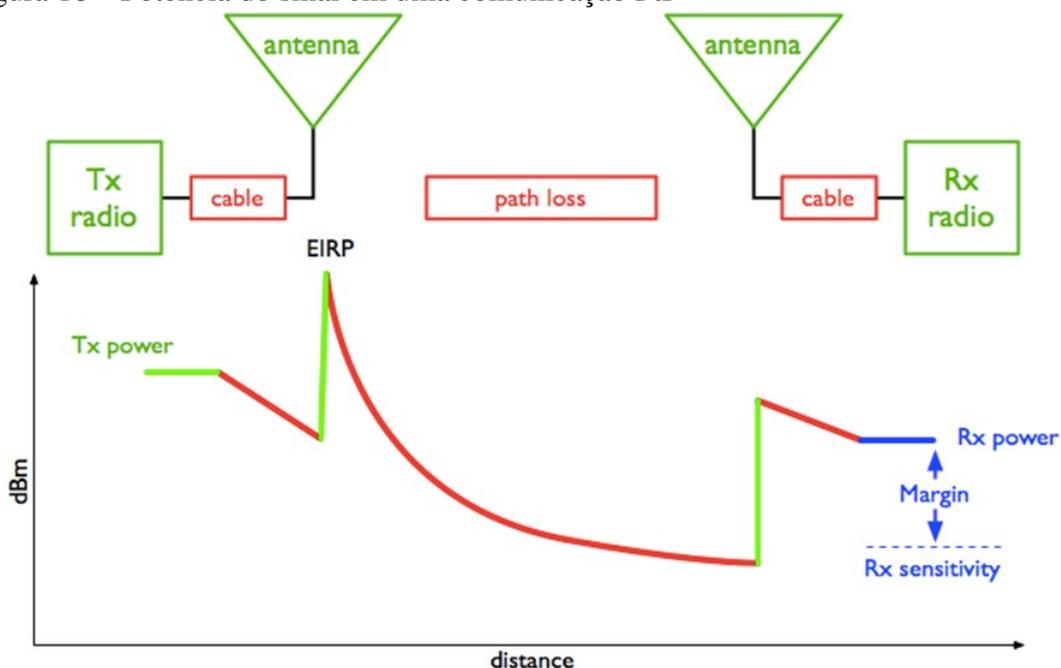
Olexa (2004 apud MUSTAFA et al., 2012) apresenta uma equação para o cálculo do *link budget* com um nível de detalhamento razoável. A equação 5 é uma estimativa da potência do sinal no receptor.

$$P_R = P_T + G_T - L_T - L_P + G_R - L_R - M \quad (5)$$

onde P_R é a potência do sinal recebido, P_T é a potência de transmissão, G_T é o ganho da antena transmissora, L_T é a perda do cabo entre TX e sua antena, L_P é a perda de caminho, G_R é o ganho da antena receptora, L_R é a perda do cabo entre RX e sua antena, e M é a margem de segurança entre a potência do sinal recebido e a sensibilidade do módulo de rádio.

O entendimento do cálculo do *link budget* é fundamental no planejamento de rádio enlace. Butler et al. (2013) ilustra, de forma genérica, os ganhos e perdas em uma comunicação PtP.

Figura 16 – Potência do sinal em uma comunicação PtP



2.3 XBee Series 2

Criar uma rede de sensores completamente escalável e explorar o máximo que esta pode oferecer não é uma tarefa trivial, sendo de extrema importância a compreensão de seu funcionamento. Sendo assim, esta seção tem por objetivo apresentar, de forma detalhada, a estrutura da interface de programação de aplicativos do XBee, módulo de RF utilizado como referência neste trabalho, e alguns parâmetros relevantes de sua configuração.

Todas as comunicações entre dispositivos XBee ocorrem da mesma forma. No entanto, dispositivos que se comunicam com outros sistemas, pela conexão serial do XBee (também conhecida como UART), podem se comunicar de maneiras bem diferentes. Neste sentido, os módulos XBee podem ser configurados como *Transparent* (AT) ou *Application Programming Interface* (API).

XBee não pode manter todas as instruções, AT e API, devido ao limitado espaço de memória disponível. Assim, estas configurações são cambiáveis por meio de *update* de seus *firmwares*, de acordo com o modo de comunicação da porta serial local a ser utilizado (FALUDI, 2010).

XBees carregados com o *firmware* para uso de comandos AT possuem um padrão de comunicação mais simples, projetado para interação humana mais direta. Segundo Faludi (2010), estes rádios podem alternar entre dois modos “*transparent mode*” e “*command mode*”.

Transparent mode é o *default* para rádios configurados como AT. Neste modo, o rádio atua apenas como um retransmissor, enviando dados da porta serial para o destino remoto, e vice-versa, exatamente como foram recebidos. Quando é necessário comunicar-se com o rádio local, e não através dele, o *command mode* faz com que o rádio fique em modo *receive*, interpretando e reagindo aos comandos recebidos. Este modo é utilizado para requisitar parâmetros de configuração ou setá-los, alterando o seu comportamento.

Para que o rádio entre em modo de comando AT é necessário que ele seja induzido por meio do envio de uma sequência única de texto (“+++”). Este envio deve respeitar o parâmetro GT (*Guard Times*), que define o período de silêncio necessário antes e depois do envio da referida sequência. Este período é utilizado para evitar a entrada inadvertida no modo de comando AT. Estando no modo de comando, o XBee mantém-se nele até que seja removido ou tenha ficado inativo por um período de tempo definido pelo parâmetro

CT (*Command Mode Timeout*).

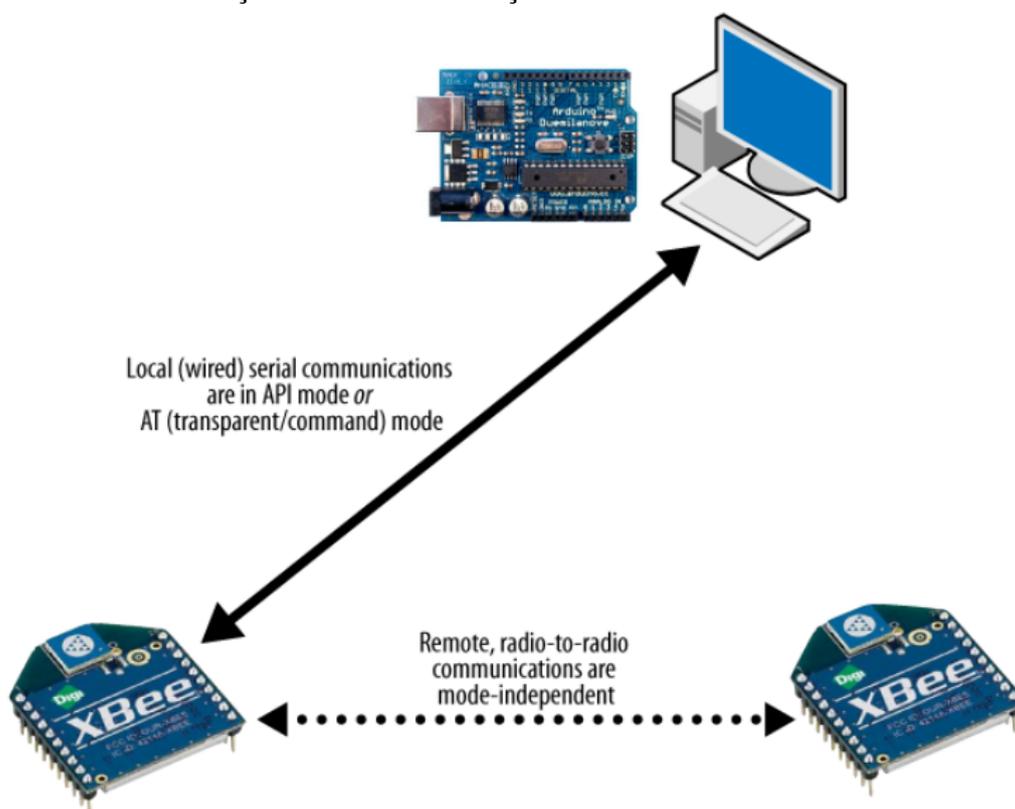
Já o *firmware* de modo API implementa comunicação baseada em *frames*, adequado para troca de mensagens entre sistemas computacionais, mas em um padrão menos legível para humanos. Segundo Faludi (2010), a comunicação no modo API objetiva transmitir dados altamente estruturados de forma rápida, previsível e confiável.

Digi International (2016b) recomenda usar o *firmware* API quando um dispositivo:

- envia dados para vários destinos;
- envia comandos de configuração remota para gerenciar dispositivos na rede;
- recebe amostras de IO de dispositivos remotos;
- recebe dados de múltiplas fontes e a aplicação precisa identifica-las.

Além disso, Digi International (2016b) afirma ser aceitável usar uma mistura de dispositivos executando *firmware* API e AT em uma rede. Isso se dá pelo fato de que as comunicações sem fio entre XBees são independentes do modo de interação local, seja ele API ou AT (*transparent/command*), como mostrado na figura 17. Assim, rádios com *firmware* AT e API podem se comunicar normalmente.

Figura 17 – Comunicação local e comunicação remota

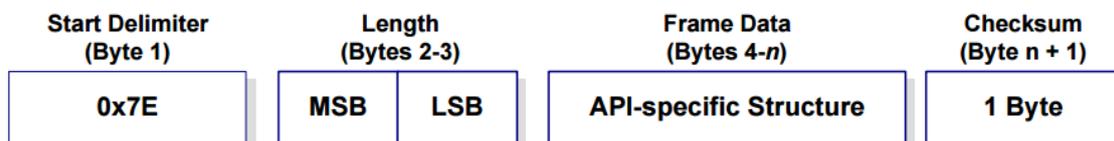


Considerando a solução proposta neste trabalho, apenas o *coordinator* possuirá conexão serial com outro equipamento (Raspberry PI), e será carregado com o *firmware* API. Os demais dispositivos da rede (*end devices* e *routers*) serão carregados com o *firmware* AT. Assim, apresenta-se a seguir algumas características do modo API.

2.3.1 Application Programming Interface (API)

Como dito anteriormente, o modo API implementa comunicação baseada em *frames*, que consistem em uma série de *bytes*, cada um com um determinado significado. A API especifica o envio e recebimento de comandos (*commands*), respostas de comandos (*commands response*) e mensagens de *status* a partir do módulo XBee utilizando um *UART Data Frame*. A figura 18 apresenta a estrutura de um *frame* de dados UART para comunicação por meio da conexão local com XBee *firmware* API.

Figura 18 – Estrutura do *UART Data Frame*



Fonte: Digi International (2016b)

O *frame* API começa com um *byte* (*start delimiter*), de valor $0x7E$, que sinaliza o seu início. Qualquer dado recebido antes deste *byte* é descartado. Os dois próximos *bytes* (*length*, composto por *Most Significant Byte* (MSB) e *Least Significant Byte* (LSB)) indicam o comprimento total dos dados (*frame data*). Estes dados possuem um formato específico para cada tipo de mensagem. Por fim, o último *byte* do *frame* é sempre o *checksum*, também conhecido como soma de verificação. O *checksum* é calculado com base em todos os *bytes* que o antecedem, com exceção do delimitador e do *byte* de comprimento. Seu valor é calculado por meio da equação 6.

$$Checksum = 0xFF - \left\{ \left(\sum_{k=4}^n byte[k] \right) \& 0xFF \right\} \quad (6)$$

onde $\&$ é a operação de conjunção *bit a bit*.

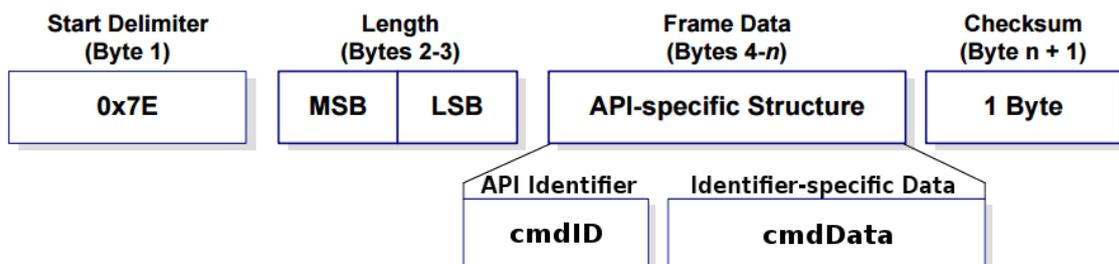
Note que o cálculo do *checksum* consiste de um somatório de todos os *bytes* correspondentes ao *frame data* (4 a *n*), cujos oito bits menos significativos desde resultado são subtraídos do valor *0xFF* (Digi International, 2016b). Já a verificação deve ser realizada por meio da equação 7.

$$Verification = \sum_{k=4}^{n+1} byte[k] \quad (7)$$

Para verificar se a estrutura do *frame* é válida, além de computar a equação 7, seu resultado deve ser comparado com o valor *0xFF*. Se o resultado da comparação foi verdadeiro, então a estrutura do *frame* é válida (Digi International, 2016b).

Um diferencial do modo de operação API, em relação ao AT, é permitir que sejam executados comandos AT tanto localmente quanto remotamente, ampliando o nível de gerenciamento da rede. Neste sentido, é por meio do quadro *Frame Data* do *UART Data Frame* que serão definidos os dados dos diferentes tipos de *frames* API a serem enviados aos rádios XBee (FALUDI, 2010). A figura 19 apresenta a estrutura do quadro *Frame Data* do *UART Data Frame*.

Figura 19 – Estrutura do quadro *Frame Data* do *UART Data Frame*



Fonte: Digi International (2016b)

O tipo de *frame* API (*API Identifier*, ou API ID), informado pelo quadro *cmdID*, determina como deve ser interpretado o conteúdo de *cmdData* (*Identifier-specific Data*). O quadro *cmdData* corresponde a uma mensagem API. Apresenta-se, na tabela 1, alguns tipos de *frames* API, particularmente importantes para este trabalho.

Tabela 1 – Alguns tipos de *frames* do modo API

API Frame Names	API ID
<i>AT Command</i>	0x08
<i>Remote Command Request</i>	0x17
<i>AT Command Response</i>	0x88
<i>ZigBee IO Data Sample Rx Indicator</i>	0x92
<i>Remote Command Response</i>	0x97

Fonte: adaptado de Digi International (2016b)

O conhecimento de algumas estruturas de *frames* API é relevantes para a concepção da solução proposta, detalhados na sequência. Inicialmente, são apresentados os tipos *AT Command* e *AT Command Response*, locais, nas tabelas 2 e 3.

Tabela 2 – Estrutura de um *frame* API: *AT Command*

Campos do <i>frame</i>	Índice	Ex.	Descrição
Delimitador de início	0	0x7E	Obrigatório em todo <i>frame</i> API
Tamanho dos dados	1	0x00	Comprimento dos dados
	2	0x04	
Tipo do <i>frame</i>	3	0x08	Tipos de <i>frames</i> do modo API. Ver tabela 1
ID do <i>frame</i>	4	0x01	Identifica o <i>UART Data Frame</i> com um valor arbitrário, para que possa ser correlacionado com um ACK (confirmação) subsequente. Se configurado como 0x00, nenhuma resposta de <i>status</i> é enviada
Comando AT	5	0x4E	Nome do comando AT. Composto por dois caracteres ASCII
	6	0x49	
Parâmetro			Quando presente indica que se deseja alterar o parâmetro do módulo para o valor fornecido
Checksum	7	0x5F	Soma dos bytes a partir do índice 3 até o <i>byte</i> anterior ao <i>checksum</i> (equação 6)

Fonte: adaptado de Digi (2014 apud CARVALHO, 2015)

Tabela 3 – Estrutura de um *frame* API: AT Command Response

Campos do <i>frame</i>	Índice	Ex.	Descrição
Delimitador de início	0	0x7E	Obrigatório em todo <i>frame</i> API
Tamanho dos dados	1	0x00	Comprimento dos dados
	2	0x0B	
Tipo do <i>frame</i>	3	0x88	Tipos de <i>frames</i> do modo API. Ver tabela 1
ID do <i>frame</i>	4	0x01	Identifica o UART <i>Data Frame</i> com um valor arbitrário, para que possa ser correlacionado com um ACK (confirmação) subsequente. Se configurado como 0x00, nenhuma resposta de <i>status</i> é enviada
Comando AT	5	0x4E	Nome do comando AT. Composto por dois caracteres ASCII
	6	0x49	
Status do Comando	7	0x00	0 = OK 1 = ERRO 2 = Comando Inválido 3 = Parâmetro Inválido 4 = Falha na Transmissão
Parâmetro	8	0x53	Este campo só é preenchido quando realizada uma consulta à um determinado parâmetro
	9	0x45	
	10	0x4E	
	11	0x53	
	12	0x4F	
Checksum	13	0x52	Soma dos bytes a partir do índice 3 até o <i>byte</i> anterior ao <i>checksum</i> (equação 6)
	14	0x05	

Fonte: adaptado de Digi (2014 apud CARVALHO, 2015)

Como dito anteriormente, no modo de operação API é possível enviar comandos AT de forma remota. Para isso, deve-se seguir a estrutura de *frame* especificada nas tabelas 4 e 5.

Tabela 4 – Estrutura de um *frame* API: *Remote AT Command Request*

Campos do <i>frame</i>	Índice	Ex.	Descrição
Delimitador de início	0	0x7E	Obrigatório em todo <i>frame</i> API
Tamanho dos dados	1	0x00	Comprimento dos dados
	2	0x04	
Tipo do <i>frame</i>	3	0x17	Tipos de <i>frames</i> do modo API. Ver tabela 1
ID do <i>frame</i>	4	0x02	Identifica o UART <i>Data Frame</i> com um valor arbitrário, para que possa ser correlacionado com um ACK (confirmação) subsequente. Se configurado como 0x00, nenhuma resposta de <i>status</i> é enviada
Endereço de 64 bits de destino	5	0x00	Endereço de 64 bits do destinatário. Use 0x0000000000000000 para o <i>coordinator</i> e 0x000000000000FFFF para <i>broadcast</i>
	
Endereço de 16 bits de destino (MY)	12	0x22	Endereço de 16 bits do destinatário. Deve ser igual a 0xFFFF se o endereço do destinatário é desconhecido ou é uma transmissão <i>broadcast</i>
	13	0xFF	
	14	0xFE	
Opções de Comando Remoto	15	0x02	0x01 - Desabilita resposta ACK 0x02 - Executa comando imediatamente Se não for setado, a requisição fica enfileirada aguardando confirmação de execução
Comando AT	16	0x44	Nome do comando AT. Composto por dois caracteres ASCII
	17	0x32	
Parâmetro			Quando presente indica que se deseja alterar o parâmetro do módulo para o valor fornecido
Checksum	18	0x5F	Soma dos bytes a partir do índice 3 até o <i>byte</i> anterior ao <i>checksum</i> (equação 6)

Fonte: adaptado de Digi (2014 apud CARVALHO, 2015)

Tabela 5 – Estrutura de um *frame* API: *Remote AT Command Response*

Campos do <i>frame</i>	Índice	Ex.	Descrição
Delimitador de início	0	0x7E	Obrigatório em todo <i>frame</i> API
Tamanho dos dados	1	0x00	Comprimento dos dados
	2	0x0F	
Tipo do <i>frame</i>	3	0x97	Tipos de <i>frames</i> do modo API. Ver tabela 1
ID do <i>frame</i>	4	0x02	Identifica o UART <i>Data Frame</i> com um valor arbitrário, para que possa ser correlacionado com um ACK (confirmação) subsequente. Se configurado como 0x00, nenhuma resposta de <i>status</i> é enviada
Endereço de 64 bits de destino	5	0x00	Endereço de 64 bits do rádio remoto que enviou a resposta
	
Endereço de 16 bits da fonte (MY)	12	0xAA	Endereço de 16 bits do destinatário. Deve ser 0xFFFF se o for desconhecido ou transmissão em <i>broadcast</i>
	13	0x7D	
	14	0x84	0 = OK 1 = ERRO 2 = Comando Inválido 3 = Parâmetro Inválido 4 = Falha na Transmissão
	15	0x00	
Comando AT	16	0x44	Nome do comando AT. Composto por dois caracteres ASCII
	17	0x32	
Parâmetro			Quando presente, indica que se deseja alterar o parâmetro para o valor fornecido
Checksum	18	0x39	Soma dos bytes a partir do índice 3 até o <i>byte</i> anterior ao <i>checksum</i> (equação 6)

Fonte: adaptado de Digi (2014 apud CARVALHO, 2015)

Em relação ao consumo energético do XBee Series 2, Digi International (2016b) apresenta uma corrente máxima de operação de 35 mA em modo de transmissão, 38 mA

em modo *receive*, 15 mA em modo *idle* (*receiver off*) e menos de 1 μ A em modo *sleep*. Levando isto em consideração, o modo de operação *sleep* cíclico parece ser uma solução para otimizar o consumo energético dos nós sensores. Apresenta-se uma avaliação deste modo de operação na seção 4.6.

Detalhes da implementação das funcionalidades da solução, utilizando API *mode* e as estruturas, são apresentadas na seção 3.2.

2.4 Sensoriamento remoto

O termo Sensoriamento Remoto é classicamente reconhecido como uma técnica de obtenção de imagens de objetos na superfície terrestre sem contato físico entre sensor e o objeto. Mais do que isso, o Sensoriamento Remoto permite a aquisição de dados da área de interesse. A obtenção destes dados é realizada por meio de sensores capazes de captar a radiação eletromagnética refletida dos alvos terrestres e atmosféricos (CARVALHO; BAYER, 2008).

Nesta área, existem diversos *softwares* dedicados à visualização, exploração, análise e processamento de imagens e de dados georreferenciados. Alguns exemplos de ferramentas livres e de código aberto, comumente referidas como *Free and Open Source Softwares* (FOSS), são: QGIS (QGIS Project, 2016), licenciado sob a *GNU General Public License*, sendo um dos *softwares* SIG mais populares, multiplataforma (Linux, Unix, Mac OSX, Windows e Android), com suporte aos formatos vetorial, matricial (*raster*) e capacidade de conexão com diferentes SGBDs; GRASS GIS (GRASS GIS, 2016), também licenciado sob os termos da *GNU General Public License*, considerado uma das ferramentas livres mais robustas e com uma significativa gama de funcionalidades no que se refere ao processamento de imagens e dados georreferenciados.

Estes *softwares* são comumente classificados como SIG, podendo resolver grande parte dos problemas de geoprocessamento. Por serem *open source*, são mantidos por grupos de desenvolvedores voluntários e entusiastas da área. Existem diversos outros *softwares*, porém os dois citados acima foram identificados com maior potencial para o estudo proposto neste trabalho, já que incluem funcionalidades específicas para análise espacial do cenário de implementação da RSSF.

Outro fator importante a ser considerado é que estes *softwares* permitem a expansão de suas funcionalidades nativas por meio de *plugins*, ou *add-ons*. Especialmente no que diz respeito ao tema deste trabalho, existem ferramentas desenvolvidas com o

propósito de subsidiar o processo de planejamento de uma rede sem fio, adicionando funcionalidades específicas como a aplicação de modelos de propagação de ondas para análises da intensidade do sinal, dada uma determinada distribuição e configuração dos nós e antenas. Neste contexto, duas ferramentas são exploradas neste trabalho: GRASS-RaPlaT (GRASS-RaPlaT, 2016), caracterizada como uma ferramenta de planejamento de rádio comunicação que funciona como *add-on* no GRASS GIS; e Q-Rap (Q-Rap, 2016), a qual tem o mesmo propósito, porém foi desenvolvida para trabalhar com conjunto com o QGIS. Ambas são *open source* licenciadas sob os termos da *GNU General Public License*.

Estas ferramentas permitem, entre outras, operações exigidas para a solução proposta neste trabalho:

- **Cálculo de *viewshed***: onde é gerado um mapa que descreve a visibilidade de um observador, em uma coordenada geográfica a uma determinada altura, em relação aos alvos posicionados em uma área de alcance e a uma determinada altura;
- **Álgebra de mapas**: consiste na aplicação de uma expressão algébrica entre mapas no formato matricial que ocorre célula a célula com a sobreposição dos mapas. A aplicação da álgebra de mapas gera um novo mapa cujos valores são dependentes da expressão definida;
- **Reclassificação e recodificação**: processos nos quais são atribuídos novos valores para um mapa, no formato matricial, a partir de regras baseadas em valores ou faixa de valores do mapa original. A saída destes consiste em um novo mapa cujos valores dependem do mapa original e das regras aplicadas;
- **Aplicação de modelos de propagação**: funcionalidade agregada por uma extensão do *software* SIG que permite a aplicação de um determinado modelo de propagação. O resultado deste processo pode ser um mapa de *path loss* ou diagrama de intensidade de sinal em formato matricial;
- **Reprojeção**: operação muito comum em aplicações de geoprocessamento. Esta operação consiste em definir ou redefinir o sistema de referência e de projeção de um mapa. Este processo pode ser necessário para a aplicação dos modelos de propagação através do GRASS-RaPlaT, que requer mapas de entrada em coordenadas métricas. Não foi necessária a realização desta operação no desenvolvimento deste trabalho. Uma descrição detalhada dos principais conceitos relacionados a este tema podem ser encontrada em Snyder (1987).

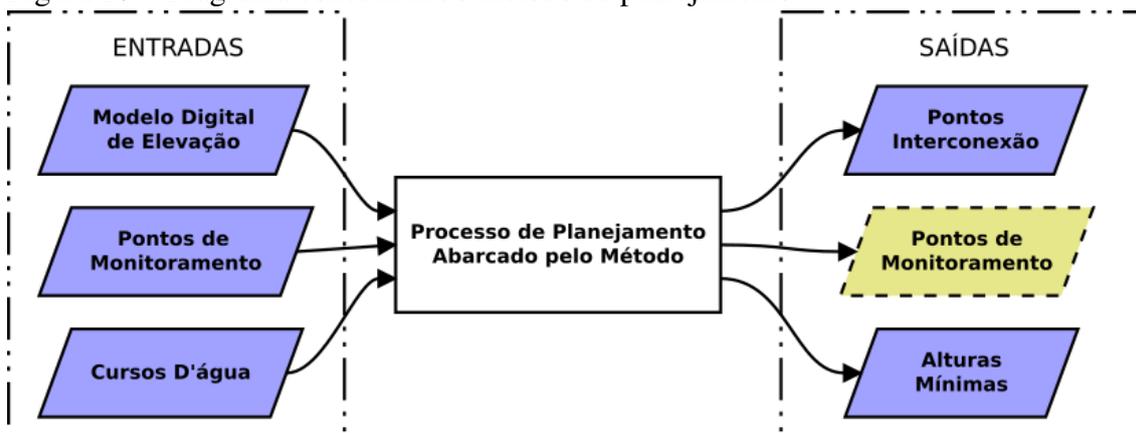
3 SOLUÇÃO PROPOSTA

Este capítulo tem como objetivo a apresentação de uma proposta de solução baseada nos estudos realizados. Esta solução constitui um protótipo de método de planejamento (*planning*) para redes de sensores sem fio voltado ao cenário de bacias hidrográficas. Este protótipo de método baseia-se na utilização de técnicas de geoprocessamento em ferramentas SIG sobre dados de altitude obtidos por sensoriamento remoto. Além do processo de planejamento, faz parte da solução a adaptação de nós sensores com acoplamento de elementos sensores analógicos, um estudo detalhado sobre alternativas para alimentação dos nós sensores e a implementação de um sistema de armazenamento. A seção 3.1 descreve uma visão geral do método seguida pelo detalhamento das suas etapas. E a seção 3.2 aborda a integração dos diferentes componentes da solução de monitoramento remoto.

3.1 O método de planejamento

O método de planejamento proposto recebe um conjunto de entradas e produz um conjunto de saídas a partir de uma sequencia de etapas que compõem o processo abarcado pelo método. A figura 20 ilustra conceitualmente o método proposto.

Figura 20 – Diagrama conceitual do método de planejamento



Fonte: Próprio autor (2016)

Método este que possui entradas (MDE, pontos de monitoramento e cursos d'água), processamento (identificação preliminar de áreas potenciais para o posicionamento dos elementos da rede, seguida por uma fase de otimização) e saídas (mapa com os pontos de interconexão, altura mínima das antenas e eventualmente

um novo mapa de pontos de monitoramento). O conjunto de saídas constituem, preliminarmente, a solução de menor custo.

3.1.1 Definição dos pontos de monitoramento

Os pontos de monitoramento da qualidade da água de uma bacia hidrográfica ao longo de um corpo d'água podem ser determinados em função de estudos anteriores ou de acordo com características que os tornem potencialmente importantes como: proximidade a centros urbanos, sejam antes, no interior ou depois destes; áreas identificadas como de natureza e tipo de fonte de poluição mais significativa na bacia; localização a montante ou a jusante¹ de fontes potenciais de poluição; ou em locais onde existem comunidades às margens de cursos d'água (OLIVEIRA et al., 2010). Adicionalmente, define-se nascentes e olhos d'água como pontos de interesse pois, em princípio, nesses pontos não há intervenção humana: estas áreas são consideradas áreas de preservação permanente (APPs), protegidas pela Lei no 12.651, de 25 de maio de 2012.

3.1.2 Áreas com potencial para instalação de elementos da rede

A primeira etapa do planejamento consiste em identificar áreas com potencial para instalações de nó concentrador (*coordinator*) ou intermediário (*router*). Em uma primeira análise, estas áreas devem oferecer ao nó concentrador, ou intermediário, visada direta com os nós adjacentes a ele na topologia a ser adotada. Em geral, neste momento a topologia não está bem definida e uma possível configuração pode ser determinada a partir do resultado desta etapa.

Técnicas de *viewshed* podem auxiliar neste processo: de acordo com Mustafa et al. (2012), a análise da visibilidade (*viewshed analysis*) ponto-a-ponto e ponto-multiponto no cenário de implementação, é extremamente importante no processo de definição da localização dos elementos da rede e fornece uma maneira eficiente de representar o terreno como visível ou não visível do ponto de localização do observador. Segundo Olexa (2004 apud MUSTAFA et al., 2012), o mapa de visibilidade é formado por todas as LOS de um observador em um determinado perímetro ao seu redor.

¹Jusante e montante são lugares referenciais de um rio pela visão de um observador. Jusante é o fluxo normal da água, de um ponto mais alto para um ponto mais baixo. Montante é a direção de um ponto mais baixo para o mais alto.

Na busca da solução de menor custo é interessante que um nó concentrador ou intermediário conecte o maior número de nós sensores em uma área, não excedendo sua capacidade. Para tanto, uma análise conjunta da visibilidade ponto-multiponto para cada um dos pontos de monitoramento permitirá quantificar os pontos visíveis de uma determinada área. Esta primeira análise ocorre em cinco etapas: cálculo de *viewshed* para cada um dos pontos de monitoramento; reclassificação dos mapas de visibilidade resultantes; computação do mapa de visibilidade completo; geração do mapa vetorial de visibilidade; extração das áreas com maior potencial. Descreve-se, a seguir, cada uma destas etapas.

O cálculo de *viewshed* para cada um dos pontos de monitoramento resulta em uma coleção de mapas de visibilidade onde cada mapa indica, para todos os pontos (alvos ou em inglês *target*) do MDE (em um raio de alcance), se este é visível (valor 1) ou não visível (valor 0 ou nulo) do ponto onde está o observador (ponto de monitoramento), como ilustra a figura 21.

Figura 21 – Mapa de visibilidade

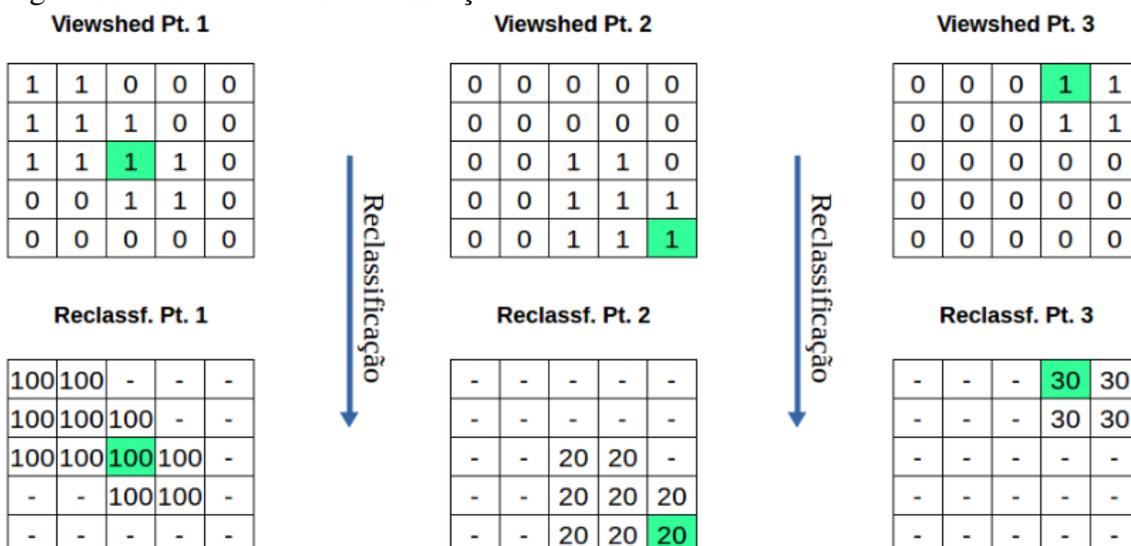
Viewshed Pt. 1	Viewshed Pt. 2	Viewshed Pt. 3	Viewshed Pt. N
1 1 0 0 0	0 0 0 0 0	0 0 0 1 1	0 0 0 0 0
1 1 1 0 0	0 0 0 0 0	0 0 0 1 1	0 0 0 0 0
1 1 1 1 0	0 0 1 1 0	0 0 0 0 0	0 0 0 1 1
0 0 1 1 0	0 0 1 1 1	0 0 0 0 0	0 0 1 1 1
0 0 0 0 0	0 0 1 1 1	0 0 0 0 0	0 0 0 1 1

Fonte: Próprio autor (2016)

A célula em verde indica o ponto de monitoramento. Dentre os parâmetros necessários para realizar o cálculo de *viewshed* estão as elevações, tanto do observador quanto do alvo, definidas arbitrariamente. Sugere-se neste momento utilizar elevação igual para o observador e para o alvo.

Uma alternativa potencial para identificação das áreas de visibilidade em comum entre dois ou mais pontos de monitoramento é reclassificar os mapas de visibilidade. A partir desta abordagem, considerando uma numeração dos pontos de monitoramento de um até N, onde N é o número total de pontos, os mapas de visibilidade devem ser reclassificados da seguinte forma (figura 22).

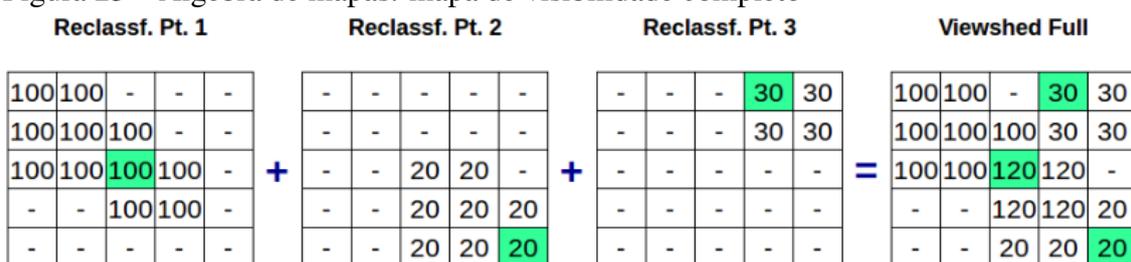
Figura 22 – Processo de reclassificação



Fonte: Próprio autor (2016)

Após a reclassificação, deve ser gerado o mapa de visibilidade completo. Esta etapa é realizada por meio da álgebra de mapas, onde é possível gerar novos mapas a partir de expressões algébricas em função de outros mapas. Na álgebra de mapas, os mapas utilizados na expressão algébrica são sobrepostos e as operações da expressão são aplicadas célula a célula por toda a extensão da grade. A figura 23 ilustra o resultado desta etapa.

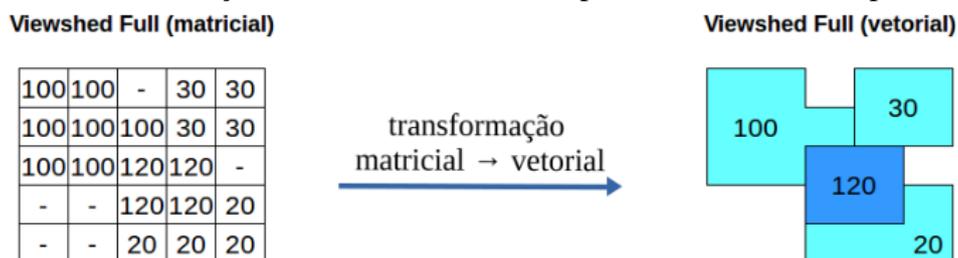
Figura 23 – Álgebra de mapas: mapa de visibilidade completo



Fonte: Próprio autor (2016)

Como resultado, obtém-se um mapa de visibilidade que, além de indicar se uma área é visível (valor diferente de nulo) ou não (valor nulo), indica por quais pontos de monitoramento esta área é visível. Para uma melhor visualização das áreas em potencial, indica-se transformar estes mapas matriciais em mapas vetoriais. Essa transformação é realizada tendo o valor de reclassificação como parâmetro de agregação das células da matriz de origem. Este processo está exemplificado na figura 24.

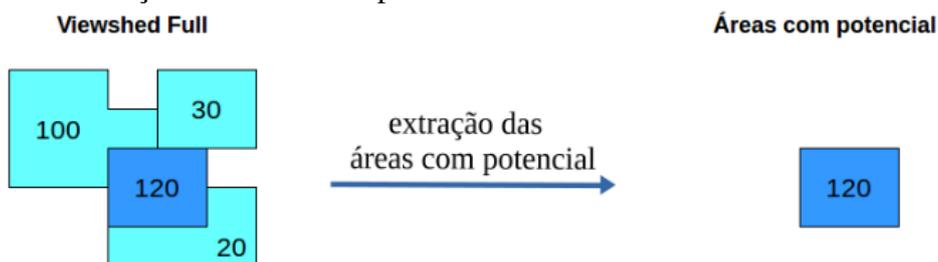
Figura 24 – Transformação matricial/vetorial do mapa de visibilidade completo



Fonte: Próprio autor (2016)

Uma análise visual do mapa vetorial gerado nesta etapa permite identificar facilmente as áreas com maior número de pontos visíveis. Entretanto, em um cenário com grande número de pontos de monitoramento, esta tarefa não é trivial em função da grande quantidade de categorias possíveis. Seja S o conjunto de pontos de monitoramento, o conjunto de todos os subconjuntos de S (conjunto das partes 2^S) terá 2^n elementos, onde n é o número de pontos de monitoramento. Ou seja, haverá $2^n - 1$ categorias, onde o -1 corresponde ao conjunto vazio que no mapa matricial é representado pelo valor 0 ou nulo (embora no mapa vetorial não se faça necessária a sua representação). Com o número de categorias possíveis crescendo exponencialmente com o número de pontos de monitoramento, é necessário utilizar alguma técnica para extrair as áreas com maior potencial para instalação do nó concentrador ou intermediário.

Figura 25 – Extração das áreas com potencial



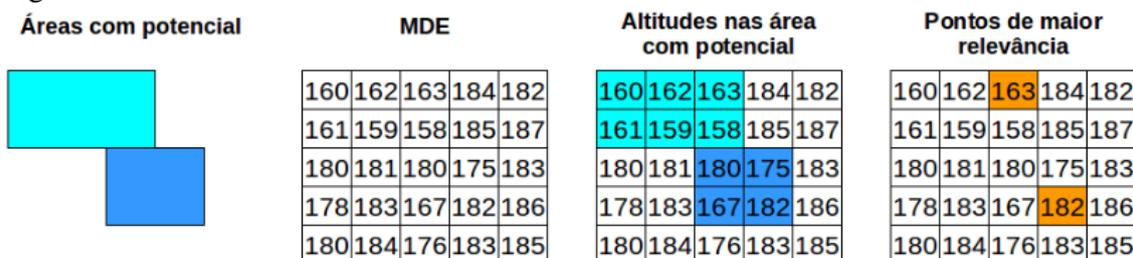
Fonte: Próprio autor (2016)

A figura 25 ilustra o resultado da extração das áreas de maior potencial utilizando como critério o número de pontos visíveis maior ou igual a dois. Vale ressaltar que este critério muda de aplicação para aplicação de acordo com o cenário de estudo, sendo este apenas um exemplo no qual uma única área foi extraída.

Neste processo é importante realizar a extração com diferentes critérios até que sejam identificadas áreas com visada para todos os pontos de monitoramento, sejam elas vistas por um ou mais pontos. No pior caso, haverão tantas áreas com potencial

quantos pontos de monitoramento existirem. A análise do MDE nestas áreas mostrará, provavelmente, diferenças de altitude de um ponto para o outro no seu interior. Assim, um ponto de maior relevância em uma determinada área possui maior elevação em relação aos demais, como exemplifica a figura 26, cujas áreas e valores de altitude foram definidos arbitrariamente apenas para fins de ilustração.

Figura 26 – Pontos de maior relevância



Fonte: Próprio autor (2016)

3.1.3 Otimização da solução

O exemplo de extração das áreas com potencial da seção anterior, suscita, em especial, uma discussão importante a respeito da quantidade de elementos intermediários necessários para cobrir todos os pontos de monitoramento. A única área extraída, de acordo com o critério utilizado, possui visada para apenas dois pontos, restando um ponto sem visada para esta área. Novamente a generalização ocorre quando existe uma quantidade arbitraria de pontos de monitoramento, neste caso a relação entre o número total de pontos e o número máximo de pontos que possuem visada para uma determinada área tende a diminuir, o que pode aumentar a quantidade de infraestrutura e equipamentos, elevando o custo da solução. Outro fator determinante para o custo da solução é a elevação das antenas. Assim, as subseções a seguir descrevem alternativas para resolução do problema da visada direta com elevação mínima das antenas, tendo como objetivo encontrar o projeto que minimiza o custo de implantação (CAPEX²).

Alternativas para o problema de LOS

Neste caso, o problema consiste na falta de visada direta entre alguns pontos de monitoramento e as áreas de maior potencial (com maior número de pontos de

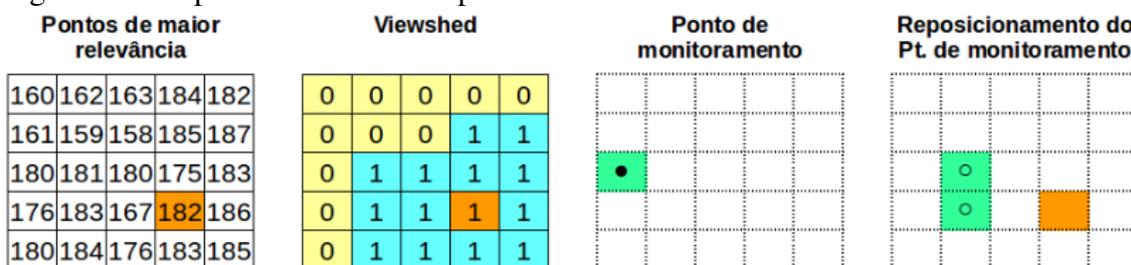
²CAPEX é a sigla da expressão inglesa *CAPital EXpenditure* (em português, despesas de capital ou investimento em bens de capital) que indica a quantidade de dinheiro gasto na compra de equipamentos e na sua instalação inicial.

monitoramento visíveis). A falta de visada pode ser resolvida com ganho de elevação nas antenas. Porém, existem pelo menos três alternativas que tendem a diminuir o custo da solução, descritas a seguir.

Para o monitoramento de uma bacia hidrográfica, existe uma certa flexibilidade em relação ao posicionamento dos pontos de monitoramento ao longo de um curso d'água. Isto é, desde que sejam mantidos os critérios de definição dos pontos de interesse citados na seção 3.1.1, os pontos de monitoramento podem ser redefinidos tendo como critério a visada direta.

Para tanto, é necessário gerar novos mapas de visibilidade, desta vez tendo como observador os pontos de maior relevância. Estes mapas permitem determinar quais pontos de um curso d'água são visíveis a partir de quais pontos de maior relevância, resolvendo o problema de LOS e reduzindo o número de elementos intermediários necessários para cobertura de todos os pontos de monitoramento. O processo de reposicionamento está exemplificado na figura 27.

Figura 27 – Reposicionamento dos pontos de monitoramento



Fonte: Próprio autor (2016)

Outra alternativa potencial é explorar a comunicação *multihop* com a inserção de elementos intermediários no rádio enlace. Esta alternativa resolve o problema de LOS mas não garante o menor custo da solução, apesar de evitar a necessidade de grandes infraestruturas.

Uma terceira alternativa, complementar, envolve a exploração do efeito *multipath* para efetivar a comunicação com o elemento posicionado no ponto sem visada. Uma melhor avaliação desta alternativa deverá ser realizada com o estudo da propagação do sinal no cenário de aplicação. Esta alternativa, caso se mostre viável, também possui potencial para redução no custo da solução.

Elevação mínima das antenas

A configuração da rede que minimiza a elevação das antenas pode ser determinada a partir da análise conjunta dos mapas de visibilidade completos, gerados tendo como observador cada um dos pontos de maior relevância. Para tanto, deve-se gerar mapas de visibilidade para cada ponto de maior relevância com diferentes combinações de elevação do observador e do alvo (figura 28).

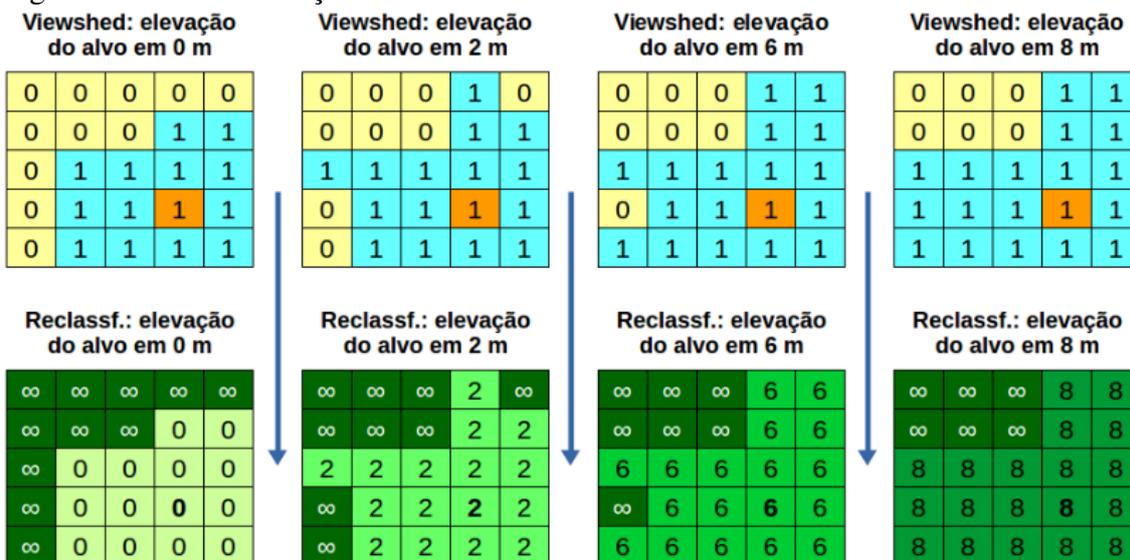
Figura 28 – Mapas de visibilidade com alvo em diferentes elevações



Fonte: Próprio autor (2016)

Os mapas de visibilidade gerados devem ser reclassificados, fazendo com que posteriormente seja possível identificar o valor mínimo de elevação para cada célula do mapa. A figura 29 ilustra a reclassificação.

Figura 29 – Reclassificação de viewshed com os valores de altura

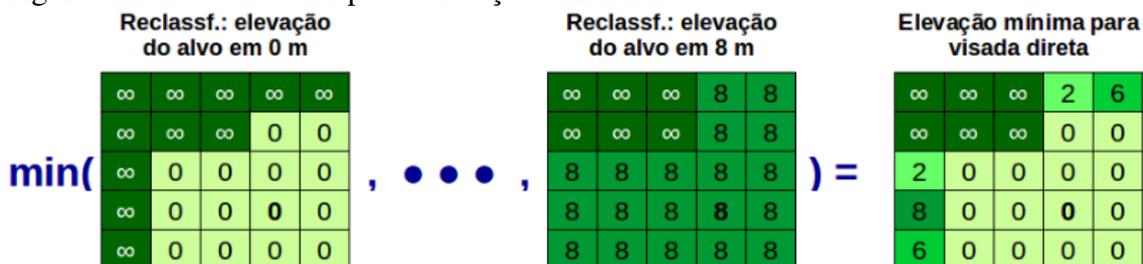


Fonte: Próprio autor (2016)

Por meio da álgebra de mapas, é possível produzir um mapa de elevações mínimas dos alvos. A expressão algébrica em questão obtém, de todos os mapas envolvidos, o menor valor para uma determinada célula. Este processo deve ser aplicado para cada

ponto de maior relevância e altura do observador, gerando um único mapa que, dada uma determinada posição e elevação de observação, descreve as elevações mínimas para obtenção da visada.

Figura 30 – Cálculo do mapa de elevações mínimas



Fonte: Próprio autor (2016)

Definição 3.1 (Mínimo de duas matrizes) *Sejam M_1 e M_2 duas matrizes de dimensões $n \times m$. O resultado da operação binária $\min(M_1, M_2)$ é uma matriz M de dimensões $n \times m$ onde, cada elemento a_{ij} de M é dado por:*

$$a_{ij} = \begin{cases} a_{ij}^1 & \text{se } a_{ij}^1 \leq a_{ij}^2 \\ a_{ij}^2 & \text{se } a_{ij}^1 > a_{ij}^2 \end{cases}$$

onde a_{ij}^1 e a_{ij}^2 são, respectivamente, os elementos que estão na posição i, j das matrizes M_1 e M_2 .

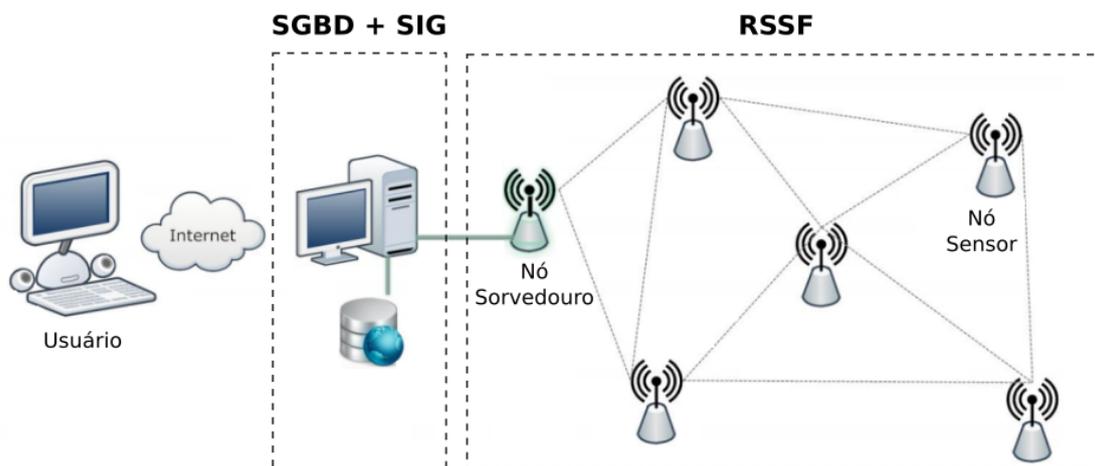
Uma análise conjunta dos mapas de elevação mínima de todos os pontos de maior relevância permite determinar quais destes irão estabelecer conexão com quais pontos de monitoramento, bem como as elevações mínimas necessárias para obtenção da visada direta entre eles. É válido ressaltar que os passos seguidos para determinação das alturas mínimas não leva em consideração a zona de Fresnel nem o potencial do efeito *multipath* na comunicação sem visada direta. Portanto o fator obstrução da zona de Fresnel deve ser analisado posteriormente pelo perfil topográfico do rádio enlace e o potencial do efeito *multipath* pela propagação do sinal de rádio em uma ferramenta de cálculo de cobertura de rádio, eventualmente implicando em aumento na elevação das antenas.

3.2 Integração dos componentes da solução

Geralmente em RSSF, os dados coletados pelos sensores e disseminados na rede são armazenados em um sistema de armazenamento. Como complemento, existe a

possibilidade de oferecer ao usuário final a funcionalidade de acessar o sistema pela Internet (SOARES, 2012). A figura 31 apresenta uma visão geral do sistema de monitoramento proposto.

Figura 31 – Visão geral do sistema de monitoramento



Fonte: adaptado de Soares (2012)

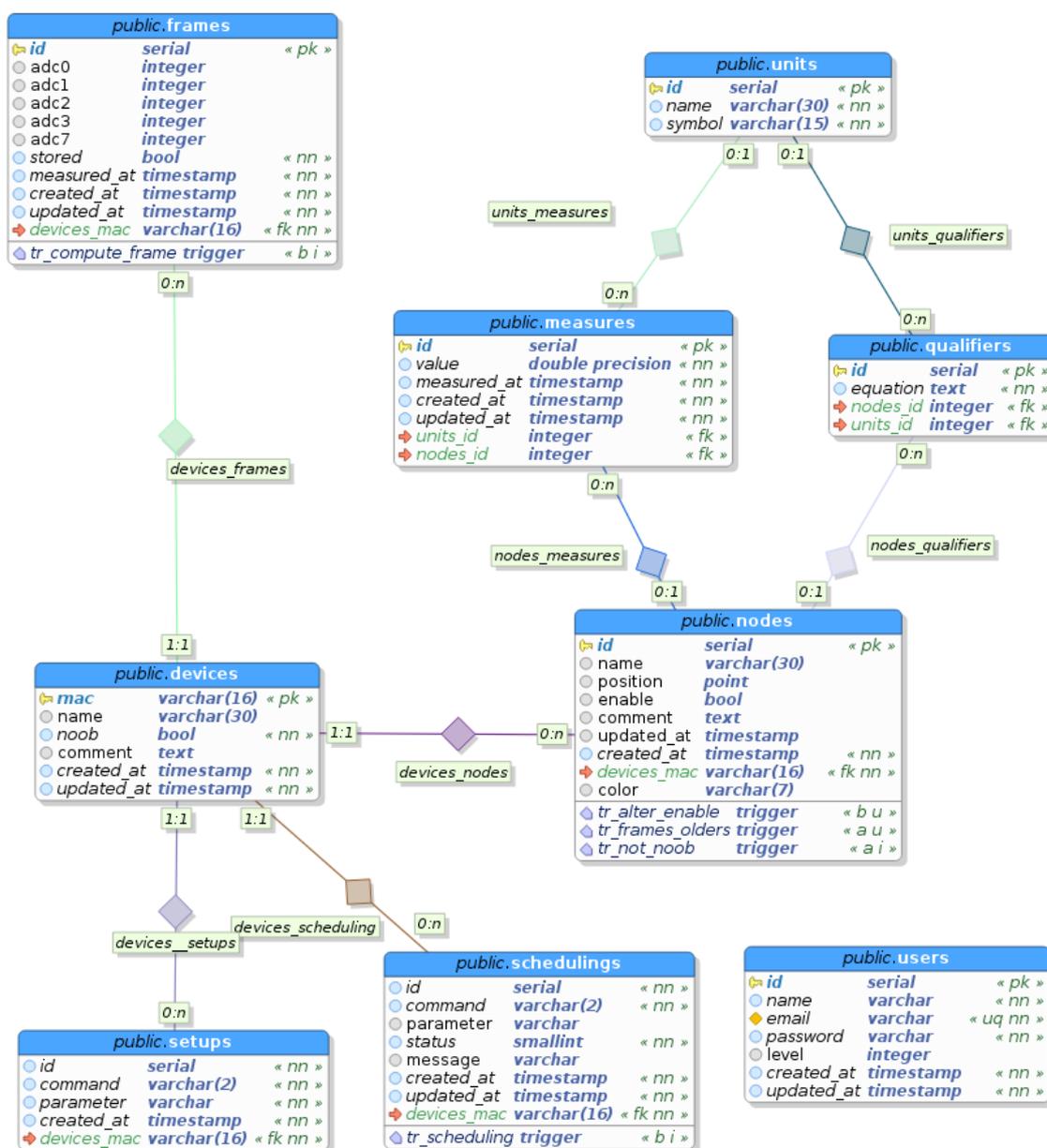
O sistema de monitoramento final proposto consiste na integração de diferentes componentes, que necessitam de ajustes para satisfazer os requisitos da aplicação, descritos no apêndice A. Para o armazenamento dos dados foi identificado o SGBD PostgreSQL como ferramenta ideal por ser *open source*, pela grande quantidade de material disponível e pelo sucesso em outras aplicações. Outro fator que destacou o PostgreSQL foi a possibilidade de expansão de suas funcionalidades com a biblioteca de funções PostGIS, que agregam ao SGBD a capacidade de espacialização dos dados. Para a visualização dos dados coletados em forma de mapas é comum o uso de ferramentas web SIG integradas ao SGBD. Além disso, as ferramentas *open source* de SIG estarão disponíveis para as ações referentes ao planejamento da RSSF em conformidade com o método exposto neste capítulo.

Quanto à RSSF, a partir do posicionamento e definição da topologia da rede, resultantes do método de planejamento, o desafio passa a ser a adaptação (customização) dos nós sensores, em especial sobre os subsistemas de sensoriamento, comunicação, processamento e energia. Para o subsistema de sensoriamento, o desafio está em realizar o efetivo acoplamento de elementos sensores ao nó. Quanto ao subsistema de comunicação, são necessários ajustes em relação as antenas, em especial sobre o tipo e o ganho destas. Do subsistema de processamento, para monitoramento da água, não foi identificada a necessidade de alteração dos dados amostrados no próprio nó sensor.

3.2.1 Solução de gerenciamento e monitoramento

Para o efetivo armazenamento dos dados coletados foi criado um esquema lógico do banco de dados, apresentado por meio da figura 32, em conformidade com o SGBD escolhido. Este modelo foi criado de forma a contemplar os requisitos espaço-temporais, permitindo o armazenamento dos dados coletados incluindo referência espacial e temporal, e o histórico de configurações da rede.

Figura 32 – Esquema lógico do banco de dados modelado



O esquema é composto por sete tabelas, descritas a seguir:

- **public.devices:** armazena dados relacionados aos módulos de rádio, detentor do “*mac address*” único (*primary key*). Dentre estes estão também: “*noob*”, uma *flag* que indica se o *device* é novo na rede e ainda não foi configurado; e “*comment*”, um espaço para armazenamento de informações adicionais inseridas pelo usuário. Também são armazenadas estampas de tempo (*timestamp*) de criação (“*created_at*”) e de atualização (“*updated_at*”) da tupla;
- **public.frames:** mantém os quadros (*frames*) de dados enviados por um *device*, identificado pela *foreign key* “*devices_mac*”, ao nó sorvedouro. Além dos dados digitais (*adc0*, *adc1*, *adc2* e *adc3*), são armazenadas estampas de tempo de criação, atualização e de medição (“*measured_at*”). Esta última é informada pelo nó sorvedouro ao inserir os dados na tabela. O atributo “*stored*” possui valor booleano que indica se os dados contidos no *frame* já foram qualificados e armazenados;
- **public.nodes:** cada tupla desta tabela representa um nó sensor. Este nó sensor pode estar ativo ou inativo, de acordo com o valor booleano da *flag* “*enable*”. Este possui um nome (“*name*”), uma posição geográfica (“*position*”), uma cor para o marcador a ser inserido nos mapas de visualização (“*color*”) e os marcadores de tempo. Cada nó sensor possui um vínculo (*foreign key*) com um *device*.
- **public.qualifiers:** nesta tabela são definidos os qualificadores, vinculados aos seus respectivos nós sensores por meio da *foreign key* “*nodes_id*”. O qualificador consiste em uma equação (“*equation*”) em função dos valores digitais *adc0*, *adc1*, *adc2*, *adc3*. A qualificação de um dado resulta em um valor real que representa uma grandeza cuja unidade é indicada por “*unit_id*”;
- **public.measures:** mantém os dados já qualificados (“*value*”) e vinculados aos respectivos nós sensores (“*nodes_id*”) e unidades “*units_id*”;
- **public.scheduling:** nesta tabela são armazenadas as configurações agendadas pelo usuário para serem disseminadas na rede pelo nó sorvedouro. Possui os seguintes atributos: “*command*”, comando a ser configurado; “*parameter*”, novo valor do comando; “*status*”, indica o status do agendamento; e “*message*”, contendo uma mensagem de retorno do nó sorvedouro caso o tenha ocorrido uma falha.
- **public.users:** tabela responsável por armazenar os usuários. Para cada usuário são armazenados os seguintes dados: “*name*”, “*email*”, “*password*”, “*level*” e “*password*”, além das estampas de tempo.

- *public.units*: armazena unidades, contendo seu respectivo nome (“*name*”) e símbolo (“*symbol*”) (Ex.: (1, “Temperatura”, “°C”));

A solução de armazenamento possui os gatilhos (*triggers*) apresentados na tabela 6.

Tabela 6 – *Triggers* da solução de armazenamento

Nome	Execução	Evento	Tabela	Descrição
<i>tr_compute_frame</i>	<i>BEFORE</i>	<i>INSERT</i>	<i>public.frames</i>	Responsável por qualificar os dados, se houver um nó sensor ativo vinculado ao “ <i>mac address</i> ” em questão, e armazenar os resultados na tabela “ <i>public.measures</i> ”.
<i>tr_alter_enable</i>	<i>BEFORE</i>	<i>UPDATE</i>	<i>public.nodes</i>	Responsável por manter a consistência relacionada à vários nós sensores vinculados ao mesmo módulo de rádio.
<i>tr_frames_olders</i>	<i>AFTER</i>	<i>UPDATE</i>	<i>public.nodes</i>	Responsável por qualificar dados ainda não qualificados quando o nó sensor for ativado e possuir qualificadores vinculados.
<i>tr_not_noob</i>	<i>AFTER</i>	<i>INSERT</i>	<i>public.nodes</i>	Responsável por alterar a <i>flag</i> “ <i>noob</i> ” do módulo de rádio quando for definido o primeiro nó sensor vinculado a este.

Fonte: Próprio autor (2016)

A função, desenvolvida em *Procedural Language/PostgreSQL* (PL/pgSQL),

executada para realizar a aplicação da equação do qualificador aos dados é apresentada na figura 33.

Figura 33 – Função para qualificar dados amostrados

```

1 CREATE OR REPLACE FUNCTION public.calc_measure (
2     IN adc0 integer,
3     IN adc1 integer,
4     IN adc2 integer,
5     IN adc3 integer,
6     IN equation text,
7     OUT result double precision)
8     RETURNS double precision AS $BODY$
9 BEGIN
10    EXECUTE 'SELECT ' ||
11        (SELECT regexp_replace(
12            regexp_replace(
13                regexp_replace(
14                    regexp_replace(
15                        equation,
16                            '\madc0\M', '$1', 'g'),
17                            '\madc1\M', '$2', 'g'),
18                            '\madc2\M', '$3', 'g'),
19                            '\madc3\M', '$4', 'g'))
20        INTO result
21        USING $1, $2, $3, $4;
22 END; $BODY$; LANGUAGE plpgsql IMMUTABLE

```

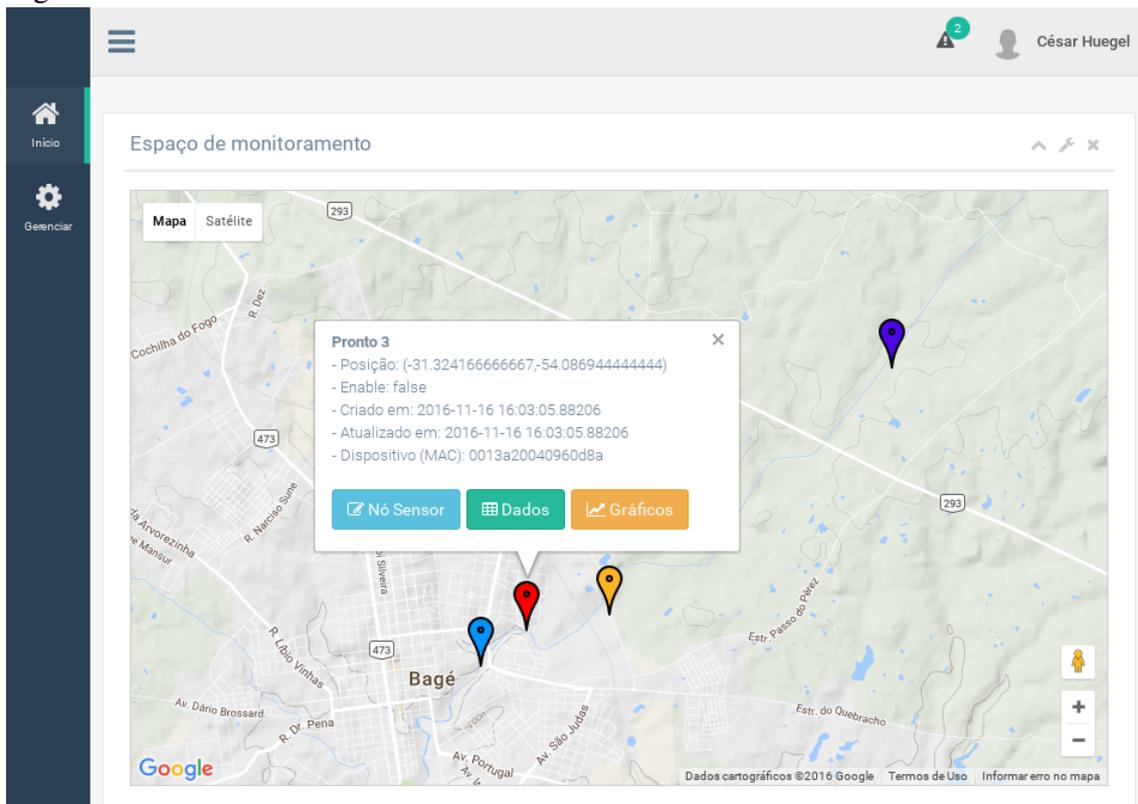
Fonte: Próprio autor (2016)

O esquema proposto, além de contemplar os requisitos espaço-temporais supracitados, permite a definição de qualificadores, de forma individual, para os dados coletados pelos *end devices* da rede.

Em relação à interação do elemento concentrador com o banco de dados, este deverá executar *queries* de inserção na tabela “*public.frames*”. O evento de inserção dispara o gatilho “*tr_compute_frame*” que executará a função responsável por qualificar os dados.

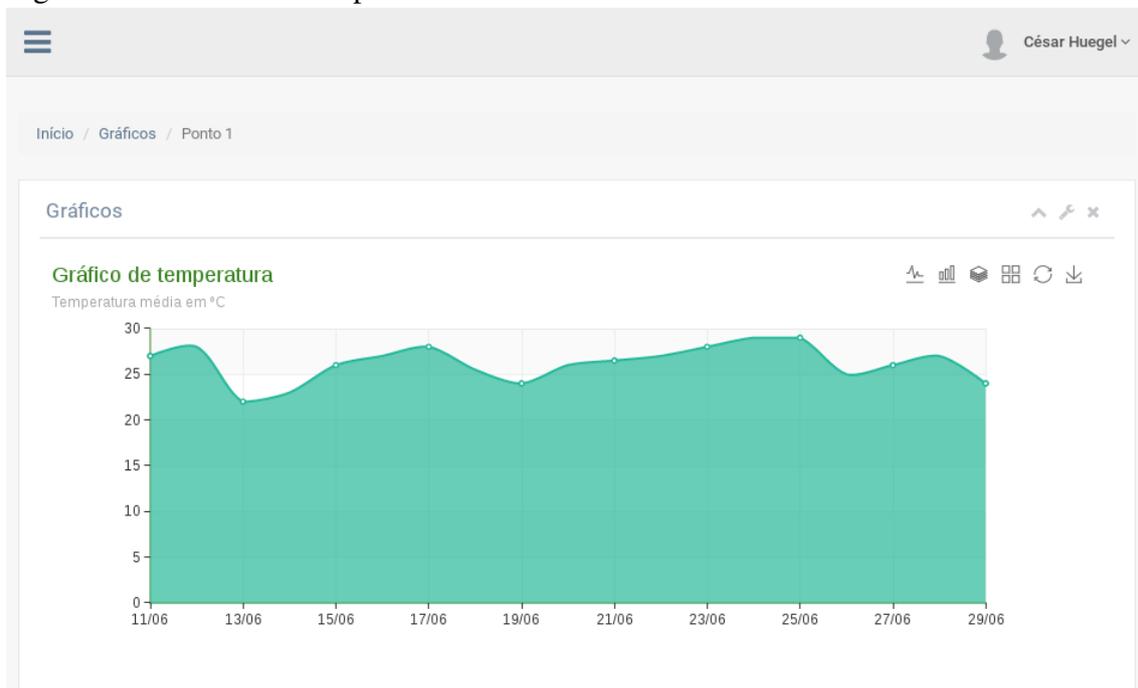
Para o gerenciamento da rede e para visualização dos dados foi proposta e implementada uma interface *web*, desenvolvido a partir do *framework* Laravel (<https://laravel.com>), *open source*, licenciado sob a MIT (licença permissiva de *software* livre originada no *Massachusetts Institute of Technology*). A figura 34 apresenta a interface inicial.

Figura 34 – Interface inicial



Fonte: Próprio autor (2016)

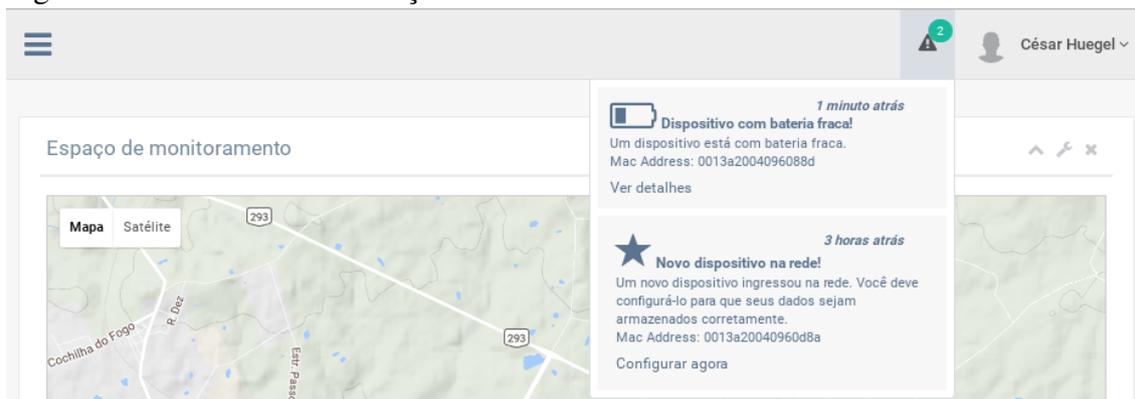
Figura 35 – Gráfico de temperatura



Fonte: Próprio autor (2016)

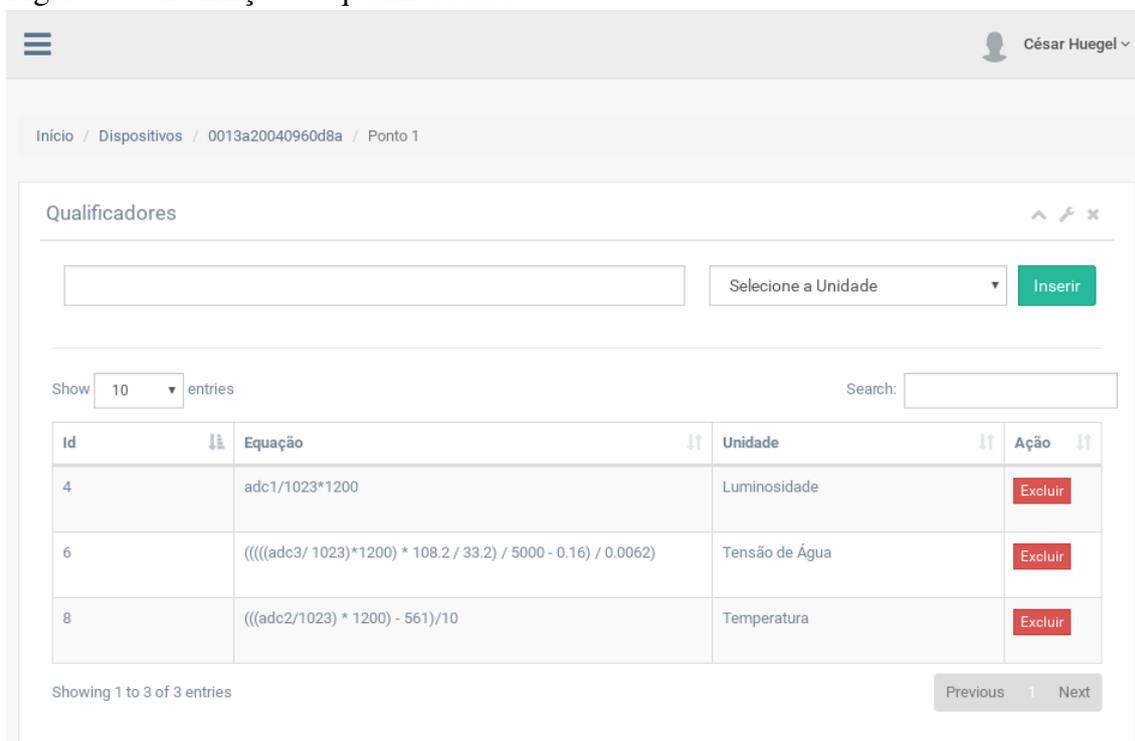
Para os elementos gráficos foi utilizado o *admin template* Gentellela Admin (<https://github.com/puikinsh/gentelella>), *open source* também licenciado sob a MIT, que utiliza estilos gráficos do Bootstrap 3 (<http://getbootstrap.com/>) e uma gama de *plugins* e ferramentas do *framework javascript* jQuery (<https://jquery.com/>). Esta interface conta com diferentes *dashboards*, onde serão exibidos os dados coletados em forma de gráficos e tabelas, como ilustra a figura 35.

Figura 36 – Sistema de notificação



Fonte: Próprio autor (2016)

Figura 37 – Definição de qualificadores



Fonte: Próprio autor (2016)

A interface gráfica possui um sistema de avisos, que emite notificações como: o

ingresso de novos elementos sensores na rede (figura 36), alertando sobre a necessidade de configurá-los (definir nome, posicionamento, qualificadores, dentre outros parâmetros); e baixo nível de energia disponível.

A definição dos qualificadores é realizada, individualmente, para cada nó sensor por meio de uma equação, dada em função das leituras, e uma unidade (ex. luminosidade, temperatura ou umidade) conforme apresenta a figura 37.

Além disso, a interface gráfica permite, ao planejador e ao administrador da rede, realizar configurações remotas (*Over The Air* (OTA)). A solução proposta para configurações OTA será melhor descrita na subseção 3.2.3.

3.2.2 Nó sorvedouro

O nó sorvedouro proposto, consiste na integração do módulo de rádio XBee S2 a um Raspberry PI (figura 38). O XBee em questão deverá estar configurado como *coordinator*. Os dados coletados pelos *end devices* e disseminados pela rede até o *coordinator*, em um *hop* ou múltiplos *hops*, por meio dos *routers*, são inseridos em um banco de dados *sqlite* local e, periodicamente, transferidos (*push*) para o BD central (PostgreSQL). A frequência com que ocorre o *push* dos dados pode ser determinada em função do número de amostras armazenadas localmente, em função do tempo ou ambos. Esta, dentre outras configurações como as de acesso ao BD central, são setadas em um arquivo de configurações, lido na inicialização do serviço instalado no Raspberry PI.

Figura 38 – Nó sorvedouro



Fonte: Próprio autor (2016)

O serviço, citado anteriormente, foi desenvolvido em linguagem *Python*. Enquanto está em estado ativo, ocorre o monitoramento da porta serial correspondente à conexão com o *coordinator*. Ao receber um frame, o seu tipo é avaliado e com base nesta avaliação é tomada uma decisão, se for do tipo I/O ocorre a inserção dos seus campos no BD local e um *trigger* é disparado caso deva ocorrer o *push* dos dados. Caso afirmativo, uma função, também desenvolvida em *Python* é invocada para abrir uma conexão com o BD central e realizar o *push*. Caso não seja possível estabelecer esta conexão, os dados são mantidos no BD local até que seja possível transferi-los.

3.2.3 Configurações OTA

A funcionalidade de configurações OTA é dependente da comunicação entre o servidor de aplicação e o nó sorvedouro. Na solução proposta, esta comunicação ocorre sob o protocolo *Simple Object Access Protocol* (SOAP), por meio do qual o servidor de aplicação realiza trocas de mensagens com o nó sorvedouro através da internet, invocando métodos remotos para configuração da rede. Devido à necessidade de gerenciamento do acesso a porta serial, a leitura dos *frames* foi implementada de forma síncrona e os comandos solicitados via SOAP, pelo servidor de aplicação, são enfileirados para envio. Os comandos de configuração, neste caso, são efetivados por meio de *frames* do tipo “*Remote AT Commands*”. O envio destes *frames* pode ser *unicast* ou *broadcast*.

Considerando *end devices* em modo *sleep* e a possibilidade de não conseguir efetuar uma configuração OTA imediatamente, as configurações definidas pelo usuário são armazenadas no BD central como agendamentos. Estes agendamentos possuem o *status* “pendente”, “efetuado”, “falhou”. O serviço, por sua vez, envia os *frames* e ao efetuar a configuração com sucesso, atualiza o status do agendamento no BD central.

4 AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL

Este capítulo objetiva apresentar a avaliação experimental da solução proposta, tanto do ponto de vista do novo método de planejamento, quanto do processo de adaptação de nós sensores para o acoplamento de elementos sensores necessários para a aplicação.

A avaliação foi realizada tendo como estudo de caso o monitoramento da qualidade da água na Bacia Hidrográfica do Rio Negro - RS (BHRN-RS), mais especificamente ao longo do Arroio Bagé. Ou seja, buscou-se avaliar o método de planejamento em um cenário representativo no que se refere a presença dos elementos que afetam a formação de uma RSSF em ambiente *outdoor*, com baixa densidade de nós e com distâncias significativas entre estes elementos.

A bacia do Rio Negro está localizada na região hidrográfica do Uruguai, e possui uma área total de aproximadamente 70.714 km². Parte da bacia hidrográfica do Rio Negro encontra-se em território brasileiro e constitui-se na unidade hidrográfica denominada U-80, de acordo com a divisão do Sistema Estadual de Recursos Hídricos do Rio Grande do Sul (SERH-RS). A BHRN-RS, abrange uma área de 3.007 km², cerca de 4.25% da área total da bacia (DAEB, 2007 apud SCHAFER; RICHA, 2015).

Segundo Costa (2013), o Arroio Bagé tem sua nascente localizada a nordeste do município de Bagé e tem seu escoamento predominantemente direcionado para sudoeste até a sua foz, no Arroio Quebrachinho que por fim, deságua no Rio Negro. O Arroio Bagé possui extensão de 25,83 km, dos quais aproximadamente 15,87% estão em área urbana.

Para a realização das operações das etapas previstas no protótipo de método descritas no capítulo 3, optou-se por utilizar o *software* GRASS GIS por ser *open source*, pela sua ampla utilização e quantidade razoável de material disponível para consulta. Dentre as operações realizadas estão: cálculo de *viewshed*; aplicação de álgebra de mapas; processamento e análise geral de mapas e dados.

Os mapas utilizados na aplicação do protótipo de método foram obtidos da Coletânea de Mapas da Bacia Hidrográfica do Rio Negro - RS de Schafer (2016). Dentre estes mapas estão: o MDE (SRTM) já recortado pelos limites da BHRN-RS; o mapa da BHRN-RS, em formato vetorial; da área urbana de Bagé, em formato vetorial; e dos cursos d'água, em formato vetorial. Descreve-se a seguir, nas seções 4.1, 4.2, 4.3 e 4.4, a aplicação do protótipo de método proposto.

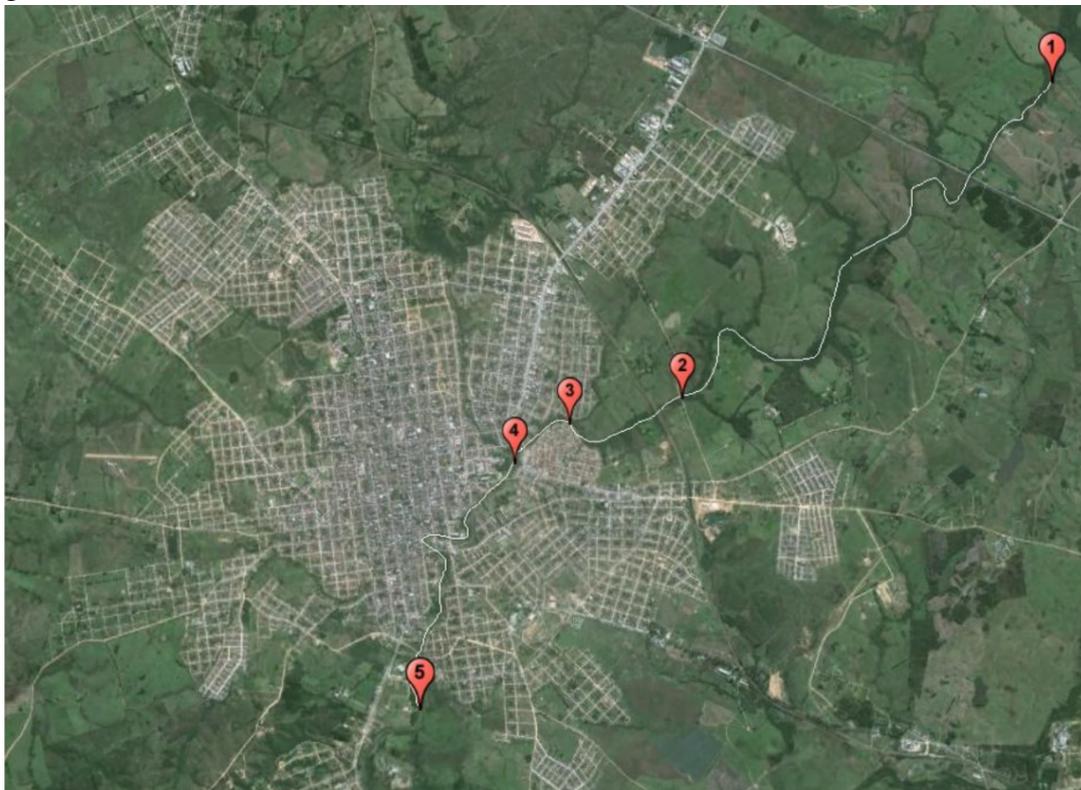
Como prova de conceito, foi também realizada uma avaliação da dificuldade de acoplamento de um sensor analógico resistivo, característica comum aos elementos de

sensoriamento dos parâmetros físico-químicos indicadores de qualidade da água, além da avaliação do subsistema de energia, ambas descritas na seção 4.5.

4.1 Definição dos pontos de monitoramento

Os pontos de monitoramento, como dito anteriormente, devem ser criteriosamente definidos pelos interessados em realizar o monitoramento, assim, utilizou-se como base para esta avaliação o estudo da qualidade da água no Arroio Bagé realizado por Costa (2013). Em seu estudo, Costa (2013) selecionou cinco pontos (figura 39) de monitoramento, ao longo do Arroio Bagé, de acordo com os seguintes critérios: ponto 1, escolhido pelo fato de que neste ponto ainda não houve lançamentos de esgoto industrial e/ou doméstico; nos pontos 2, 3, 4 e 5, o curso d'água já houve lançamento de esgoto, o que torna possível a comparação da qualidade da água à montante e à jusante dos lançamentos. Além destes, Costa (2013) também guiou sua escolha pelo acesso facilitado aos locais de monitoramento.

Figura 39 – Pontos de monitoramento



Fonte: GOOGLE (2013 apud COSTA, 2013)

Os pontos de monitoramento, quando georreferenciados, recebem a informação de localização geográfica. A localização geográfica dos pontos de monitoramento está indicada, abaixo, na tabela 7.

Tabela 7 – Localização geográfica dos pontos de monitoramento

Ponto	Latitude	Longitude
1	31° 17' 31"S	54° 2' 5"O
2	31° 19' 20"S	54° 4' 30"O
3	31° 19' 27"S	54° 5' 13"O
4	31° 19' 43"S	54° 5' 36"O
5	31° 21' 3"S	54° 6' 11"O

Fonte: adaptado de Costa (2013)

Estas localizações geográficas foram colocadas em um mapa no formato vetorial em forma de pontos e disponibilizado em Schafer (2016). Este mapa é utilizado juntamente com os demais, citados anteriormente, no desenvolvimento deste trabalho.

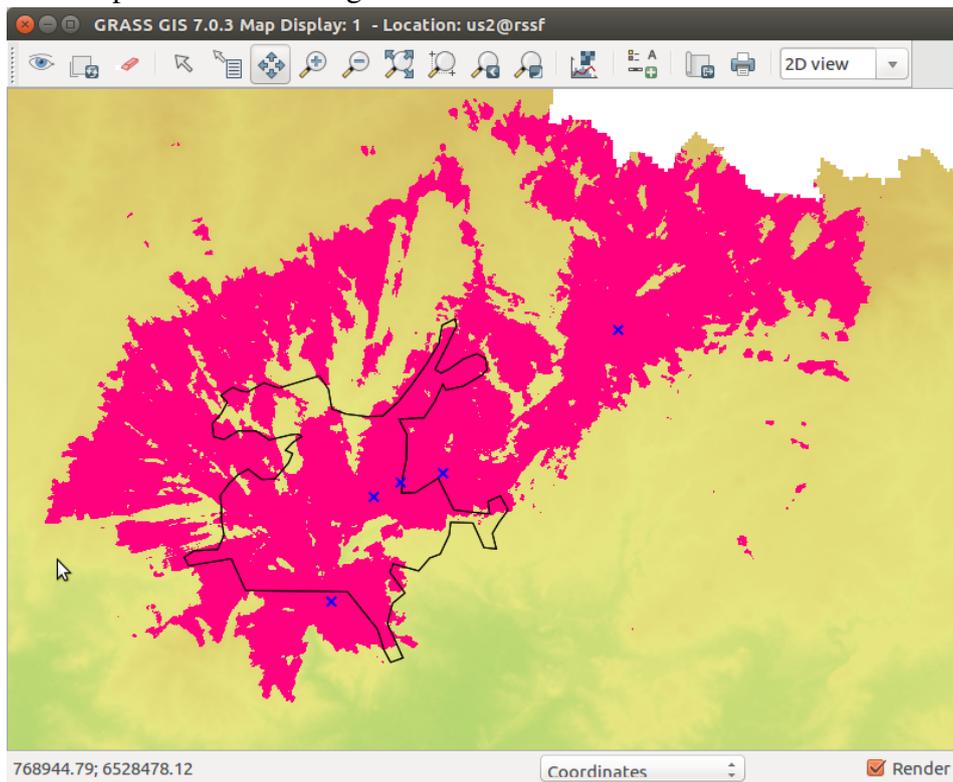
4.2 Áreas com potencial para instalação de elementos da rede

Para o levantamento das áreas com potencial para instalação de elementos de interconexão da RSSF foram realizados cálculos de *viewshed* utilizando o módulo *r.viewshed* disponível no GRASS. Nesta etapa os pontos de monitoramento são considerados os observadores.

A figura 40 apresenta uma junção de cinco mapas de visibilidade gerados pelo módulo *r.viewshed*. Cada mapas foi gerado tendo como observador um dos pontos de monitoramento, considerando tanto observador quanto alvo elevados em dez metros.

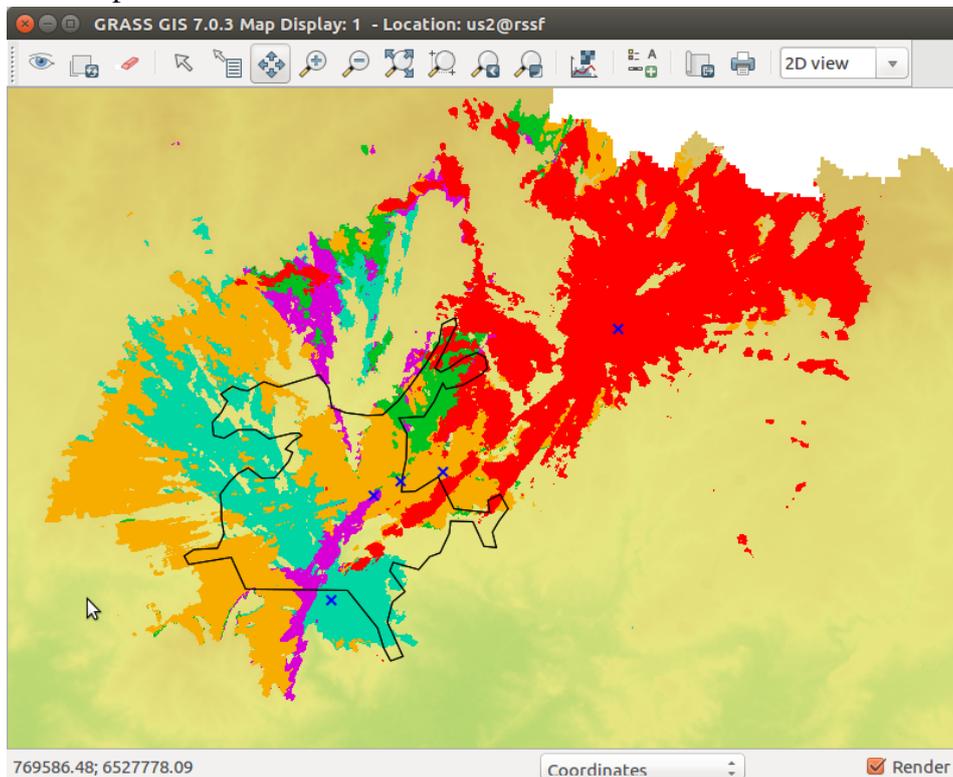
Todos os mapas gerados a partir do módulo *r.viewshed* possuem células que assumem valores 1 ou nulo, onde 1 indica visibilidade e nulo (*) a não visibilidade. Para viabilizar a identificação de quais pontos possuem visada para quais áreas, os mapas gerados foram reclassificados utilizando o módulo *r.reclass*, tendo como entrada um arquivo de regras para cada ponto de monitoramento.

Figura 40 – Mapa de visibilidade gerado



Fonte: Próprio autor (2016)

Figura 41 – Mapa de visibilidade reclassificado



Fonte: Próprio autor (2016)

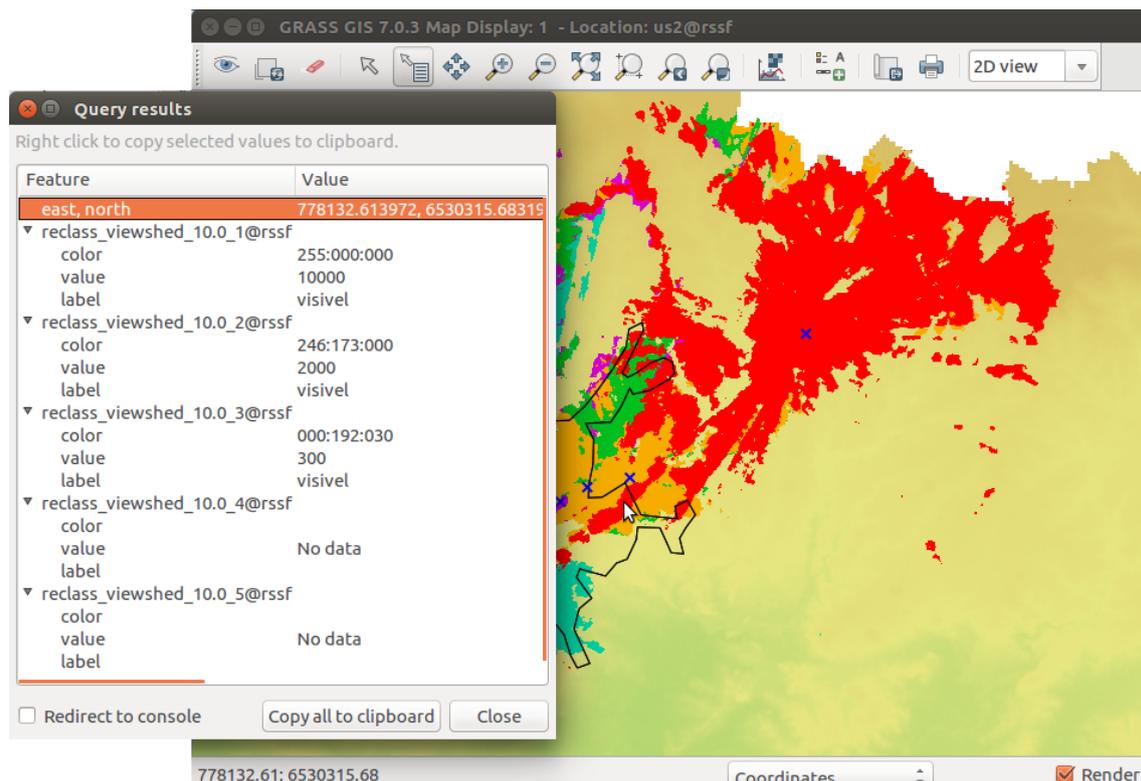
Tabela 8 – Regras para reclassificação dos mapas de visibilidade

Ponto	Regra	Ponto	Regra	Ponto	Regra
1	1 = 10000 visível * = 0	3	1 = 300 visível * = 0	5	1 = 5 visível * = 0
2	1 = 2000 visível * = 0	4	1 = 40 visível * = 0		

Fonte: Próprio autor (2016)

A figura 41 apresenta o mapa de visibilidade reclassificado e colorido de acordo com a classe. Cabe ressaltar que existem áreas de visibilidade em comum aos diferentes pontos de monitoramento, condição que fica nítida quando realizada uma consulta de valores em um determinado ponto como na figura 42

Figura 42 – Consulta aos valores dos mapas em um determinado ponto

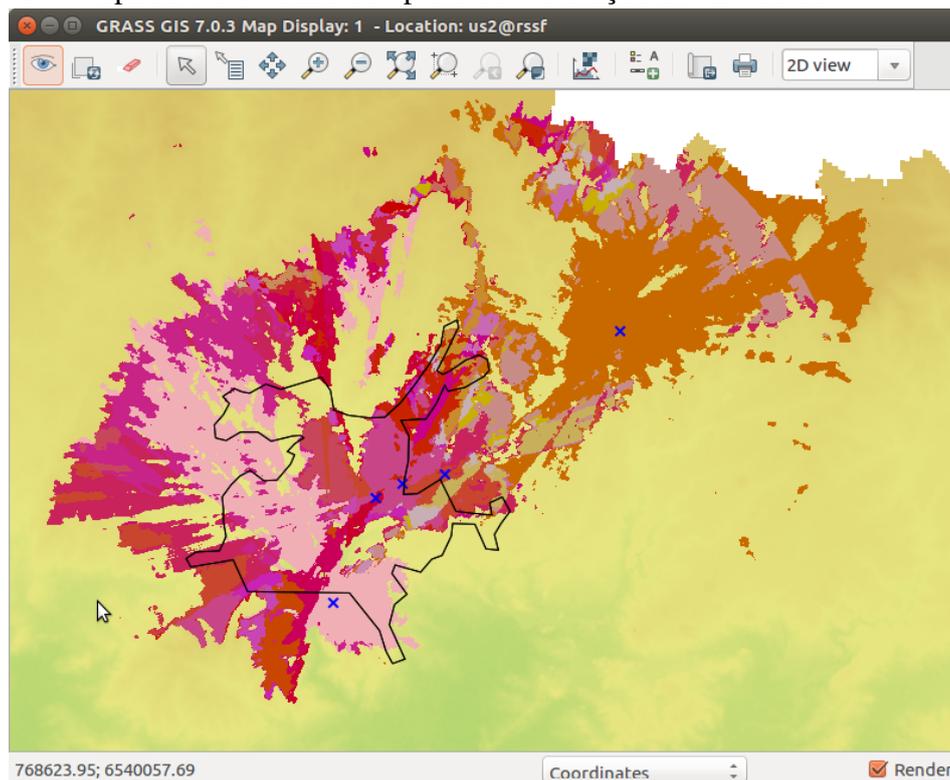


Fonte: Próprio autor (2016)

Na consulta da figura 42, o ponto cuja coordenada (*east, north*) é (778132.613972, 6530315.68319) possui visada direta com os pontos de monitoramento 1, 2 e 3. Nesta consulta, os pontos de monitoramento 4 e 5 possuem valores nulos, indicando a não visibilidade.

A próxima etapa consiste em gerar um novo mapa de visibilidade completo que indique para cada ponto do mapa quais pontos de monitoramento possuem visada direta para ele. Assim, foi utilizado o módulo *r.mapcalc* para aplicação da álgebra de mapas. A expressão algébrica aplicada é um somatório dos valores de todos os mapas de visibilidade com as mesmas elevações (observador e alvo) de todos os pontos de monitoramento.

Figura 43 – Mapa de visibilidade completo com elevação de 10 metros

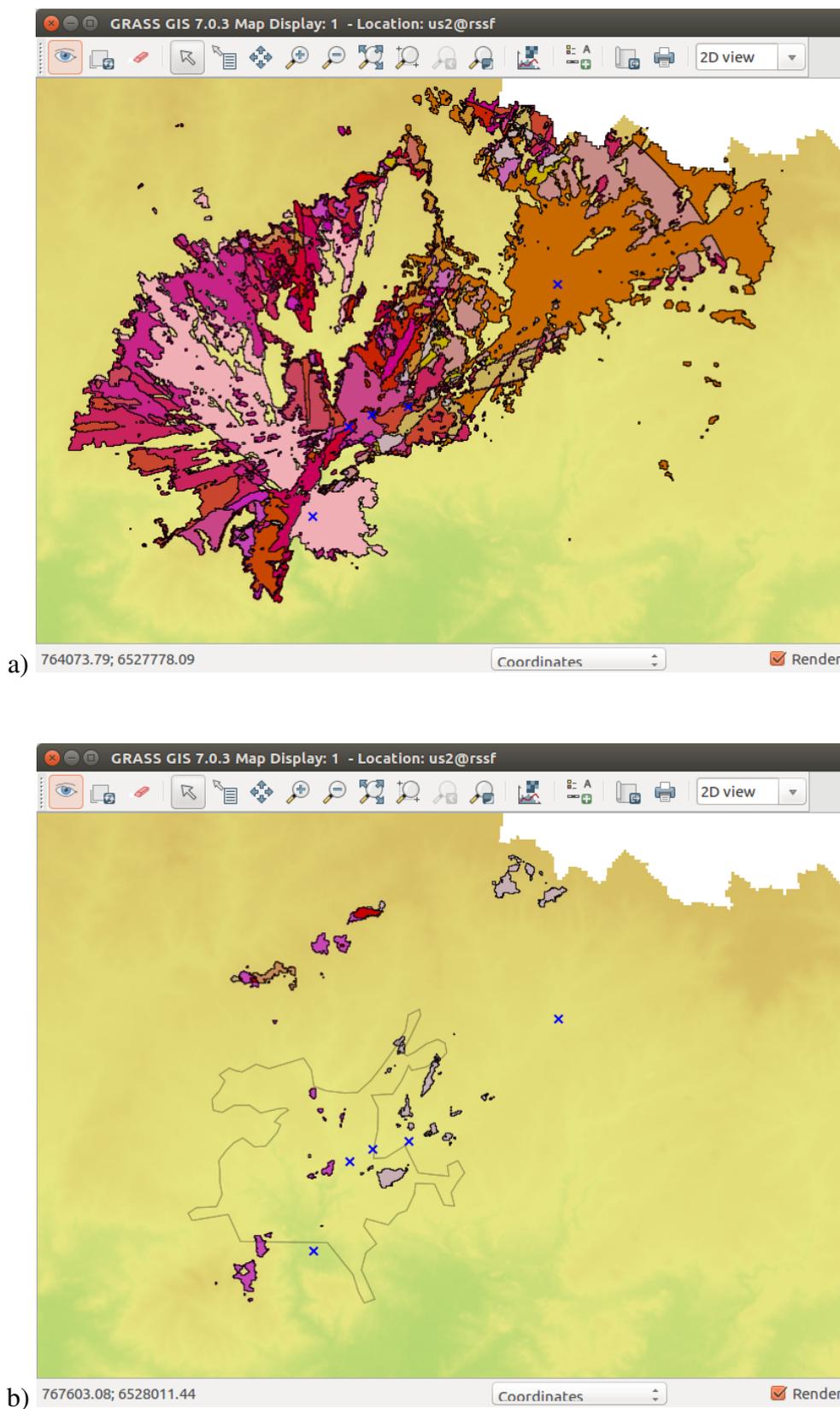


Fonte: Próprio autor (2016)

Com o objetivo de facilitar a extração das áreas com potencial para instalação de elementos de interconexão, foram gerados mapas vetoriais tendo como referência as classes do mapa de visibilidade completo. Para tanto utilizou-se o módulo *r.to.vect* que converte um mapa em formato matricial para vetorial (figura 44.a).

O processo de extração das áreas com potencial para instalação de elementos de interconexão foi realizado utilizando o módulo *v.extract*. O módulo *v.extract* extrai de um mapa vetorial todos os polígonos que satisfazem uma determinada condição. Neste caso, a condição para extração é a visibilidade em comum entre um determinado número de pontos de monitoramento. Neste estudo foram utilizados diversos critérios com o objetivo de avaliar o número máximo de pontos visíveis por área. Foram extraídas áreas representativas com visibilidade para quatro ou mais pontos de monitoramento, como ilustrado na figura 44.b.

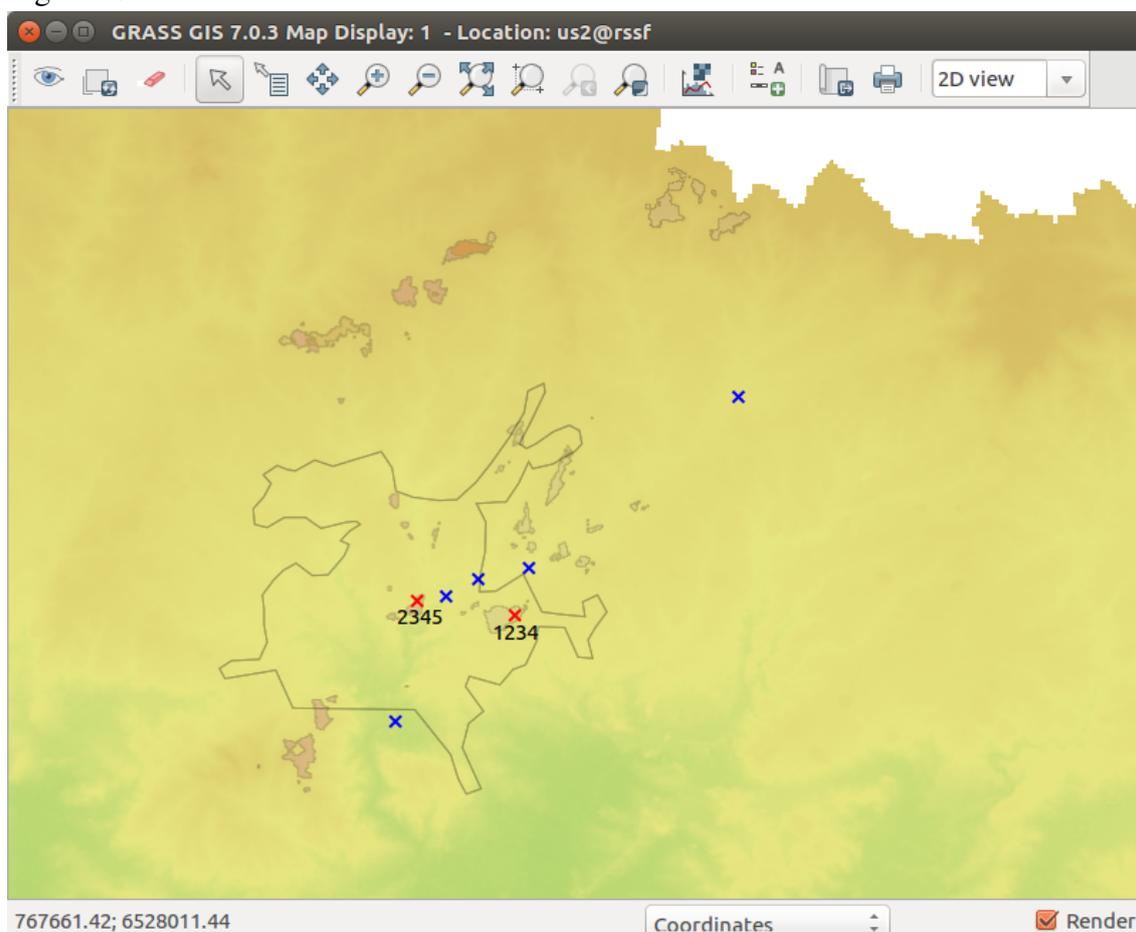
Figura 44 – Mapa vetorial de visibilidade e áreas extraídas



Fonte: Próprio autor (2016)

A identificação de pontos de maior relevância foi realizada por meio da análise empírica do MDE nas áreas extraídas, tendo como critério a localização das áreas em relação aos pontos de monitoramento e a altitude máxima nestas áreas. A figura 45 apresenta dois pontos (em vermelho) identificados como de maior relevância para a instalação de elementos de interconexão.

Figura 45 – Pontos de maior relevância



Fonte: Próprio autor (2016)

A metodologia seguida para identificação destes pontos garante que todos os pontos de monitoramento possuam visada para pelo menos um ponto de maior relevância considerando elevações de 10 metros. Assim, o ponto a esquerda (denominado de “1234”) possui visada para os pontos 1, 2, 3 e 4, enquanto o ponto mais a direita (denominado de “2345”) possui visada para os pontos 2, 3, 4 e 5.

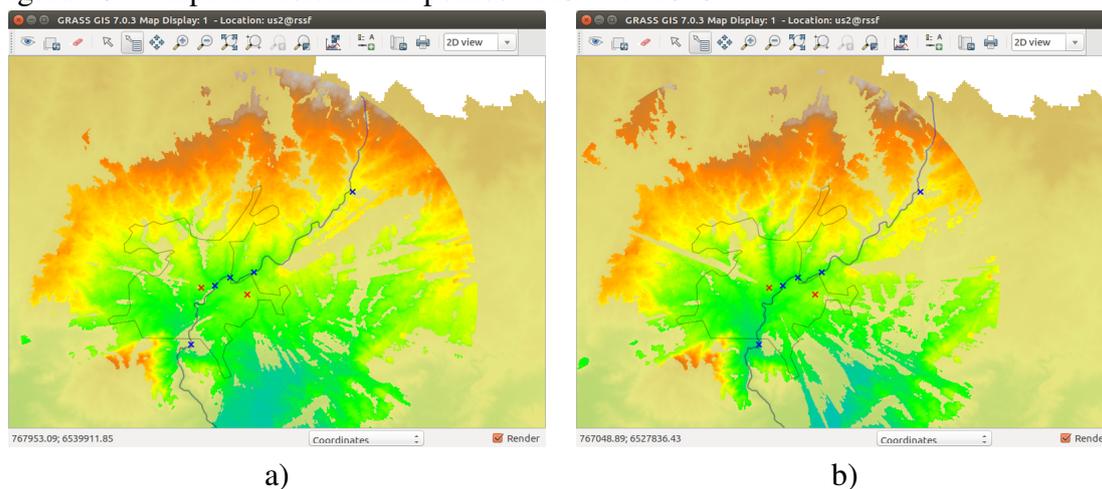
4.3 Otimização da solução

Observa-se, na figura 45, que os pontos de monitoramento 2, 3 e 4 possuem visada para ambos os pontos de maior relevância, enquanto os pontos 1 e 5 não possuem visada para um ponto de maior relevância em comum. Em outras palavras, existe o problema de LOS entre os pontos 1 e 5 e os pontos de maior relevância “2345” e “1234” respectivamente. Esta é o principal indício de que existe a possibilidade de minimização do custo da solução com a redução do número de elemento de interconexão. A próxima subseção apresenta uma discussão sobre as alternativas para solução do problema de LOS neste cenário.

4.3.1 Alternativas para o problema de LOS

Na Subseção 3.1.3 são identificadas três possíveis soluções para o problema de LOS: inserção de elementos intermediários no rádio enlace; exploração do efeito *multipath*; e o ajuste nos pontos de monitoramento. Esta última foi identificada em um primeiro momento com maior potencial para resolução do problema no cenário estudado. Para tanto foi realizado o cálculo de *viewshed* tendo como observadores os pontos “1234” e “2345” com elevações de 10 metros.

Figura 46 – Mapa de visibilidade pontos “1234” e “2345”

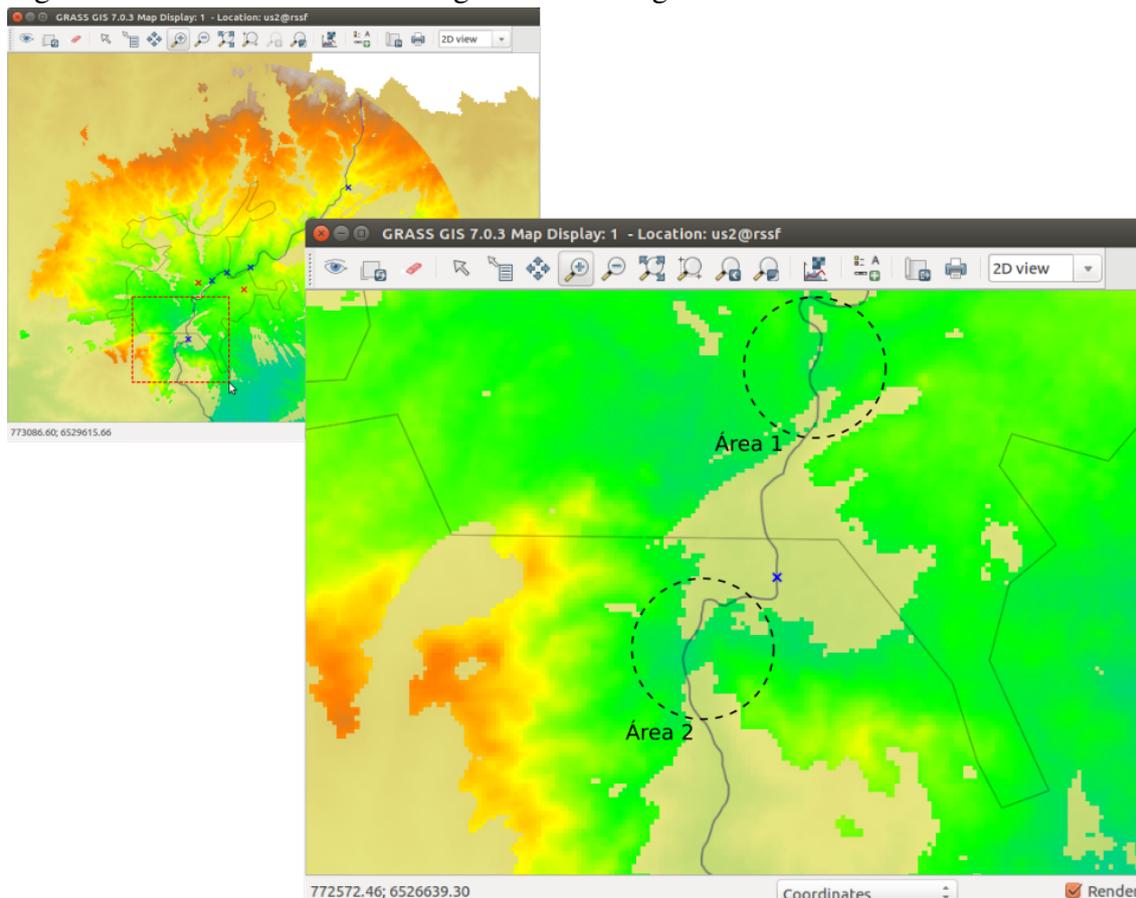


Fonte: Próprio autor (2016)

Diferentemente dos outros cálculos de *viewshed* realizados, o mapa resultante deste terá valores nulos (*) quando não houver visibilidade e valores de diferença de altitude entre observador e alvo nos pontos em que houver visibilidade. Estes

mapas permitem identificar posições de visibilidade ao longo do curso d'água cujo reposicionamento do ponto de monitoramento crítico torne viável o estabelecimento da rede com apenas um dos dois elementos de interconexão. A seguir, pode ser observado o estudo de reposicionamento do ponto de monitoramento 5.

Figura 47 – Áreas de visada ao longo do curso d'água

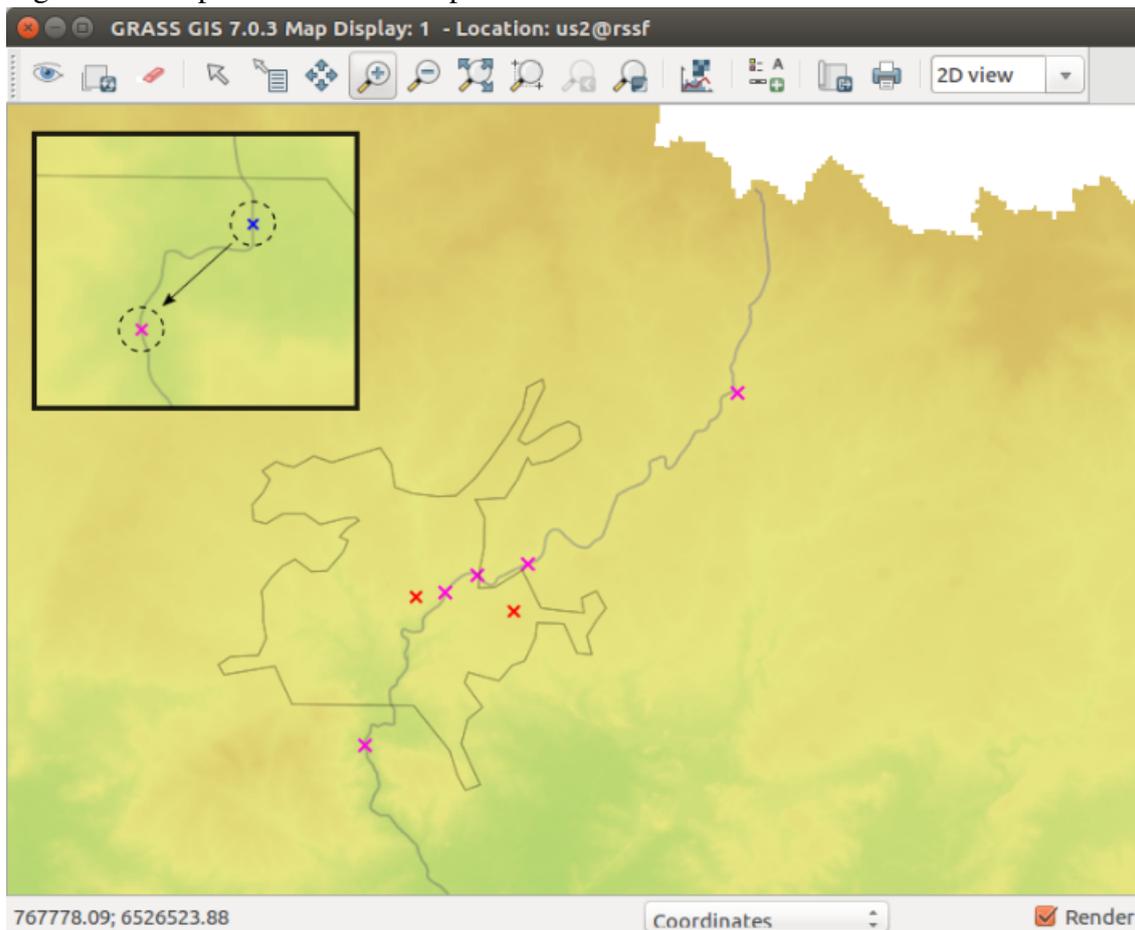


Fonte: Próprio autor (2016)

Duas áreas que possuem uma porção de pontos com visada para o ponto “1234” estão destacadas na figura 47. A Área 1 está localizada no interior da área urbana e é logo descartada pois o critério que espacializa o ponto 5 é a sua localização após a zona urbana. Já a Área 2, além de englobar posições com visada para o ponto “1234”, satisfaz o critério que espacializa o ponto 5, que é estar localizado após a área urbana.

A partir desta análise, o ponto de monitoramento 5 foi reposicionado. Para facilitar as próximas etapas e permitir uma comparação entre as diferentes configurações de posicionamento, um novo mapa vetorial dos pontos de monitoramento foi criado.

Figura 48 – Reposicionamento do ponto de monitoramento 5



Fonte: Próprio autor (2016)

A subseção a seguir discute o procedimento para realização do cálculo da elevação mínima das antenas.

4.3.2 Elevação mínima das antenas

O cálculo da elevação mínima além de definir a menor altura possível para cada uma das antenas, permitirá determinar a configuração da topologia da rede que melhor minimiza o custo em infraestrutura da solução. Este cálculo pode ser sintetizado em 3 etapas: cálculo de viewshed para diferentes alturas; recodificação dos mapas de visibilidade; gerar mapa de elevações mínimas pela aplicação da álgebra de mapas.

O procedimento para geração do mapa de elevações mínimas inicia com o cálculo de viewshed para diferentes alturas tendo como observador os pontos “1234” e “2345”. Neste estudo foram determinadas alturas para o observador de 4 a 15 metros com intervalos de 0,5 metros, e para os alvos foram consideradas alturas de 0 a 10 metros

também com intervalos de 0,5 metros. Foram gerados, nesta primeira etapa, 483 mapas de visibilidade para cada um dos dois pontos observadores, um total de 966 mapas.

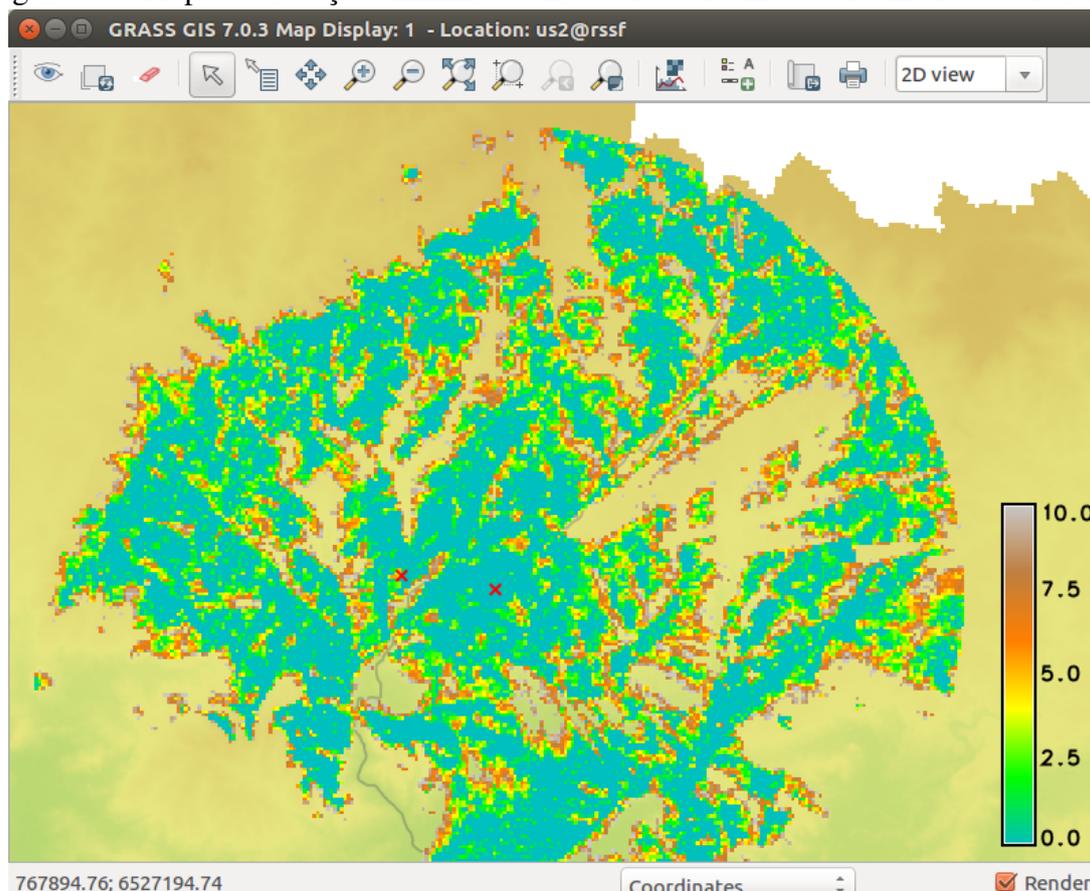
Foi realizada a recodificação dos mapas de visibilidade, usando o módulo *r.recode*, para que as células com valor 1 (visível) passassem a ter o valor de altura do alvo utilizada no seu cálculo e as com valor 0 passassem a ser nulos (*). A tabela 9 apresenta o formato das regras de recodificação do mapa.

Tabela 9 – Regra para recodificação dos mapas de visibilidade

Altura do Alvo	Regra de Recodificação
H	1:1:H:H
	0:0:NULL:NULL

Fonte: Próprio autor (2016)

Figura 49 – Mapa de elevações mínimas com observador “1234” a 10 metros de altura



Fonte: Próprio autor (2016)

A figura 49 apresenta um dos mapas resultantes do processo de aplicação da expressão algébrica no módulo de álgebra de mapas *r.mapcalc*, para geração dos mapas

de elevações mínimas para cada um dos pontos “1234” e “2345” e alturas (4 a 15 a cada 0,5 metros). Nesta etapa foram gerados 46 mapas de alturas mínimas.

É desde conjunto de 46 mapas que foram extraídos os dados de altura das antenas para a análise de sensibilidade. Foram extraídos, utilizando o módulo *r.what*, dados de altura de todos os pontos de monitoramento nos 46 mapas, gerando a tabela 10.

Tabela 10 – Dados de altura mínima das antenas

Altura do Observador 1234 – Original																									
Pt.	4	4,5	5	5,5	6	6,5	7	7,5	8	8,5	9	9,5	10	10,5	11	11,5	12	12,5	13	13,5	14	14,5	15		
1	2,5	2	1,5	1	1	0,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
2	6	6	5,5	5,5	5,5	5,5	5	5	5	4,5	4,5	4,5	4,5	4	4	4	4	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	
3	1	1	1	1	1	1	1	1	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	
4	8	7,5	7,5	7,5	7,5	7	7	7	7	6,5	6,5	6,5	6,5	6	6	6	6	5,5	5,5	5,5	5,5	5	5	5	
5	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	21,5	21	20,5	20,5	21	20,5	20	20,5	20,5	20	20,5	21	21,5	21	21,5	22	22,5	22	22,5	23	23,5	23,5	24		
Altura do Observador 2345 – Original																									
Pt.	4	4,5	5	5,5	6	6,5	7	7,5	8	8,5	9	9,5	10	10,5	11	11,5	12	12,5	13	13,5	14	14,5	15		
1	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	10	9,5	9	9	
2	1,5	1,5	1,5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	
3	5	5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	
4	8	8	8	8	8	8	8	8	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5	7	7	7	7	7	7	7	
5	8	8	7,5	7,5	7	7	6,5	6,5	6,5	6	6	5,5	5,5	5	5	5	4,5	4,5	4	4	3,5	3,5	3,5	3,5	
	26,5	27	26,5	26,5	26,5	27	27	27,5	27,5	28	28	28,5	28	28,5	29	28,5	28,5	28,5	28,5	39	38,5	38,5	39		
Altura do Observador 1234 – Com reposicionamento do ponto 5																									
Pt.	4	4,5	5	5,5	6	6,5	7	7,5	8	8,5	9	9,5	10	10,5	11	11,5	12	12,5	13	13,5	14	14,5	15		
1	2,5	2	1,5	1	1	0,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
2	6	6	5,5	5,5	5,5	5,5	5	5	5	4,5	4,5	4,5	4,5	4	4	4	4	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	
3	1	1	1	1	1	1	1	1	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	
4	8	7,5	7,5	7,5	7,5	7	7	7	7	6,5	6,5	6,5	6,5	6	6	6	6	5,5	5,5	5,5	5,5	5	5	5	
5	9	8,5	8	7,5	7	6,5	6	6	5,5	5	4,5	4	3,5	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	
	30,5	29,5	28,5	28	28	27	26	26,5	26	25	25	25	25	24	24,5	25	25,5	25	25,5	25	25,5	26	26,5	26,5	27
Altura do Observador 2345 – Com reposicionamento do ponto 5																									
Pt.	4	4,5	5	5,5	6	6,5	7	7,5	8	8,5	9	9,5	10	10,5	11	11,5	12	12,5	13	13,5	14	14,5	15		
1	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	10	9,5	9	9	
2	1,5	1,5	1,5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	
3	5	5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	
4	8	8	8	8	8	8	8	8	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5	7	7	7	7	7	7	7	
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	18,5	19	19	19	19,5	20	20,5	21	21	21,5	22	22,5	23	23	23,5	24	24	24	24,5	25	25	25	25	25,5	25,5

Fonte: Próprio autor (2016)

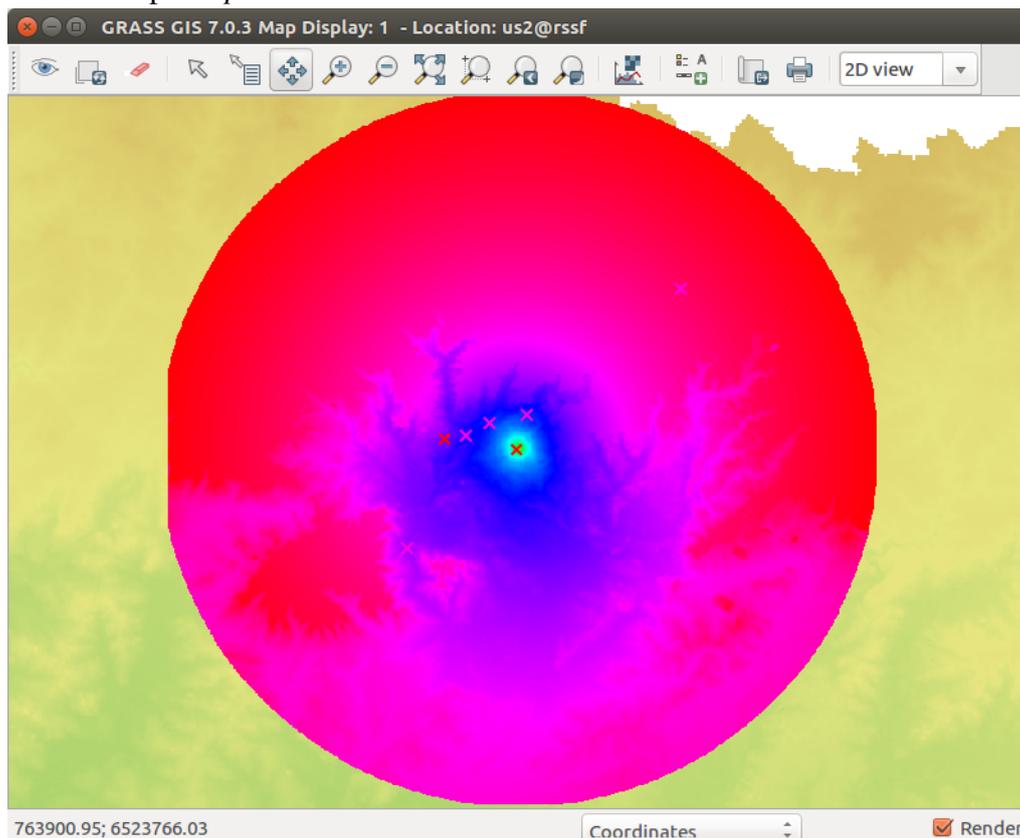
Sobre esta tabela foi realizada uma análise empírica da variação do total de infraestrutura, em termos da altura, em relação a quantidade total de elementos. Esta análise permitiu a comparação entre a primeira solução com a solução após o reposicionamento do ponto de monitoramento 5.

As células destacadas em verde indicam as alturas do observador identificadas como de menor custo, tendo como métrica o somatório da coluna referente. A partir desta identificação foram avaliadas quais, dentre estas alturas, resultam na menor altura de cada um dos pontos de monitoramento (primeira coluna a esquerda) e destacadas em amarelo. Em especial, na solução com o reposicionamento do ponto 5, o ponto 2 seria melhor atendido pelo observador “2345”, porém gera um custo menor quando atendido pelo observador “1234”. A solução original teria custo total, em metros, de infraestrutura de 29,5 metros com pelo menos sete elementos. Já a solução com o reposicionamento do ponto 5 tem um custo total de 24 metros e com pelo menos seis elementos.

4.4 Análise de *Path Loss* e Cálculo do *Link Budget*

Uma análise preliminar de *path loss* foi realizada utilizando módulos específicos do GRASS-RaPlaT. O módulo *r.cost231* implementa o modelo empírico COST231, que estende o modelo de Okumura-Hata para a banda de 1500 a 2000 MHz (OZIMEK et al., 2013).

Figura 50 – Mapa de *path loss* obtido com *r.cost231*



Fonte: Próprio autor (2016)

Apesar da limitação em relação a banda de frequência para a qual este modelo foi proposto, sua aplicação permite ter uma estimativa de *path loss*, pois o comportamento geral da propagação é o mesmo exceto pelo aumento de *path loss* com a elevação da frequência para 2,4 GHz. A figura 50 ilustra o resultado da aplicação do modelo COST231, tendo como parâmetros a frequência de 2,4 GHz, um raio de aplicação de 10 km e uma elevação da antena de 13,5 metros.

Tendo definido os possíveis rádio enlaces da rede, o mapa da figura 50 permite a extração do perfil de *path loss* do enlace, a partir do qual é possível fazer o cálculo do *link budget*. A análise de *path loss* e cálculo do *link budget* servirão de base para a definição das características das antenas de cada rádio enlace, principalmente em relação ao ganho.

4.5 Acoplamento de elementos sensores

Como prova de conceito para avaliação da dificuldade de acoplamento de um elemento sensor genérico ao nó sensor, foram realizados estudos e realizado o acoplamento de um sensor resistivo à um nó Xbee S2, fabricado pela Digi.

Para tanto foi utilizado o sensor de umidade Watermark modelo 200SS (figura 51). O Watermark é um sensor de umidade de matriz granular do grupo de sensores do método tensiométrico. Possui eletrodos inseridos em um material granular de quartzo, envolvido por uma camada sintética e uma malha metálica de proteção. O gesso em seu interior tem a função de amenizar efeitos da salinidade do solo (BENEDI; CARPENA, 2005 e IRROMETER, 2012 apud PEREIRA, 2014).

Figura 51 – Sensor de umidade Watermark modelo 200SS



Fonte: IRROMETER (2012 apud PEREIRA, 2014)

Figura 52 – XBee Sensor ZB L/T/H (XS-Z16-CB2R)



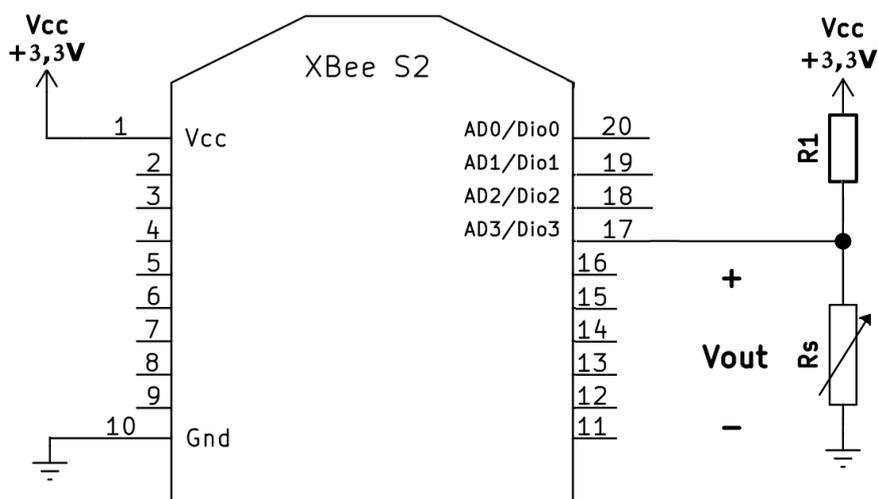
Fonte: Digi International (2015)

Foi realizado um estudo do seu acoplamento ao XBee Sensor ZB L/T/H (XS-Z16-CB2R), que é um nó sensor da família de kits XBee Sensor que implementam o protocolo ZigBee. Ilustração deste sensor na figura 52.

Inicialmente identificou-se um desafio na adaptação do XBee Sensor, devido ao seu número limitado de porta analógicas, ligadas à ADCs internos. Três das quatro portas analógicas (17 a 20) disponíveis no XBee S2, acoplado ao XBee Sensor, estão originalmente ligadas aos sensores de luminosidade, temperatura e umidade. Uma quarta porta analógica está vinculada a função “*commissioning button*” do dispositivo (Digi International, 2016a). Assim, buscou-se, em um primeiro momento, realizar o acoplamento do *Watermark* diretamente no módulo de rádio XBee S2. Para tanto, utilizou-se a placa de desenvolvimento (*interface board*). Segundo Digi International (2015), os pinos 17 a 20 podem ser configurações como entradas analógicas, assim foi definido o pino 17 para acoplamento do *Watermark*.

O módulo XBee S2 deve ser alimentado com uma fonte de corrente contínua entre 2,8 e 3,6 V. A tensão máxima de entrada nas portas analógicas deste módulo é de 1,2 V (V_{ref}). Quando inserido na *interface board*, o XBee S2 é alimentado com uma tensão regulada de 3,3 V, denominada de V_{cc} (Digi International, 2016b).

Figura 53 – Diagrama elétrico de acoplamento do sensor ao XBee S2



Fonte: Próprio autor (2016)

O *Watermark* é um sensor resistivo que varia sua resistência, de acordo com a tensão de água do solo, de 250 Ω a 28,05 k Ω , o que corresponde a variação de tensão de 0 a 100 kPa (Libelium Comunicaciones Distribuidas S.L., 2015). A solução proposta para o acoplamento deste sensor ao módulo de rádio consiste em um divisor de tensão, cuja

configuração coloca a entrada analógica escolhida em nível máximo de tensão quando o Watermark estiver apresentando resistência máxima.

Abaixo, é apresentada a equação 8 para cálculo das resistências utilizadas no divisor de tensão. Considerando a tensão de entrada (V_{cc}), a resistência máxima (R_{Smax}) do sensor e a tensão máxima (V_{ref} ou V_{out} do divisor de tensão) suportada pela porta analógica do XBee S2.

$$V_{out} = V_{cc} * \frac{R_{Smax}}{R_1 + R_{Smax}} \quad (8)$$

A aplicação da equação 8 determina a utilização de um resistor (R_1) de 49,0875 k Ω . Levando em consideração os resistores comerciais e a disponibilidade, (R_1) foi substituído por uma resistência próxima equivalente composta por dois resistores, um de 47 k Ω e um de 2,2 k Ω , totalizando 49,2 k Ω . Cabe ressaltar a importância de utilizar uma resistência equivalente maior ou igual à determinada pela equação, pois do contrário a configuração de maior resistência do sensor colocaria em risco a integridade do circuito.

A validação funcional do acoplamento foi realizada utilizando o XStick (produzido pela Digi), que é um adaptador de módulo de rádio XBee periférico de curto alcance que funciona conectado a uma interface USB.

Figura 54 – XStick USB adapter



Fonte: Digi International (2016b)

Para a obtenção e conversão dos dados de leitura foi desenvolvido um programa em linguagem Python, que obtém os dados e os salva em um arquivo texto. Este programa tem como principal biblioteca a “XBee 2.2.3”, utilizando o dispositivo XStick como *ZigBee Device* na condição de coordenador da rede. O módulo de rádio foi configurado para realizar leituras a cada 10 segundos. O ADC do XBee é de 10 bits, o que representa 1024 níveis de tensão possíveis de leitura que, para uma V_{ref} de 1,2 V resulta numa resolução de 1,17 mV/div (milivolts por divisão). Considerando estas configurações, as

equações 9 e 10 permitem obter o valor da resistência (R_S) do Watermark.

$$V_{out} = \frac{1,2 * X}{1023} \quad (9)$$

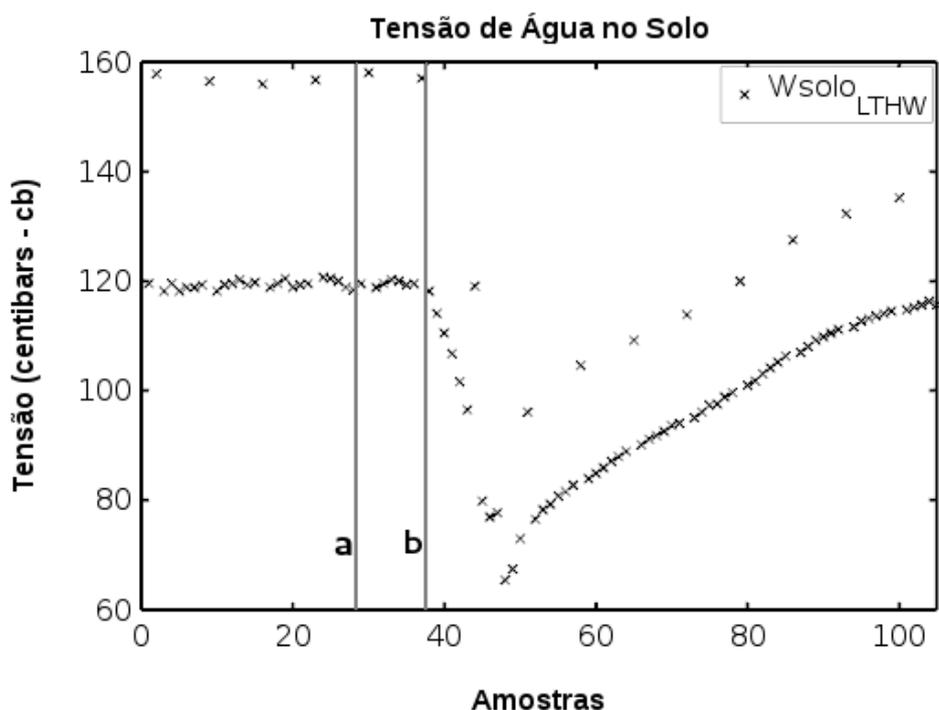
$$R_S = \frac{R_1}{\frac{V_{cc}}{V_{out}} - 1} \quad (10)$$

Na equação 9, X é a leitura digital do ADC. Já a equação 11, segundo Libelium Comunicaciones Distribuidas S.L. (2015), é a equação que descreve a tensão de água no solo, expressa em *centibars*, em função da resistência do sensor.

$$TA = \frac{R_S - 550}{137,5} \quad (11)$$

O procedimento experimental adotado consiste na leitura da tensão de água antes e após a inserção do sensor em um recipiente com água. O instante a indicado no gráfico da figura 55, indica o instante em que o sensor foi colocado em contato com a água e no instante b a efetiva alteração das leituras.

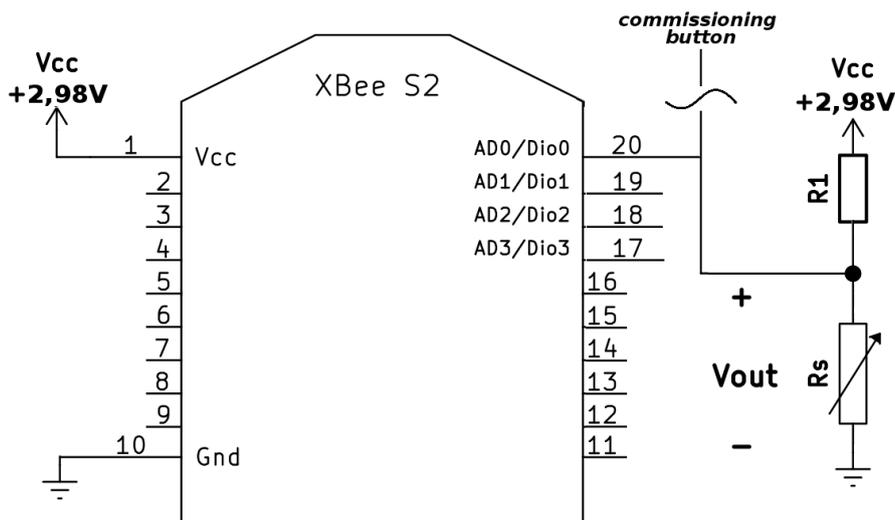
Figura 55 – Leitura da tensão de água em centibars



Os dados coletados ainda não foram tratados. Observa-se a existência de valores atípicos (*outliers*), por isso a necessidade de realizar o tratamento destes dados.

Após estudos detalhados do XBee Sensor ZB L/T/H (XS-Z16-CB2R), verificou-se que a função “*commissioning button*”, supracitada, não possui utilidade na solução proposta. Assim, optou-se por desativá-la e realizar o acoplamento do *Watermark* na porta analógica em questão. Para efetivar o acoplamento, a trilha da placa do dispositivo referente à funcionalidade foi interrompida e conexões foram realizadas diretamente nos terminais do *socket* de conexão do módulo de comunicação. O diagrama de acoplamento e a adaptação física do nó sensor estão apresentados, respectivamente, nas figuras 56 e 57. Adicionalmente foi adaptada outra unidade do mesmo dispositivo para sensoriamento de temperatura por meio do sensor termorresistivo, modelo S2029, fabricado pela Squitter Soluções em Monitoramento Ambiental (<http://www.squitter.com.br/>).

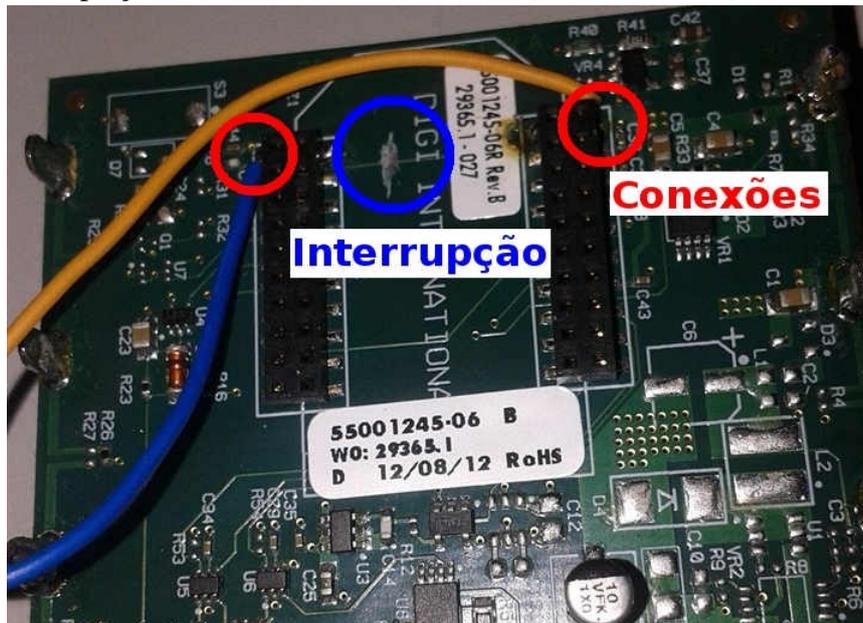
Figura 56 – Diagrama elétrico de acoplamento do sensor ao XBee Sensor



Fonte: Próprio autor (2016)

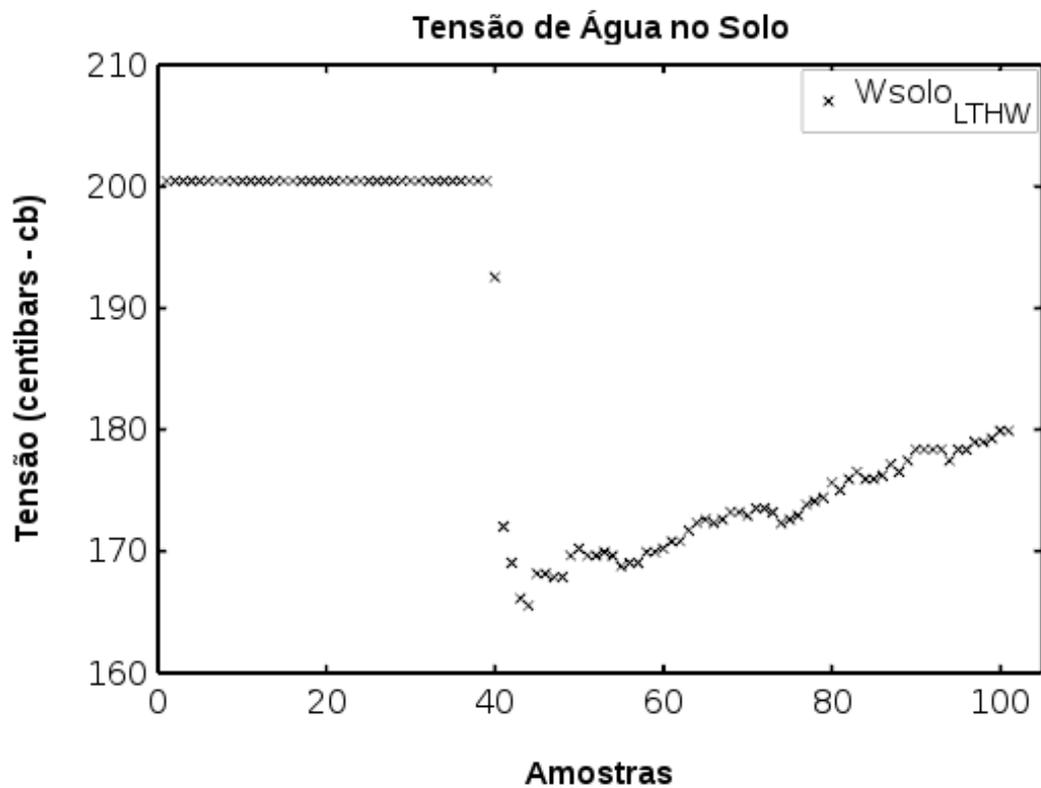
Da mesma forma, a avaliação experimental do funcionamento dos sensores acoplados aos kits XBee Sensor foi realizada por meio da formação de uma RSSF contendo três tipos de elementos sensores: um original, denominado LTH; um adaptado com o sensor de umidade do solo, denominado LTHW; e um adaptado com o sensor de temperatura do solo, denominado LTHT. Estes três tipos de sensores foram submetidos a variações de luminosidade, umidade e temperatura, respectivamente. As figuras 58 e 59 apresentam gráficos contendo dados amostrados pelos nós adaptados e coletados por meio da rede.

Figura 57 – Adaptação do XBee Sensor ZB L/T/H (XS-Z16-CB2R)



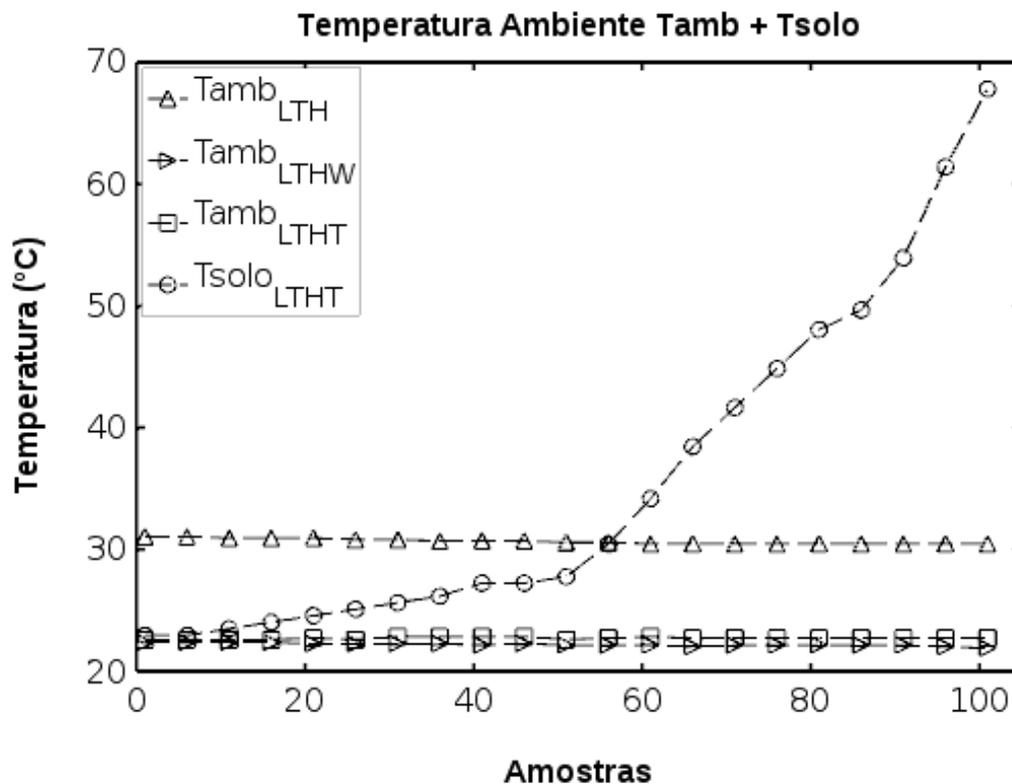
Fonte: Próprio autor (2016)

Figura 58 – Amostragem de tensão de água no solo



Fonte: Próprio autor (2016)

Figura 59 – Amostragem de temperatura do solo e do ambiente



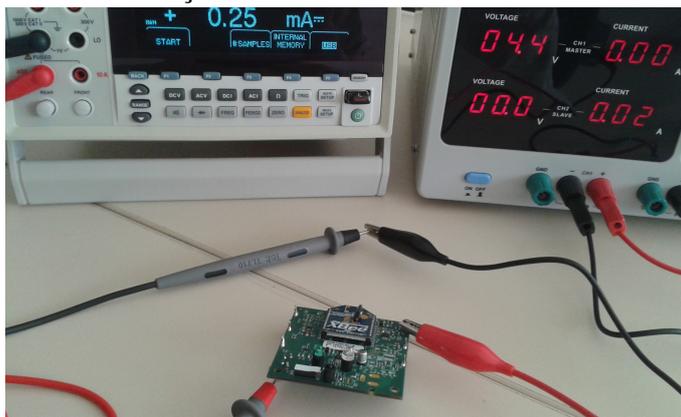
Fonte: Próprio autor (2016)

4.6 Avaliação do subsistema de energia

Para que seja possível dimensionar esse subsistema faz-se necessário conhecer o consumo de energia dos elementos da rede durante seus ciclos de atividade. Casilari et al. (2010) apresenta experimentos desenvolvidos para modelar empiricamente o consumo de energia de nós sensores comerciais que implementam toda a pilha de protocolo IEEE 802.15.4/ZigBee. Esta modelagem permite prever a vida útil das baterias em uma RSSF.

Assim, foi realizada uma avaliação do subsistema de energia de um XBee Sensor ZB L/T/H (XS-Z16-CB2R), objetivando identificar o consumo de energia durante o seu ciclo de atividade. Para a realização desta avaliação experimental foi utilizada uma fonte de tensão regulável, modelo MPL-3303M fabricada pela Minipa, ajustada em 4,5 V (tensão de alimentação do dispositivo) com o auxílio de um multímetro digital de precisão, modelo DMM4040, fabricado pela Tektronix. Tendo realizado este ajuste, o multímetro foi configurado para amostrar corrente (contínua) e conectado em série com o dispositivo a ser analisado, conforme apresentado na figura 60.

Figura 60 – Ambiente de avaliação

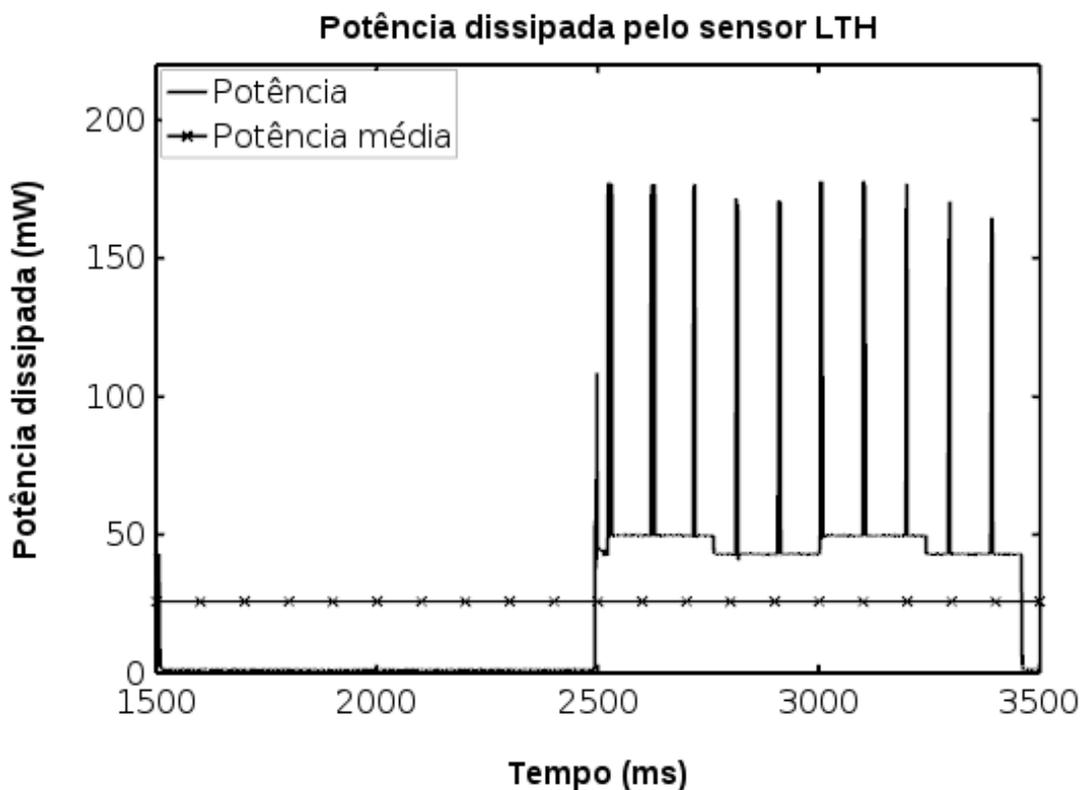


Fonte: Próprio autor (2016)

Um parâmetro importante a ser ajustado, para que seja possível analisar os diferentes níveis de consumo durante o ciclo de atividade do nó sensor, é a frequência de amostragem. Neste experimento, o multímetro foi configurado para se obter uma frequência de amostragem de aproximadamente mil amostras por segundo.

A figura 61 apresenta o gráfico de potência dissipada pelo sensor LTH ao longo de um ciclo de atividade.

Figura 61 – Potência dissipada em um ciclo de atividade

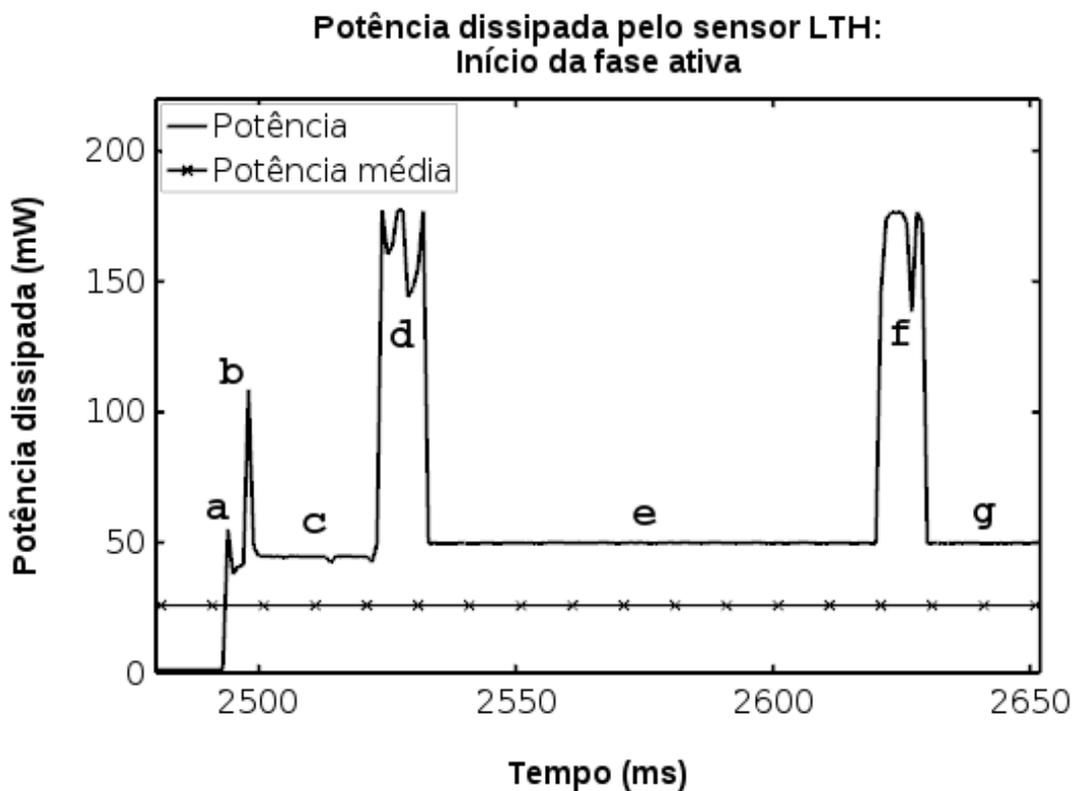


Fonte: Próprio autor (2016)

O gráfico apresenta duas fases significativamente distintas, sendo que na primeira (de 1500 a 2500 *ms*) o nó sensor está na fase *sleep*, enquanto que na segunda (de 2500 a 3500 *ms*) o nó sensor está na sua fase ativa. Na fase ativa aparecem dois degraus da componente DC (contínua), relacionados à função *Associate LED Blink*, que sinaliza o estado de associação do elemento sensor. Os picos existentes ao longo da fase ativa estão relacionados, além do envio, com o mecanismo de *polling*. A frequência com que ocorrem é determinada pelos comandos LT (*Associate LED Blink Time*) e PO (*Polling Rate*) cujos valores *default* são, respectivamente, 250 *ms* e 100 *ms* (Digi International, 2016b).

Para melhor visualização, a figura 62 apresenta o gráfico de potência dissipada pelo sensor LTH no início da sua fase ativa (de 2480 a 2650 *ms*).

Figura 62 – Potência dissipada no início da fase ativa

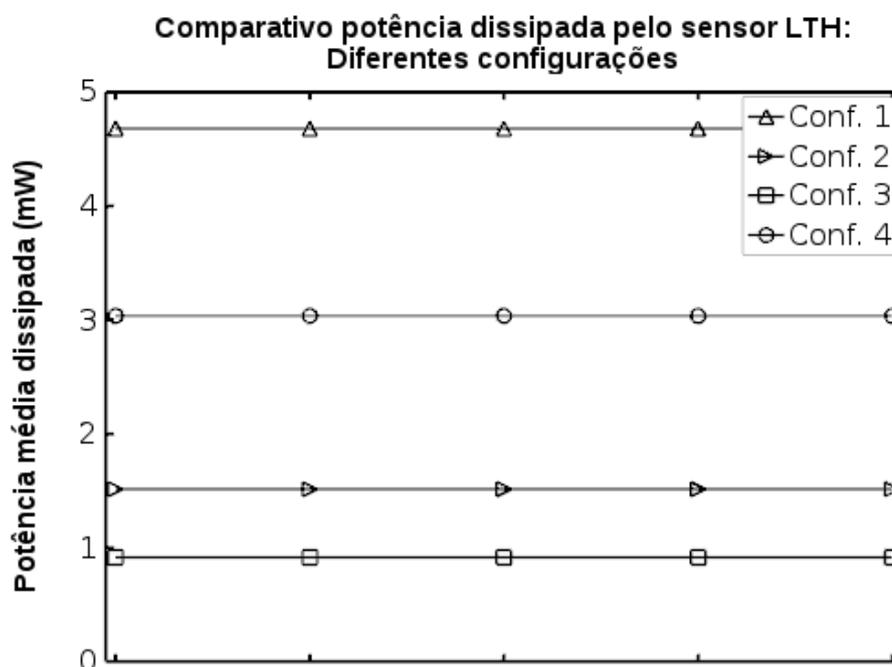


Fonte: Próprio autor (2016)

No instante *a*, o nó sensor sai do estado *sleep* e passa a estar ativo. No instante *b*, ocorre a verificação do estado da rede e comunicação com o nó pai. Nos intervalos *c*, *e* e *g*, permanece em estado *idle* e nos instantes *d* e *f* ocorre o envio dos dados e o *polling*. O degrau existente nos intervalos *e* e *g*, em relação ao intervalo *c*, corresponde à ativação do LED.

Logo percebe-se algum impacto destes dois mecanismos no consumo total de energia ao longo do ciclo de atividade. O mecanismo de *polling* é indesejado se não for um requisito da aplicação, pois além de aumentar o consumo de energia, aumenta o tráfego da rede e pode ser um problema em redes muito densas. Da mesma forma o LED, se não for um requisito da aplicação, estará desperdiçando energia útil do sistema. Neste sentido foram avaliadas diferentes configurações. A figura 63 apresenta o gráfico de comparativo da potência média dissipada pelo sensor LTH, em diferentes configurações, durante seu ciclo de atividade.

Figura 63 – Comparativo da potência média dissipada



Fonte: Próprio autor (2016)

A tabela 11 apresenta os valores atribuídos para os parâmetros das configurações avaliadas.

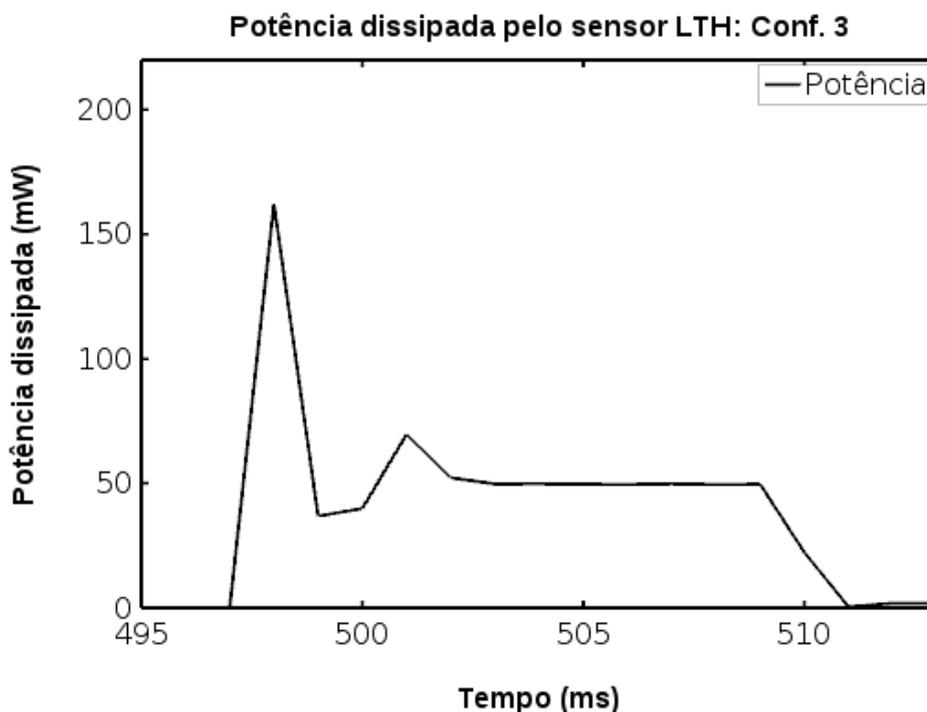
Tabela 11 – Configurações avaliadas

Configuração	ST	SP	PO	IR
Conf. 1	50 ms	1 s	100 ms	50 ms
Conf. 2	1 ms	1 s	1 s	50 ms
Conf. 3	1 ms	1 s	10 s	50 ms
Conf. 4	1 ms	1 s	10 s	100 ms

Fonte: Próprio autor (2016)

Analisando todos os dados coletados conclui-se que os parâmetros de configuração são determinantes para o subsistema de energia. A figura 64 apresenta a dissipação de energia, no ciclo de atividade, no melhor caso avaliado (Conf. 3).

Figura 64 – Potência no melhor caso avaliado



Fonte: Próprio autor (2016)

Neste experimento, o tamanho do quadro (*frame*) enviado foi de 28 *bytes*. Considerando a taxa de transmissão do padrão 802.15.4/ZigBee de 250 *kbps*, o tempo necessário para enviar os dados é aproximadamente 0,896 *ms*. No gráfico da figura 64, entre entrar em modo ativo, verificar a rede, enviar os dados e atingir o *timeout* de inatividade (ST), foram 11 *ms*, sendo que neste intervalo de tempo não houve realização de *polling*, tampouco ativação do LED de associação, o qual havia sido configurado para estar permanentemente desativado.

5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

O trabalho apresentou uma solução para implementação de uma RSSF para o monitoramento da qualidade da água em uma bacia hidrográfica, focada na escolha dos elementos necessários para a implantação dos nós responsáveis pela coleta de dados bem como dos demais nós necessários para a formação da rede, responsáveis pela disseminação dos dados. Além do novo método proposto, foi apresentada uma avaliação experimental desta solução, tendo como estudo de caso o monitoramento da qualidade da água na Bacia Hidrográfica do Rio Negro.

A solução apresentada consiste em um método de planejamento (*planning*) de uma RSSF ajustada às características do ambiente e do monitoramento, significativamente afetada pela variação na elevação do terreno. Neste método estão previstas etapas de avaliação da solução preliminar alcançada, bem como alternativas para solução de determinados problemas, buscando explorar as características da aplicação que permitem otimizar a solução final.

A avaliação experimental da solução proposta foi realizada com o auxílio de *software* SIG. O uso do *software* GRASS-GIS para realização desta atividade se mostrou promissor, por contemplar todos os requisitos necessários para aplicação do método proposto. A avaliação experimental da solução proposta apresentou resultados significativos, pois permitiu a identificação de pontos de instalação dos elementos de interconexão com grande potencial de operação, reduzindo os custos com *survey in loco*, em locais com dificuldade potencial de acesso e de risco aos técnicos responsáveis pela execução do serviço. A avaliação experimental revelou resultados relevantes, em especial no que se refere à otimização da solução final, com a minimização do número de elementos da rede e da quantidade de estruturas (de torres) em termos de quantidade e elevação das antenas. Além disso, foi possível demonstrar resultados preliminares sobre a integração de um sensor resistivo a um nó Xbee S2, o qual foi utilizado como prova de conceito para avaliação da dificuldade de acoplamento de um elemento sensor genérico ao nó sensor fabricado pela Digi.

Foi apresentada a integração dos componentes da solução proposta, em especial do serviço instalado no nó sorvedouro e a interface *web* de gerenciamento e monitoramento. O método de integração proposto contempla os requisitos funcionais, provendo as funcionalidades esperadas para os seus usuários. Além disso, foi realizada uma avaliação do subsistema de energia, que permitiu verificar a viabilidade de implantação dos

nós sensores com “tempo de vida” adequado, ou seja, que possam permanecer em funcionamento durante períodos significativos sem a necessidade de manutenção do subsistema de energia.

Em relação ao método de planejamento, foi realizada uma validação experimental por meio de um estudo de caso. Neste sentido, aponta-se como trabalho futuro a construção de um modelo matemático para o problema do *placement* para redes de sensores sem fio, aplicadas ao monitoramento de bacias hidrográficas, que corresponda à solução de menor custo.

A interface de gerenciamento e monitoramento apresentada neste trabalho, foi desenvolvida com foco nos *end devices* e nos dados coletados. Sugere-se, para trabalhos futuros, incluir questões relativas aos demais elementos da rede, os *routers* e o próprio *coordinator*.

Em relação ao subsistema de energia, identifica-se a necessidade de realizar estudos e experimentos relacionados ao consumo de energia dos *routers* e do *coordinator*. Além disso, sugere-se avaliar a solução em diferentes escalas.

REFERÊNCIAS

- ANA, Agência Nacional de Águas. **Conjuntura dos recursos hídricos do Brasil**. Brasília - DF, 2013.
- BARBOSA, H. B. **O desafio da gestão integrada: recursos hídricos na grande São Paulo**. Monografia (Pós-Graduação) — Fundação Getúlio Vargas/Escola de Administração de Empresas de São Paulo, 2003.
- BRASIL. Lei nº. 9.433, de 8 de janeiro de 1997. **Lei da Política Nacional de Recursos Hídricos**. 1997. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília.
- BUTLER, J. et al. **Wireless Networking in the Developing World**. [S.l.: s.n.], 2013.
- CARVALHO, B. M. de. **Desenvolvimento de um sistema para pecuária de precisão capaz de coletar, armazenar e analisar variações das condições superficiais do solo empregando redes de sensores sem fio**. Monografia (Graduação) — Universidade Federal do Pampa, 2015.
- CARVALHO, T. M. de; BAYER, M. Utilização dos produtos da “Shuttle Radar Topography Mission” (SRTM) no mapeamento geomorfológico do estado de goiás. **Revista Brasileira de Geomorfologia-Ano**, v. 9, n. 1, 2008.
- CASILARI, E.; CANO-GARCÍA, J. M.; CAMPOS-GARRIDO, G. Modeling of current consumption in 802.15.4/zigbee sensor motes. **Sensors**, MDPI Open Access Journals, v. 10, n. 6, p. 5443–5468, 2010.
- CHENGBO, Y. et al. Zigbee wireless sensor network in environmental monitoring applications. In: IEEE. **5th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing (WiCOM)**. [S.l.], 2009. p. 1–5.
- COSTA, T. P. da. **Avaliação e modelagem da qualidade da água através do modelo QUAL2K: Estudo de caso do Arroio Bagé**. Monografia (Graduação) — Universidade Federal do Pampa, 2013.
- DARGIE, W. Dynamic power management in wireless sensor networks: State-of-the-art. **IEEE Sensors Journal**, v. 12, n. 5, p. 1518–1528, 2012.
- DARGIE, W. W.; POELLABAUER, C. **Fundamentals of Wireless Sensor Networks: Theory and Practice**. 1. ed. [S.l.]: John Wiley & Sons, Inc., 2010. ISBN 978-0-470-99765-9.
- DELICATO, F. C. **Middleware baseado em serviços para redes de sensores sem fio**. Tese (PhD) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2005.
- Digi International. **XBee Sensors**. 2015. Disponível em: <<http://www.digi.com/products/xbee-rf-solutions/sensors/xbee-sensors>>. Acesso em: 22/06/2016.
- Digi International. **XBee Sensor: Compact Battery Powered Sensors with Integrated ZigBee**. 2016. Disponível em: <https://www.digi.com/pdf/ds_xbeesensors.pdf>. Acesso em: 21/09/2016.

Digi International. **ZigBee RF Modules: XBEE2, XBEEPRO2, PRO S2B (User Guide)**. 2016. Disponível em: <<http://www.digi.com/resources/documentation/digidocs/PDFs/90000976.pdf>>. Acesso em: 22/06/2016.

DOMINGUES, P. S. **Rede de Sensores Sem Fio (RSSF) para Rastreamento Animal**. Monografia (Graduação) — Universidade Federal do Pampa, 2012.

FALUDI, R. **Building wireless sensor networks: with ZigBee, XBee, arduino, and processing**. [S.l.]: "O'Reilly Media, Inc.", 2010.

FELICE, F. **Análise do desempenho de enlaces ponto-a-ponto utilizando a faixa de frequência não licenciada de 2, 4GHz em tecnologia spread spectrum**. Tese (PhD) — Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Paraná, 2005.

GINATTO, A. L. **Otimização do tempo de vida em redes de sensores sem fio utilizando algoritmo de energia e protocolo difusão direcionada**. Dissertação (Mestrado) — Universidade de São Paulo, 2008.

GRASS GIS. 2016. Disponível em: <<https://grass.osgeo.org/>>. Acesso em: 20/11/2016.

GRASS-RaPlaT. 2016. Disponível em: <http://www-e6.ijs.si/RaPlaT/GRASS-RaPlaT_main_page.htm>. Acesso em: 20/11/2016.

HORTON, R. E. Erosional development of streams and their drainage basins; hydrophysical approach to quantitative morphology. **Geological society of America bulletin**, Geological Society of America, v. 56, n. 3, p. 275–370, 1945.

KARL, H.; WILLIG, A. **Protocols and Architectures for Wireless Sensor Networks**. [S.l.]: John Wiley & Sons, Inc., 2007. ISBN 0-470-09510-5.

L-com Global Connectivity. **Line of Sight (LOS) Overview**. 2016. Disponível em: <[http://www.l-com.com/content/Line-of-Sight-\(LOS\).pdf](http://www.l-com.com/content/Line-of-Sight-(LOS).pdf)>. Acesso em: 17/05/2016.

Libelium Comunicaciones Distribuidas S.L. **Agriculture 2.0 Technical Guide**. 2015. Disponível em: <http://www.libelium.com/downloads/documentation/agriculture_sensor_board_2.0.pdf>. Acesso em: 15/03/2016.

MPRS, M. Parecer: documento DAT-MA No 2800/2008 . 2008. Disponível em: <https://www.mprs.mp.br/areas/paibh/arquivos/diagnostico_dat_bacias_hidrograficas_rio_negro.pdf>. Acesso em: 22/06/2016.

MUSTAFA, I. S. et al. Use of Geographic Information System (GIS) tools as network planning aid for antenna mounting in remote areas. In: **2012 International Symposium on Telecommunication Technologies (ISTT)**. [S.l.: s.n.], 2012. p. 11–15.

NENOKI, E. **ZigBee: estudo da tecnologia e aplicação no sistema elétrico de potência**. Monografia (Graduação) — Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2013.

NIKOLIC, G. et al. Wireless sensor node with low-power sensing. **Facta Universitatis, Series: Electronics and Energetics**, v. 27, n. 3, p. 435–453, 2014.

OLEXA, R. **Implementing 802.11, 802.16, and 802.20 Wireless Networks: Planning, Troubleshooting, and Operations**. [S.l.]: Elsevier, 2004. ISBN 0-7506-7808-9.

OLIVEIRA, C. N. de; CAMPOS, V. P.; MEDEIROS, Y. D. P. Avaliação e identificação de parâmetros importantes para a qualidade de corpos d'água no semiárido baiano. estudo de caso: bacia hidrográfica do Rio Salitre. **Química Nova**, v. 33, n. 5, p. 1059–1066, 2010.

OZIMEK, I. et al. **GRASS-RaPlaT: Radio Planning Tool for GRASS - User Manual**. 1. ed. Ljubljana, Slovenija, 2013.

PACHECO, A. P. R. et al. O ciclo PDCA na gestão do conhecimento: uma abordagem sistêmica. **PPGEGC – Universidade Federal de Santa Catarina – Programa de Pós Graduação em Engenharia e Gestão do Conhecimento**, v. 2, 2012.

PAPADOPOULOS, G. Challenges in the design and implementation of wireless sensor networks: A holistic approach-development and planning tools, middleware, power efficiency, interoperability. In: IEEE. **4th Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO)**. [S.l.], 2015. p. 1–3.

PEREIRA, F. N. de S. **Rede de sensores sem fio para fins de manejo da irrigação**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Vale do São Francisco, 2014.

POTDAR, V.; SHARIF, A.; CHANG, E. Wireless sensor networks: A survey. In: **Advanced Information Networking and Applications Workshops, 2009. WAINA '09. International Conference on**. [S.l.: s.n.], 2009. p. 636–641.

Q-Rap. **Q-Rap: Radio Planning Tool**. 2016. Disponível em: <<http://www.qrap.org.za/>>. Acesso em: 20/11/2016.

QGIS Project. 2016. Disponível em: <<http://www.qgis.org/>>. Acesso em: 20/11/2016.

RICHA, C. H.; SCHAFER, A. G. Classificação quanto a ordem dos cursos d'água da Bacia Hidrográfica do Rio Negro em território brasileiro. **Anais do Salão Internacional de Ensino, Pesquisa e Extensão – SIEPE/UNIPAMPA**, v. 5, n. 2, 2013.

ROUNDY, S. et al. Power sources for wireless sensor networks. In: SPRINGER. **European workshop on wireless sensor networks**. [S.l.], 2004. p. 1–17.

SCHAFER, A. G. **Coletânea de mapas da bacia hidrográfica do Rio Negro - RS**. 2016.

SCHAFER, A. G.; NORONHA, F.; COSTA, T. da. Resultados preliminares do monitoramento de parâmetros físico-químicos e biológicos de qualidade da água do Arroio Bajé - RS. **Anais do Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos – SBRH**, v. 11, 2015.

SCHAFER, A. G.; RICHA, C. H. Resultados preliminares do desenvolvimento de uma aplicação SIGWEB para a bacia hidrográfica do rio Negro-RS. **Anais do XXI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, v. 21, 2015.

SILVA, I. M. D. D. **Redes de Sensores sem Fio aplicadas em Ambientes Industriais de Petróleo e Gás**. Monografia (Graduação) — Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2006.

SILVA, L. P. da. Integração do planejamento urbano e de recursos hídricos pela sustentabilidade ambiental. **Chão Urbano**, v. 3, p. 12–15, 2010.

SNYDER, J. P. **Map projections – A working manual**. [S.l.]: US Government Printing Office, 1987.

SOARES, S. A. F. **Rede de Sensores sem Fio para Localização e Monitoramento de Pequenos Ruminantes**. Monografia (Graduação) — Universidade Federal do Vale do São Francisco, 2012.

SOHRABY, K.; MINOLI, D.; ZNATI, T. **Wireless Sensor Networks: Technology, Protocols, and Applications**. [S.l.]: Wiley-Interscience, 2007. ISBN 978-0-471-74300-2.

SOUZA, F. F. de. **Bacias Hidrográficas – Aprender**. 2010. Disponível em: <<http://www.ufscar.br/aprender/aprender/2010/06/bacias-hidrograficas/>>. Acesso em: 06/05/2016.

STRAHLER, A. N. Quantitative analysis of watershed geomorphology. **Eos, Transactions American Geophysical Union**, Wiley Online Library, v. 38, n. 6, p. 913–920, 1957.

TEODORO, V. L. I. et al. O conceito de bacia hidrográfica e a importância da caracterização morfométrica para o entendimento da dinâmica ambiental local. **Revista Uniar**, v. 20, p. 137–156, 2007.

WENDLING, M. **Sensores**. 2010. Disponível em: <<http://www2.feg.unesp.br/Home/PaginasPessoais/ProfMarceloWendling/4---sensores-v2.0.pdf>>. Acesso em: 22/06/2016.

ZigBee Alliance. **Standards: ZigBee Specification**. [S.l.], 2012.

APÊNDICE A — DOCUMENTO DE DESCRIÇÃO DA SOLUÇÃO

Documento de Descrição da Solução
Sistema de monitoramento remoto para bacias hidrográficas

Versão 1.0

Ficha Técnica

Público Alvo

Este documento se destina à profissionais da área de TI (ou outros) que tenham intenção de fazer uso, dar manutenção ou aprimorar esta solução.

Versão: 1.0 – Bagé, dezembro de 2016

Dúvidas, críticas e sugestões devem ser encaminhadas por escrito para o seguinte endereço postal:

Avenida Maria Anunciação Gomes de Godoy, nº 1650, Bairro Malafaia, Bagé - RS
Vila Industrial, Zona Rural, Caixa Postal 242. CEP: 96413-172,

AC. Curso de Engenharia de Computação (BAEC)

Ou para os seguintes endereços eletrônicos:

huegelcesar@gmail.com

Recomendamos que o assunto seja identificado com o título desta obra. Alertamos ainda para a importância de se identificar o endereço e o nome completos do remetente para que seja possível o envio de respostas.

Sumário

1. INTRODUÇÃO	4
1.1 VISÃO GERAL DO DOCUMENTO.....	4
2. DESCRIÇÃO GERAL DO SISTEMA	4
3. CASOS DE USO	5
3.1 DO PLANEJADOR.....	5
3.2 DO ADMINISTRADOR.....	5
3.3 DO USUÁRIO FINAL.....	5
4. DESENVOLVIMENTO	6
4.1 DIAGRAMA DE COMPONENTES DA SOLUÇÃO.....	6
4.2 MODELAGEM DA BASE DE DADOS.....	7
4.3 INTERFACE WEB DE GERENCIAMENTO E MONITORAMENTO.....	8
4.3.1 <i>Página inicial</i>	8
4.3.2 <i>Dispositivos</i>	8
4.3.3 <i>Nós sensores</i>	8
4.3.4 <i>Medições</i>	8
4.3.5 <i>Frames</i>	8

1. Introdução

Este documento descreve a solução, baseada em redes de sensores sem fio (RSSF), proposta para realização do monitoramento remoto periódico dos parâmetros físico-químicos da água ao longo de uma bacia hidrográfica.

1.1 Visão geral do documento

O documento está organizado, além desta seção introdutória, em outras três seções: descrição geral do sistema, contendo uma visão geral deste, caracterizando-o e descrevendo os atores envolvidos; casos de uso, sintetizando os requisitos em forma de casos de uso; desenvolvimento, apresentando aspectos relacionados as ferramentas utilizados e à concepção da solução; e protótipo, apresentando questões relativas ao protótipo construído.

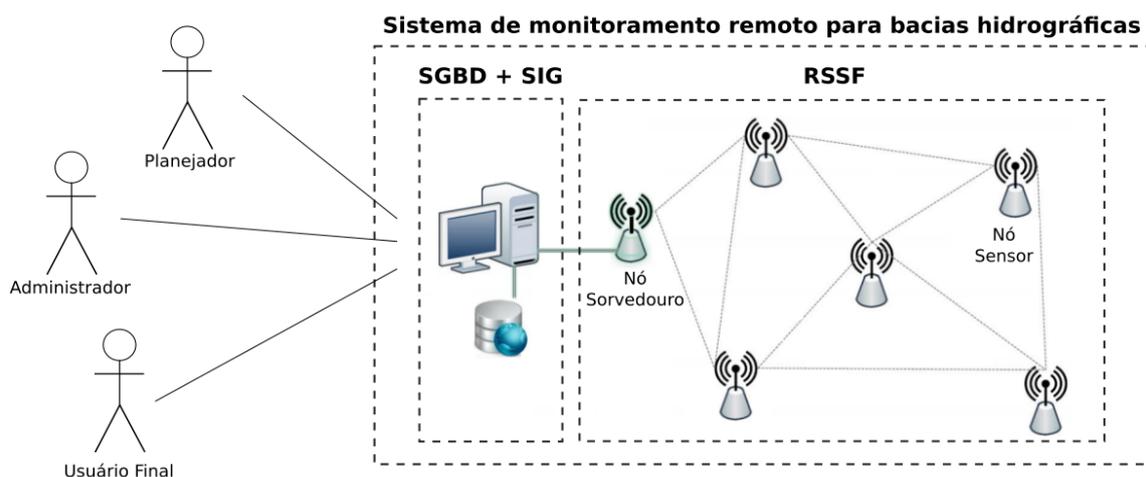
2. Descrição geral do sistema

O sistema de monitoramento proposto consiste em um conjunto de ferramentas que possibilitam o planejamento, a administração e uso de uma rede de sensores sem fio para o monitoramento remoto periódico dos parâmetros físico-químicos da água ao longo de uma bacia hidrográfica.

Este sistema fornece: ao planejador (*planner*), as ferramentas e o método de planejamento de uma RSSF ajustada ao monitoramento dos parâmetros físico-químicos da água ao longo de uma bacia hidrográfica; ao administrador (*administrator*), funcionalidades para a administração da RSSF; e ao usuário final (*end user*), meios de visualização dos parâmetros físico-químicos da água nos pontos monitorados pela RSSF.

Diante dos recursos disponibilizados, esta solução contribui positivamente para a melhora da gestão dos recursos hídricos por meio do monitoramento contínuo e remoto dos pontos de interesse.

Figura 1 – Visão geral da solução



3. Casos de uso

Esta seção apresenta os requisitos funcionais da solução por meio da descrição dos casos de uso.

3.1 Do planejador

Realiza o planejamento e a instalação do sistema de monitoramento.

Atividades: interage com o sistema, inserindo os elementos de entrada do método de *planning* e manipulando as ferramentas de SIG (Sistema de Informação Geográfica) percorrendo as diferentes etapas de processamento geoespacial, obtendo os elementos de saída do método; supervisiona a instalação e manutenção corretiva dos elementos da RSSF nos pontos elencados pelo método.

3.2 Do administrador

Realiza a administração do sistema de monitoramento.

Atividades: administra as ferramentas de software do sistema (SGBD e GIS) bem como realiza configurações remotas dos parâmetros de funcionamento da RSSF (por exemplo, frequência de amostragem). Monitora os indicadores de funcionamento dos elementos de *software* e *hardware* do sistema (advindos de métricas que relacionam as frequências de amostragens configuradas e a taxa de recebimento de amostras dos sensores). Também monitora parâmetros relacionados à energia dos elementos da RSSF.

3.3 Do usuário final

Faz a utilização do sistema (*software*) com foco na visualização dos dados de monitoramento. Este ator é o responsável pelo Plano de Recursos Hídricos (PRH) da bacia hidrográfica.

Atividades: visualiza os dados espacializados coletados nos pontos de interesse, apresentados por meio de interfaces de mapas. Pode registrar *triggers* - tuplas com *threshold* (t) e número de observações (n) - para emissão de alertas (com envio automático de *e-mail*, por exemplo) em casos nos quais a média móvel de valores amostrados (média aritmética de um certo número (n) das observações mais recentes) ultrapassa o *threshold*.

4. Desenvolvimento

4.1 Diagrama de componentes da solução

A solução de gerenciamento e monitoramento é composta por vários componentes. Dentre estes, destacam-se o Nó Sorvedouro e a interface web de gerenciamento e monitoramento (webserver). As Figura 2 e 3 apresentam, respectivamente, o diagrama de componentes e o diagrama de implantação desta solução.

Figura 2 – Diagrama de componentes da solução

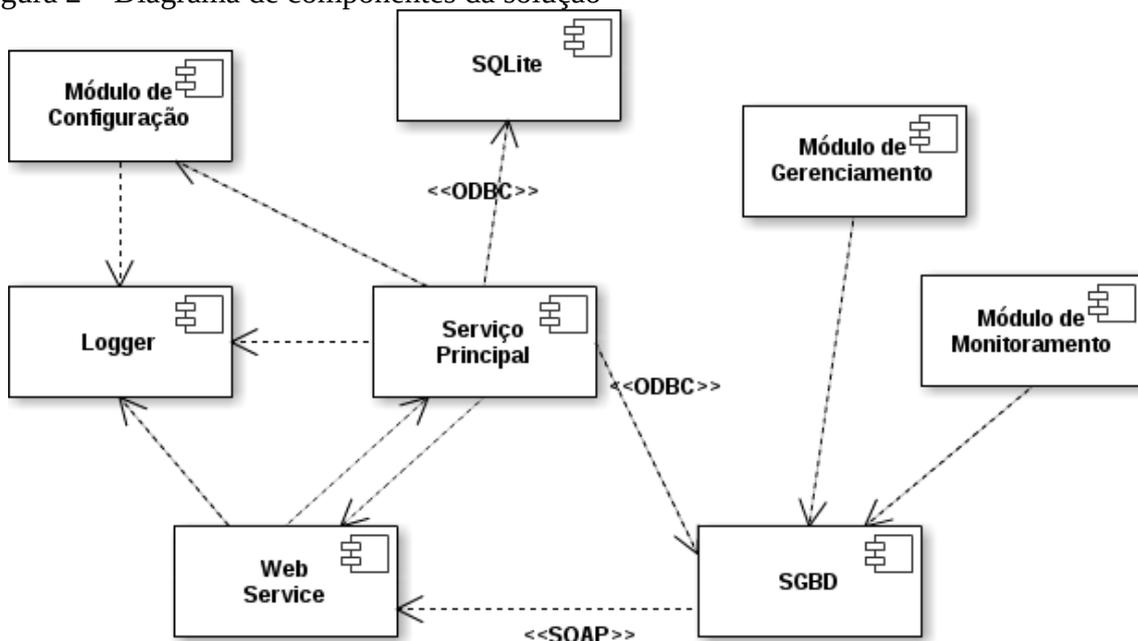
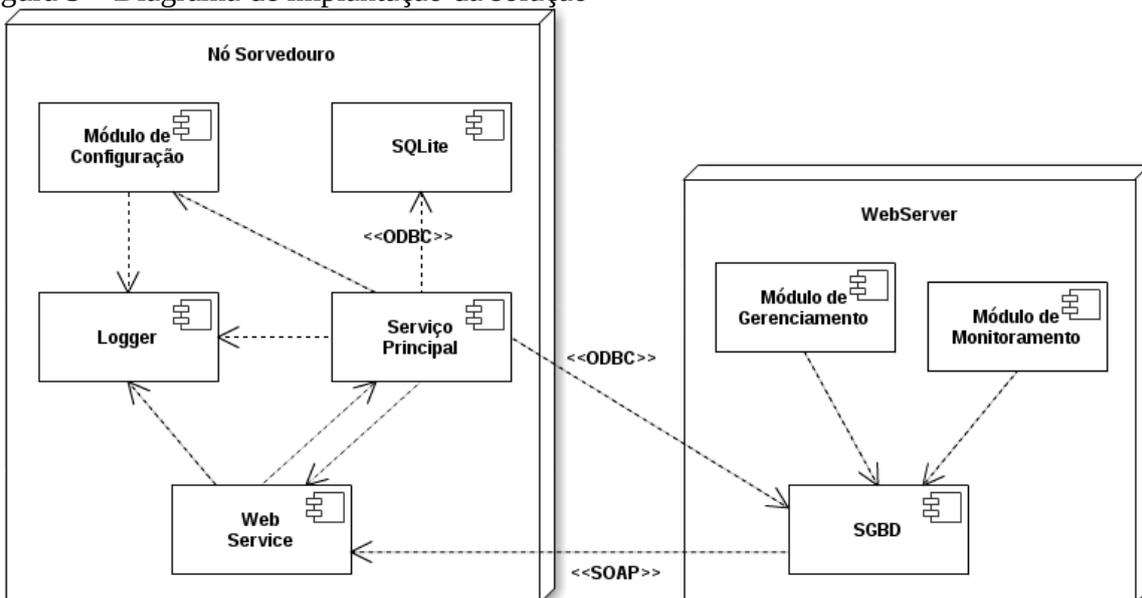


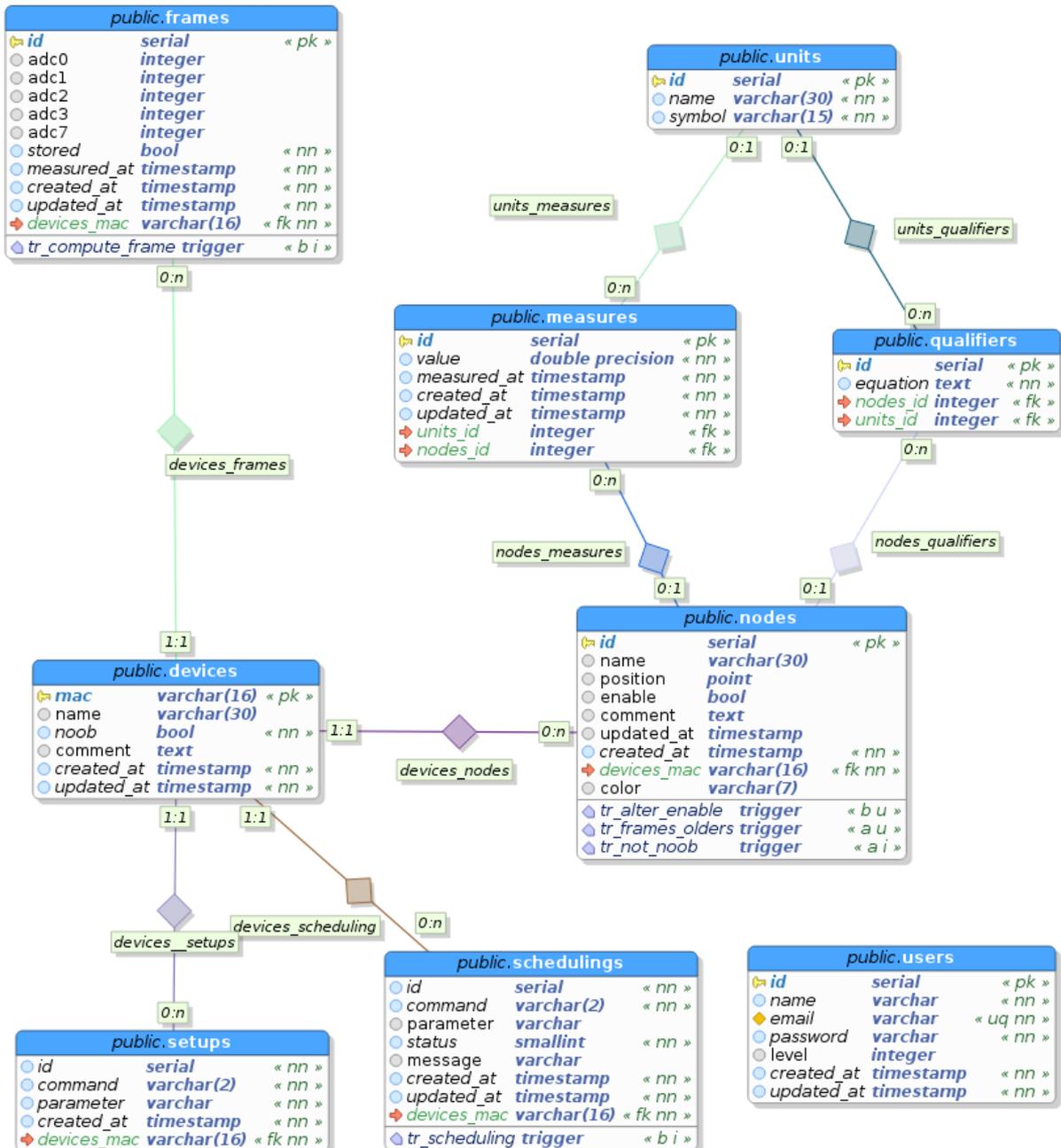
Figura 3 – Diagrama de implantação da solução



4.2 Modelagem da base de dados

O SGBD escolhido para implementação da base de dados foi o PostgreSQL (<https://www.postgresql.org/>), devido à possibilidade de extensão de suas funcionalidades com a biblioteca de funções PostGIS (<http://www.postgis.net/>), que agregam ao SGBD a capacidade de espacialização dos dados. Assim, a base de dados foi modelada em conformidade com o SGBD escolhido. A Figura 4 apresenta o esquema lógico da base de dados.

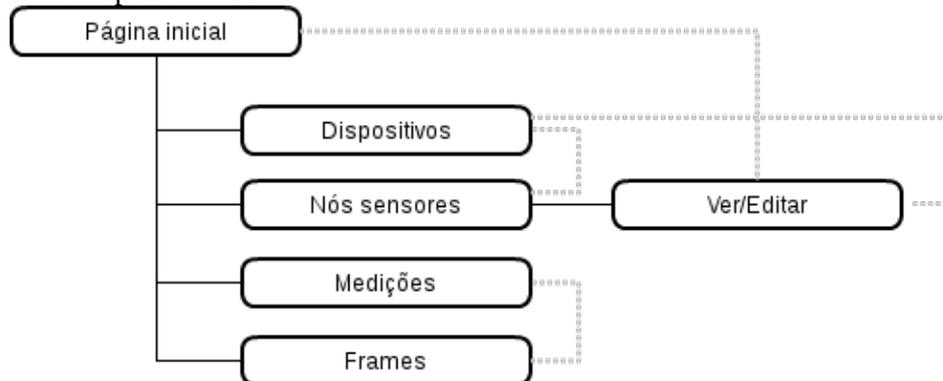
Figura 4 – Esquema lógico da base de dados



4.3 Interface web de gerenciamento e monitoramento

A interface web de gerenciamento e monitoramento foi desenvolvida com base no framework Laravel (<https://laravel.com/>). Para os elementos gráficos foi utilizado o admin template Gentellela Admin (<https://github.com/puikinch/gentelella>), que utiliza estilos gráficos do Bootstrap 3 e uma gama de plugins e ferramentas do framework javascript JQuery. Apresenta-se, abaixo, o site map da interface.

Figura 6 – Site-map da interface



4.3.1 Página inicial

Na página inicial é apresentado um mapa contendo o posicionamento de todos os sensores por meio de marcadores. A partir destes marcadores é possível acessar os nós sensores, seus dados em forma de tabelas ou gráfico. Além disso, é possível acessar as demais páginas por meio de um menu lateral.

4.3.2 Dispositivos

Na página dispositivos é apresentada uma lista de dispositivos cadastrados na base de dados, podendo-se fazer uma busca por: mac address, nome, comentário, ou pela flag “novo”. Por meio desta pode-se acessar informações referentes a cada um dos dispositivos: configurações; nós sensores cadastrados; e qualificadores se houver um nó sensor ativo.

4.3.3 Nós sensores

Nesta página aparecem todos os nós sensores cadastrados, bem como à qual dispositivo estão vinculados, podendo-se realizar pesquisa por: id, posição, comentário, dispositivo vinculado, ou pelo status “ativo”. Por ela é possível ativar e desativar sensores, ou entrar em suas configurações. Entrando na página de configuração de um sensor, é possível determinar seu posicionamento geográfico e os qualificadores que deverão ser aplicados aos dados por ele coletados.

4.3.4 Medições

Na página medições é apresentada uma tabela contendo todas as medições. Nesta página também é permitido realizar busca por: id, valor ou unidade. Também é possível, a partir dela, gerar uma listagem de medições de um nó sensor específico.

4.3.5 Frames

Na página frames são apresentados todos os frames armazenados na base de dados, contendo valores digitais para ADC0, ADC1, ADC2, e ADC3.