



Universidade Federal de Pernambuco
Centro de Informática



Trabalho de Graduação em Engenharia da Computação

Sistema de Análise da Qualidade da Frenagem de Trens Através de Telemetria

Autor: Eric Rodrigues Borba

Orientador: Sérgio Vanderlei Cavalcante

Co-orientador: Rômulo César Carvalho de Araújo

Recife, 25 Abril de 2013.

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus por me permitir vivenciar e superar os obstáculos encontrados durante este percurso.

Agradeço aos meus pais, Esdras e Marily, pois foi à dedicação sem limites, o esforço incessante, o investimento em minha educação, e credibilidade cega em minha capacidade, além do apoio constante que me permitiram chegar até aqui.

Agradeço à minha noiva, Rosiely, à qual desde o momento que conheci transformou minha vida me dando o apoio emocional necessário para alcançar este objetivo; a conclusão desta etapa na minha vida, do curso e deste trabalho só foi possível graças a sua compreensão e carinho em todos os momentos (principalmente os mais dolorosos e duradouros).

Agradeço meus irmãos, Cindel e Ezinho, que vibraram comigo a cada etapa conquistada como se fossem deles (e no final das contas, é deles também, afinal sempre fizeram parte disto).

Agradeço aos meus familiares, tios, tias, primos, primas, avós que sempre acompanharam minha luta desde o início e acreditaram em mim, mesmo quando o tempo já passado não me era favorável.

Agradeço ao meu orientador, Sergio Cavalcante, que me mostrou a outra face do curso de Engenharia da Computação a partir das cadeiras lecionadas por ele, as quais cursei, além da orientação; necessária para conclusão deste trabalho.

Agradeço ao meu co-orientador, Rômulo Araújo, pela disposição em me auxiliar, fornecendo materiais, acompanhamento constante, conhecimento, experiência, laboratórios do IFPE, além dos conselhos valiosos que me foram dados para alcançar este objetivo.

Agradeço aos meus amigos que me acompanharam e sofreram comigo durante todos esses anos nessa empreitada: Rocir, Raphael, Rudiney, Fabio, Cleunio, Daniel, Gabriel, Filipe, Igor, Luis, Camila, Thiago, Silvio, Onildo, Gilson, Guilherme, Josias, dentre tantos outros.

Aos meus colegas da CBTU/METROREC, Aldenor e Henrique, por compreenderem a situação disponibilizando seu tempo para realização dos testes.

A todos os integrantes do Centro de Controle Operacional, operadores de TUE, e agentes de Estação, que se dispuseram a auxiliar durante os testes necessários.

A Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), pelo suporte acadêmico durante esses anos.

Ao Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia de Pernambuco (IFPE) pelo acolhimento ao fornecer laboratórios para testes do sistema.

Agradeço também à Companhia Brasileira de Trens Urbanos (CBTU) /Recife por disponibilizar suas instalações possibilitando assim a validação do sistema proposto.

Por fim, agradeço aos demais colegas, amigos e parentes que contribuíram direta ou indiretamente para a realização deste objetivo.

“O sucesso nasce do querer, da determinação e persistência em se chegar a um objetivo.
Mesmo não atingindo o alvo, quem busca e vence obstáculos, no mínimo fará coisas
admiráveis.”

José de Alencar

Resumo

Segurança é um fator primordial no que diz respeito a empresas metro ferroviárias. É neste âmbito que a avaliação da qualidade do sistema de freios em trens urbanos é de suma importância. Além disso, há que se considerar fatores de custo de forma a permitir que tais sistemas sejam implementados na prática. O sistema aqui descrito propõe-se a abordar estes fatores, segurança e custo, ao utilizar dispositivos de radio frequência que fazem uso da pilha de protocolos *ZigBee* para a monitoração dos sistemas de freios dos trens. Em particular, o sistema foi implementado e testado em uma composição metro ferroviária denominada Trem Unidade Elétrica (TUE) pertencente a Companhia Brasileira de Trens Urbanos (CBTU), se mostrando adequado para o propósito em questão. O dispositivo implantado na composição é caracterizado por usar uma tecnologia modular de baixo custo, baixo consumo de energia, segura e capaz de monitorar diversas variáveis ao mesmo tempo. O uso desta tecnologia é feita com o intuito de permitir a avaliação em tempo real de fatores como velocidade e aceleração, possibilitando assim, uma análise constante da qualidade dos sistemas de freio de trens dentro do contexto metro ferroviário. Em posse dessas informações, os setores das empresas responsáveis pelo gerenciamento (Centro de Controle Operacional) e manutenção dos trens poderão verificar seu funcionamento em tempo real, podendo perceber eventuais problemas e preparar estratégias evitando assim maiores transtornos à população. O sistema completo é composto de um dispositivo *ZigBee* instalado em um TUE pertencente a CBTU/METROREC, um dispositivo roteador no limite da estação metro-ferroviária Werneck, e um módulo coordenador dentro da mesma estação a fim de criar uma rede de sensores sem fio. Dessa forma, o sistema de análise da qualidade da frenagem de trens através de telemetria se mostrou eficiente na transmissão de dados para a rede local *Ethernet* da empresa citada, viabilizando assim, a detecção de possíveis problemas de frenagem em tempo real.

Sumário

1	Introdução	14
2	Estado da Arte	15
2.1	Sistema de Gestão do Tráfego Ferroviário Europeu – Uma Visão Geral	15
2.2	Análise do Desempenho da Estrutura de Rede GSM-R no Sistema de Controle de Trens da China	16
2.3	Implementação de Sistema Anticolisão de Trens e Proteção para Passagens de Nível em Ferrovias Indianas com ZigBee.....	17
2.4	Estudo Experimental das Tecnologias Bluetooth, ZigBee e IEEE 802.15.4 em Trens de Alta Velocidade	18
2.5	Diagnóstico de Falhas em Tempo Real do Truque de Trens Usando Sensores FBG	19
2.6	Sistema Telemétrico Dinâmico Sem Fio Aplicado aos Veículos Rodoferroviários em Malhas Metro Ferroviárias: RailBee.....	19
2.7	Análise das Tecnologias.....	20
3	Fundamentação Teórica	21
3.1	IEEE 802.15.4	21
3.1.1	O que é IEEE 802.15.4?	21
3.1.2	Nível Físico: PHY	22
3.1.3	Nível de Enlace (data-link): MAC	22
3.1.4	Topologia	23
3.2	Protocolo ZigBee	23
3.2.1	O que é ZigBee?	23
3.2.2	Estrutura	24
3.2.3	Tipos de nós.....	25
3.2.4	Topologia	25
3.2.5	Protocolo de Roteamento: NWK	26
3.2.6	Protocolo de Transporte: APS	27
3.2.7	Segurança	29
3.2.8	Comparativo entre Tecnologias.....	29
3.3	Sistema de Transporte de Passageiros da CBTU/METROREC.....	30
3.4	Trem Unidade Elétrica	32
3.4.1	Estrutura	32
3.4.2	Sistema Elétrico	36
3.4.3	Sistema Pneumático	39
3.4.4	Sistema de Freio	41

4	Sistema de Análise da Qualidade da Frenagem de Trens Através de Telemetria	43
4.1	Visão Geral do Sistema e Ambiente de Teste.....	43
4.2	Ferramentas utilizadas	51
4.2.1	Hardware	51
4.2.2	Software	57
4.2.2.1	X-CTU	57
4.2.2.2	Servidor e BD	60
5	Resultados Práticos	62
6	Conclusão	73
7	Trabalhos Futuros.....	74
	APÊNDICE I	75
	ANEXO I.....	76
	ANEXO II.....	77
	ANEXO III.....	78
	ANEXO IV.....	79
	ANEXO V.....	80
	ANEXO VI.....	81
	Referências	82

Lista de Figuras

Figura 2-1. Dois Terminais Móveis em Contato com dois BTS (Shi, Zhang, & Gao, 2010).	16
Figura 2-2. Módulos Sugeridos por Arun et al. (2013).	18
Figura 2-3. Visão Geral do Sistema RailBee (Araújo, 2009).....	20
Figura 3-1. Espectro dos Canais (Caprile, 2009).....	22
Figura 3-2. Quadro MAC.	23
Figura 3-3. Arquitetura do Protocolo <i>Zigbee</i> (Araújo, 2009). AF- <i>Application framework</i> , ZDO – Objetos de Dispositivo <i>ZigBee</i> , APS <i>Application Support Sublayer</i> , SSP - Provedor de Serviços de Segurança, NWK – camada de rede , MAC - camada de enlace, PHY - camada física.	24
Figura 3-4. Topologia em Malha (<i>ZigBee Specification Network Topology</i>).	26
Figura 3-5. Estrutura do Quadro NWK.	27
Figura 3-6. Relação entre IEEE 802.15.4, NWK e APS.	28
Figura 3-7. Rede Básica das Linhas da CBTU/METROREC (Araújo, 2009).	31
Figura 3-8. Carro-Motor (CBTU/METROREC, 2009).	32
Figura 3-9. Carro-Reboque (CBTU/METROREC, 2009).	33
Figura 3-10. Truque (CBTU/METROREC, 2009).	34
Figura 3-11. Estrutura (CBTU/METROREC, 2009).....	34
Figura 3-12. Conjunto Rodeiro (CBTU/METROREC, 2009).	35
Figura 3-13. Suspensão Primária (CBTU/METROREC, 2009).	35
Figura 3-14. Suspensão Secundária (CBTU/METROREC, 2009).....	36
Figura 3-15. Rede aérea (CBTU/METROREC, 2009).	37
Figura 3-16. Pantógrafo (CBTU/METROREC, 2009).....	37
Figura 3-17. Motor de Tração (CBTU/METROREC, 2009).....	38
Figura 3-18. Motor Alternado (CBTU/METROREC, 2009).	38
Figura 3-19. Compressor Principal (CBTU/METROREC, 2009).	39
Figura 3-20. Compressor Auxiliar (CBTU/METROREC, 2009).	40
Figura 3-21. Reservatórios Principais (CBTU/METROREC, 2009).	40
Figura 3-22. Manipulador de Freio (CBTU/METROREC, 2009).....	41
Figura 3-23. Freio Pneumático (CBTU/METROREC, 2009).	42
Figura 4-1. Visão Geral do Sistema.	44
Figura 4-2. Unidade de Controle de Propulsão (PCU).	45
Figura 4-3. Dispositivo Final e Divisor de Tensão.	45
Figura 4-4. Perspectiva do Armário Elétrico do TUE 11.	46
Figura 4-5. Local de Captura da Tensão Relativa à Pressão dos Cilindros de Freio.....	47
Figura 4-6. Local de Captura da Tensão da Velocidade.	47
Figura 4-7. Perspectiva da Estação Santa Luzia a partir da estação Werneck.	48
Figura 4-8. Vista Aérea entre estações Santa Luzia e Werneck (Araújo, 2009).	49
Figura 4-9. Local de Instalação do Dispositivo Roteador.	49
Figura 4-10. Micro Computador com Dispositivo Coordenador.	50
Figura 4-11. Placa CON-USBBEE (Messias, 2013).....	50
Figura 4-12. Monitoramento no CCO - CBTU/METROREC.	51
Figura 4-13. Módulo <i>XBEEPRO2</i> da <i>Digi International Inc.</i>	52
Figura 4-14. Ilustração da Placa para Desenvolvimento (Digi, 2010).....	53

Figura 4-15. Placa para Desenvolvimento em Conjunto com XBEEPRO2.	53
Figura 4-16. Rede ZigBee em Malha (Messias, 2013).	56
Figura 4-17. Estrutura do Pacote ZigBee no Modo API (Digi, 2010).	56
Figura. 4-18 X-CTU da Digi Internacional Inc.	57
Figura 4-19. Habilitação para Verificação de Canais no X-CTU.	58
Figura 4-20. Parâmetros DH, DL e D1.	59
Figura 4-21. Parâmetros D1 e IR.	60
Figura 5-1. Gráfico da Correlação Entre Velocidade, Tensão de Freio Requerido e Desaceleração do TUE 11 (06h10min).	63
Figura 5-2. Gráfico da Correlação Entre Velocidade, Tensão de Freio Requerido e Desaceleração do TUE 11 (06h54min).	64
Figura 5-3. Gráfico da Correlação Entre Velocidade, Tensão de Freio Requerido e Desaceleração do TUE 11 (07h30min).	65
Figura 5-4. Gráfico da Correlação Entre Velocidade, Tensão de Freio Requerido e Desaceleração do TUE 11 (08h09min).	66
Figura 5-5. Gráfico da Correlação Entre Velocidade, Tensão de Freio Requerido e Desaceleração do TUE 11 (08h42min).	67
Figura 5-6. Gráfico da Correlação Entre Velocidade, Tensão de Freio Requerido e Desaceleração do TUE 11 (09h20min).	68
Figura 5-7. Gráfico da Correlação Entre Velocidade, Tensão de Freio Requerido e Desaceleração do TUE 11 (09h49min).	69
Figura 5-8. Gráfico da Correlação Entre Velocidade, Tensão de Freio Requerido e Desaceleração do TUE 11 (10h29min).	70
Figura 5-9. Gráfico da Correlação Entre Velocidade, Tensão de Freio Requerido e Desaceleração do TUE 11 (11h04min).	71
Figura 5-10. Gráfico da Correlação Entre Velocidade, Tensão de Freio Requerido e Desaceleração do TUE 11 (11h51min).	72

Lista de Tabelas

Tabela 3-1. Comparativo entre Tecnologias (Araújo, 2009).	30
---	----

Lista de Quadros

Quadro 4-1. Pinagem do <i>XBEEPRO2</i> (Digi, 2010).	54
Quadro 4-2. Especificação <i>XBEEPRO2</i> (Digi, 2010).	55
Quadro 4-3. Detalhamento dos campos de um Pacote ZigBee no Modo API (Digi, 2010).	61

Lista de Abreviaturas

AES - 128 – *Advanced Encryption Standard*

AETB – *Amplifier Electronic Transducer Brake*

AETW – *Amplifier Electronic Transducer Weight*

AF- *Application framework*

ANATEL - Agência Nacional de Telecomunicações

APS - *Application Support Sublayer*

ATP - *Automatic Train Protection*

BD – *Baud Rate*

BTS - *Base Transceiver Station*

CBTU - Companhia Brasileira de Trens Urbanos

CBTU/METROREC - Companhia Brasileira de Trens Urbanos/Superintendência de Trens Urbanos do Recife

CCO - Centro de Controle Operacional

DH – *Destination Address High*

DL – *Destination Address Low*

DSSS - *Direct Sequence Spread Spectrum*

DVL - Decodificador de velocidade

EE – *Encryption Enable*

ERTMS - *European Rail Traffic Management System*

ETCS - *European Train Control System*

FBG - *Fiber Bragg Gratin* -

FFD – *Full Function Device*

GSM-R - *Global System for Mobile Communications-Railway*

IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo

JV – *Channel Verification*

KY – *AES Encryption Key*

MAC - Camada de enlace

MIC - *Message Integrity Code*

NJ – *Node Join Time*

NWK - Camada de rede

PCU - Unidade de Controle de Propulsão

PHY - Camada física

RFD - *Reduced Function Device*

RFID - *Radio-Frequency Identification*

RNR - *Remote Name Request*

SEI - Sistema Estrutural Integrado

SSP - Provedor de Serviços de Segurança

STA - Seleção de taxa

TUE - Trem Unidade Elétrica

WPANs - *Wireless Personal Area Networks*.

ZDO - Objetos de Dispositivo ZigBee

1 Introdução

Este trabalho propõe uma solução concreta no que diz respeito ao incremento na segurança dos transportes metro ferroviário. Isto é possível através do monitoramento constante, em tempo real, dos sistemas de frenagem dos trens, o qual faz com que seja possível detectar previamente qualquer alteração que indique uma possível fadiga ou falha que venha a provocar transtornos à circulação, podendo inclusive ocasionar acidentes. Para isso, se fez necessário monitorar a desaceleração provocada pelo sistema de freios do trem para verificar em tempo real se a mesma está dentro de índices considerados ideais pelas empresas responsáveis por medições realizadas previamente.

Com as informações obtidas através deste sistema as equipes de manutenção em conjunto com o Centro de Controle Operacional (CCO) de empresas metro ferroviárias poderão realizar operações e estratégias imediatas, ou posteriores, dependendo do nível atual de degradação do sistema de freios do trem. Essa flexibilidade de atuação é permitida pela avaliação constante em tempo real dos mesmos, diminuindo assim os riscos de segurança ocasionados pela ausência de informações atualizadas. Pensando nisto, é válido observar a evolução na área de transmissão de dados sem fio no que diz respeito à capacidade de armazenamento, velocidade de transmissão, diminuição do consumo energético, dentre outros. Deste modo, tem crescido a busca por soluções relacionadas à captura de sensores, recurso fundamental e estratégico para grandes empresas de diversos setores, que necessitam de monitoramento em tempo real de suas instalações e equipamentos a fim de aprimorar fatores como segurança, capacidade de produção, estado atual de máquinas, etc. Dentro desse cenário se encontra o setor metro ferroviário, o qual necessita de constantes pesquisas e aprimoramento no que diz respeito ao aumento na qualidade dos serviços prestados aos usuários como segurança, velocidade e conforto. Logo, para viabilizar esse monitoramento, se utilizou como base o sistema de telemetria proposto por Araújo (2009) que proporciona uma tecnologia modular de baixo custo, baixo consumo de energia, segura e capaz de monitorar diversas variáveis simultaneamente; isto é possível através do uso de dispositivos de baixo custo que utilizam o protocolo de comunicações *ZigBee 802.15.4* (ZigBee Alliance, 2013), sobrepondo assim às tecnologias atuais que possuem alto custo, tanto de implementação quanto de implantação.

Este trabalho propõe então, para fim de testes e validação, o uso de uma rede *ZigBee*, a qual tem como nó final um dispositivo instalado no armário elétrico de um único trem da Companhia Brasileira de Trens Urbanos/Superintendência de Trens Urbanos do Recife (CBTU/METROREC) (METROREC, 2013) que realiza a captura e transmissão de dois parâmetros essenciais: pressão dos cilindros de freio e velocidade. Os mesmos são capturados com a aproximação do trem da estação metro-ferroviária Werneck (existente no sistema da empresa já citada) através de um dispositivo roteador posicionado na cabeceira leste da estação. Em seguida esta informação é transmitida para o dispositivo coordenador conectado ao micro computador localizado em uma das salas da estação, o qual possui um servidor responsável por interpretar as mensagens capturadas e armazená-las em um banco de dados específico, acessível em toda rede local *Ethernet* da empresa.

Na seção 2 deste trabalho serão abordados os trabalhos existentes na área, realizando assim uma análise do estado da arte atual. A seção 3 demonstra os principais conceitos necessários para compreensão e implementação do sistema proposto. Já na seção 4 será demonstrado uma visão geral da aplicação, bem como o ambiente de teste, hardwares e softwares utilizados, e o servidor desenvolvido para interpretação do pacote *ZigBee*. Por fim, na seção 5 são apresentados os resultados obtidos para validação do sistema dentro do ambiente de teste proposto.

2 Estado da Arte

Nesta seção são descritos e analisados alguns trabalhos existentes relativos ao monitoramento de trens e seus respectivos equipamentos, possibilitado pela aquisição de informações capturadas pelos sensores dos mesmos. Vale ressaltar que as citações a seguir – da mesma forma que o presente trabalho – possuem o intuito de proporcionar acréscimos no que diz respeito à segurança e à qualidade do serviço prestado aos usuários dos sistemas de trens atuais.

2.1 Sistema de Gestão do Tráfego Ferroviário Europeu – Uma Visão Geral

Abed (2010) faz uma abordagem acerca do sistema de monitoramento ERTMS (*European Rail Traffic Management System*) que está sendo implementado na Europa e em outras partes do mundo. Este sistema foi desenvolvido com o intuito de realizar uma padronização no que diz respeito aos sistemas de sinalização, controle e monitoramento de trens, pois atualmente mais de vinte sistemas diferentes (incompatíveis) de controle de trens são usados na Europa, isto significa dizer que para cada país que um trem cruzar, será necessário à presença de dispositivos que operem naquela região.

O ERTMS possui dois componentes: O ETCS (*European Train Control System*) que trata da ATP (*Automatic Train Protection*), e foi designado para substituir gradualmente os sistemas incompatíveis da Europa, e o GSM-R (*Global System for Mobile Communications-Railway*), que possibilita a comunicação de voz e dados entre o centro de controle e o trem, tendo como base o GSM original. Na Europa, o GSM-R opera com a frequência de 876-880 MHz e 921-925 MHz, enquanto que em outros países é possível encontrar bandas de 1800 MHz e 1900 MHz.

O ERTMS/ETCS é constituído de duas partes: "*onboard*" (composto por módulos tais como sensores, transmissão, etc.) e "*tracksides*" (dispositivos de via). A comunicação entre as duas partes é feita através de Eurobalises (transmissão unidirecional local da via para o trem), Euroloop (transmissão unidirecional semi-contínua da via para o trem) e Euroradio (transmissão bidirecional entre o trem e via através do GSM-R). Eurobalise e Euroloop são

dispositivos os quais são energizados com a aproximação dos trens devido a um campo eletromagnético com frequência de 27MHz, este, gerado por uma antena posicionada no trem, possibilitando então, um envio cíclico de mensagens com frequência de 4MHz. No que diz respeito ao GSM-R, se trata de um aprimoramento do GSM, caracterizado por permitir um ganho de desempenho na transmissão de áudio e voz em velocidades de até 350 km/h. Entretanto, vale ressaltar que todo este aparato é bastante custoso, além de possuir pontos cegos no que diz respeito ao GSM-R na passagem por túneis, praticamente inviabilizando este recurso nos sistemas de metrô subterrâneos.

2.2 Análise do Desempenho da Estrutura de Rede GSM-R no Sistema de Controle de Trens da China

Shi et al. (2010) analisam o uso da estrutura de rede GSM-R no sistema de controle de trens da China. Além disso, o mesmo propõe um novo sistema de redundância na estrutura da rede do sistema de trens de alta velocidade baseado em cadeias de Markov para, assim, realizar uma comparação com o sistema atual através de parâmetros como confiabilidade e disponibilidade.

O sistema de GSM-R atual é passível de uma grande quantidade de erros de transmissão, perda de conexão, etc. Isto se deve à estrutura atual, onde os trens possuem apenas dois terminais móveis, um funcionando normalmente enquanto o segundo trata-se apenas de um backup. Logo, erros relacionados à velocidade dos trens irão ocorrer, devido aos seguintes fatores: breve interrupção quando um trem sair de uma BTS (*Base Transceiver Station*) para outra; erros de transmissão que ocorrem de tempos em tempos, e que não permitem atuação, pois normalizam rapidamente, mas foram perdidos dados nesse breve tempo, etc. Shi et al. (2010) então propõe o uso de dois terminais móveis, um em cada extremidade do trem, porém trabalhando simultaneamente conectados em redes diferentes e baseados no processo de Markov a fim de evitar as perdas de transmissão nos casos já aqui citados (Figura 2-1).

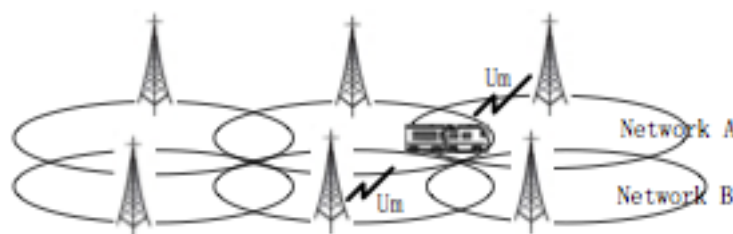


Figura 2-1. Dois Terminais Móveis em Contato com dois BTS (Shi, Zhang, & Gao, 2010).

Ainda de acordo com Shi et al. (2010), em suas simulações, a nova estrutura redundante é melhor que a forma convencional, aumentando a confiabilidade (99,99%) e diminuindo as

perdas mesmo com o incremento da velocidade do trem, demonstrando então que apesar do GSM-R ser uma rede de alta confiança - a qual proporciona segurança aos sistemas de trens atuais - ainda é passível de erros, os quais podem ser corrigidos com adição de novas tecnologias e métodos.

2.3 Implementação de Sistema Anticolisão de Trens e Proteção para Passagens de Nível em Ferrovias Indianas com ZigBee

Arun et al. (2013) propuseram incrementar o sistema de controle atual existente na Índia com o intuito de evitar colisões entre trens e também aumentar a segurança nas passagens de nível, cruzamento de pedestres e outros veículos com a linha férrea. Para isso, o sistema sugerido trabalha em conjunto com o existente que é constituído de Walkie-Talkies, infra-vermelho, etc. Outra alternativa proposta seria o uso de sensores geográficos, no entanto, além de ser mais custosa apresenta um nível de implementação mais complexo. Devido a estes fatores Arun et al. (2013) faz uso de micros controladores e *Zigbee's* para compor seus quatro submódulos: módulo do trem, módulo do centro de controle, módulo do poste de sinalização e o módulo das passagens de nível (Figura 2-2).

O uso do *ZigBee* proporciona a criação de uma rede interconectada entre todos os subsistemas existentes para a recepção e transmissão de dados entre os submódulos via Wireless. Os pacotes de dados enviados pelos submódulos possuem 8 bits, contendo: *track-id*, direção do movimento e *train-id*. Outros equipamentos utilizados foram o micro controlador *PIC16F873A*, o compilador *MikroC* e o ambiente de simulação *Proteus*.

Com o intuito de alertar o condutor em caso de emergência o submódulo do trem possui: *ZigBee*, micro controlador, alarme e unidades de suprimento de energia, necessários para o envio de tempos em tempos de pacotes de dados para estações de controle, passagens de nível, estações, entre outros. O módulo do centro de controle possui: *ZigBee*, micro controlador, unidades de suprimento de energia, computador com software e uma base de dados com o propósito de receber os dados dos outros submódulos de uma determinada área de cobertura, processar os mesmos, e enviá-los para outros requerentes. Para as passagens de nível foram designados os seguintes componentes: *ZigBee*, micro controlador, alarme, unidades de suprimento de energia bem como um display visual, os quais são necessários para verificar constantemente a aproximação de trens (o alarme é acionado quando um trem encontra-se a uma distância limite de 3 km). O poste de sinalização possui: *ZigBee*, micro controlador e unidades de suprimento de energia, possibilitando assim o envio da cor atual em que se encontra o sinal, vermelho indica o condutor a parar o trem e amarelo alerta para redução da velocidade.

Segundo Arun et al. (2013), o sistema foi capaz de identificar trens na mesma via a uma distância de 3 km; o que permitiria uma margem de segurança grande no caso da necessidade de aplicação do freio de emergência, isso levando em consideração que um trem viajando a 140 Km/h necessita de 400 m para conseguir parar completamente. É válido ressaltar, com

relação ao trabalho citado que mesmo com a introdução de uma tecnologia de baixo custo, devido a sua praticidade, se consegue interligar vários sistemas diferentes existentes, resolvendo assim o problema observado por Arun et al. (2013).

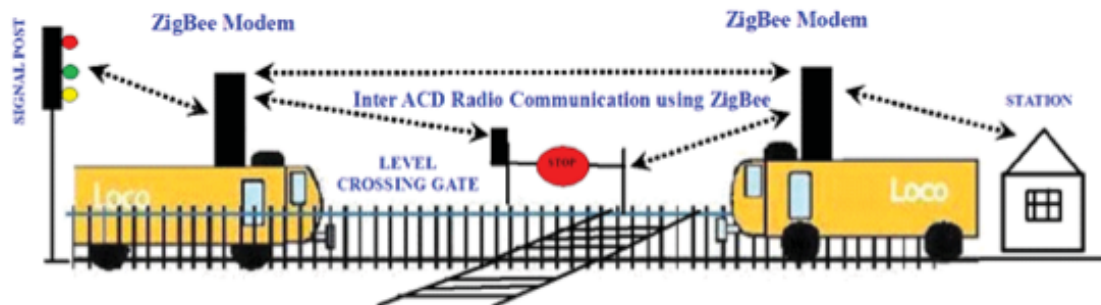


Figura 2-2. Módulos Sugeridos por Arun et al. (2013).

2.4 Estudo Experimental das Tecnologias Bluetooth, ZigBee e IEEE 802.15.4 em Trens de Alta Velocidade

Higuera et al. (2012) realizaram um estudo acerca de tecnologias sem fio com baixo consumo de energia, selecionando para este fim módulos *Bluetooth*, *IEEE 802.15.4* e *ZigBee*; todos sendo executados nas linhas de alta velocidade de trens no trecho Madrid-Barcelona, onde é possível alcançar velocidades de até 305 Km/h. A intenção de (Higuera et al. 2012) é investigar tecnologias de baixo custo que possam vir a ser integradas ao atual sistema ERTMS. As tecnologias em questão possibilitariam o monitoramento das condições da via, pantógrafos dos trens, temperatura das rodas, dentre outras variáveis, e para comparação das mesmas levou em consideração parâmetros como: tempo de conexão, desempenho e intensidade do sinal recebido.

Para realizar os testes Higuera et al. (2012) colocaram os nós, um para cada tecnologia sem fio, que irão receber as informações dos dispositivos instalados nos trens em postes de 15 m de altura, e similarmente nos trens que irão percorrer o trecho citado. Os módulos em questão são conectados a um computador para gravar e calcular estatísticas, juntamente com um GPS o qual obtém a localização e velocidade dos trens.

Os módulos *ZigBee* e *IEEE 802.15.4* realizaram transmissões de pequenas mensagens de 60 Bytes para 26 trens que passaram no trecho (ambos os sentidos) durante quatro dias, e como resultado o módulo *IEEE 802.15.4* obteve um tempo de conexão variando de 7 a 31 segundos de acordo com a velocidade (mesmo quando os trens atingiram a velocidade de 305 Km/h), enquanto que o módulo *ZigBee* obteve dificuldades a partir da velocidade de 275 Km/h. No caso do *Bluetooth*, o melhor mecanismo - de acordo com Higuera et al. (2012) - para esse propósito seria o uso de pequenas mensagens menores que 248 Bytes usando RNR (*Remote Name Request*), o qual é utilizado para descobrir nós *Bluetooth*, e obteve como resultado um

tempo mínimo de 0,85 segundos com intervalo de confiança de 95%. Com relação à intensidade do sinal recebido o *ZigBee* obteve medições de -50 dBm, enquanto que o *Bluetooth* apresentou o valor de -45dBm e o *IEEE 802.15.4* -60dBm, demonstrando assim, que para todos os casos o *Bluetooth* obteve uma melhor faixa de cobertura.

2.5 Diagnóstico de Falhas em Tempo Real do Truque de Trens Usando Sensores FBG

O objetivo do projeto desenvolvido por Wei et al.(2012) é monitorar a temperatura de várias partes críticas de um trem através de dezoito "*Fiber Bragg Grating*" (FBG), um sistema para capturar os dados dos sensores, e um software para processar e expressar um diagnóstico ao condutor do trem, diminuindo assim o número de mecanismos quebrados devido à ausência de um monitoramento em tempo real.

O uso dos FBG se deve ao fato dos mesmos não sofrerem interferência eletromagnética, ou seja, a quantidade de dados imprecisos será reduzida; além de serem ideais para longa distância (Wei et al. 2012). Conectado via fibra óptica aos sensores FBG está o sistema de controle central, o qual é constituído por: "*interrogation system*" (emissão e captura da reflexão de raios laser em componentes), um computador, e o software para processamento e apresentação. A emissão e captura da reflexão de raios laser em componentes (si425) é utilizada para medir o comprimento da onda repassada pelos sensores FBG, sempre comparando o antes e depois da mesma, possibilitando então, o cálculo da mudança de temperatura que será repassado ao computador, onde os dados serão processados pelo software desenvolvido através do ambiente *LabView*. O sistema então é capaz de apresentar essas informações ao condutor do trem de uma forma mais amigável (testado em uma linha expressa do aeroporto de Hong Kong), informando em tempo real, as condições de equipamentos como: freios, motor, eixo, engrenagens, etc.

2.6 Sistema Telemétrico Dinâmico Sem Fio Aplicado aos Veículos Rodoferroviários em Malhas Metro Ferroviárias: RailBee

Araújo (2009) relata a forma atual de captura de dados nos trens da CBTU/METROREC. Os engenheiros e técnicos da empresa selecionam um trem no qual um oscilógrafo é colocado no armário de uma das cabines conectando suas entradas analógicas nos sensores do mesmo. O modelo utilizado é o OR100E da YOKOGAWA, o qual possui quatro canais analógicos e mais quatro digitais, permitindo então, no caso citado, capturar informações como: velocidade, pressão, tensão, estado atual das portas, disjuntores, freios, etc. Enquanto o trem realiza sua viagem, o equipamento segue capturando os dados desejados para que assim que realizada sejam extraídos para um computador onde serão analisados e processados pelos técnicos e engenheiros da CBTU.

No entanto, esse método não é eficaz durante os trajetos das inúmeras viagens que são realizadas durante os dias, abrindo margem então para que alguns defeitos imprevisíveis venham a ocorrer. Como solução, é proposto um sistema telemétrico dinâmico de veículos em malhas metro ferroviárias que utilizam a transmissão de sinais via radiofrequência, de acordo com protocolo de comunicação padrão internacional. Compõe-se de micro controladores e um rádio transceptor, que, quando acoplados a sensores, captam e transmitem os dados em questão, funcionando como transdutores sem fio. Dessa forma, permite-se um auxílio em ações preventivas e corretivas de operação e manutenção dos veículos rodoferroviários, a fim de melhorar a qualidade dos serviços prestados.

Para realizar esta telemetria em tempo real, montou-se na via de tráfego uma rede de sensores sem fio, com tecnologia *ZigBee* a fim de captar e enviar os dados coletados de um trem até a estação base, onde um programa instalado em um computador pessoal fica encarregado de receber e enviar os dados obtidos, por meio da rede *ethernet*, a um sistema central de supervisão (Figura 2-3).



Figura 2-3. Visão Geral do Sistema RailBee (Araújo, 2009).

2.7 Análise das Tecnologias

Nesta seção foram citadas diversas tecnologias, todas com o mesmo fim, aperfeiçoar o monitoramento de trens e seus equipamentos para trazer como consequência o aumento da segurança e a qualidade dos serviços prestados para os usuários. Entretanto, fica saliente que em alguns casos elas se completam, ou seja, a deficiência (ou completa ausência) relacionada à determinada característica de uma tecnologia pode ser suprida através do uso de outra. É pensando desta forma que Shi et al. (2010) propuseram uma nova modelagem na estrutura da rede do sistema ERTMS, o qual já é consolidado e foi explanado por Tang et al. (2011). No entanto, ambos os casos possuem custos de implantação e manutenção muito altos, além da dependência de aprovação da Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL, Brasil) para alocação de frequência na faixa de 900 MHz (França, 2011), pois o ERTMS faz uso do GSM-R, característica essa que dificulta também o uso deste sistema para trens subterrâneos. Devido a

estas dificuldades Arun et al. (2013) fizeram uso de uma tecnologia de baixo custo de instalação e manutenção, não para substituir o existente, mas para incrementar a segurança dos trens indianos utilizando basicamente o *ZigBee* aliado à micros controladores. O uso do *ZigBee* foi crucial para obter uma solução capaz de monitorar mais de uma variável ao mesmo tempo e transmiti-las para outros nós da rede sem fio criada, com um baixo custo de energia, além de possuir a grande vantagem de permitir a integração de sistemas diferentes.

No entanto, faz-se necessário um comparativo entre as tecnologias existentes, bem como também com as promissoras, e é nesse âmbito que (Higuera, et al., 2012) identificam um fator determinante, a velocidade dos trens. Devido a necessidade de um tempo maior para efetivar a conexão o *ZigBee* obteve um desempenho sofrível em velocidade superior a 275 Km/h, o que não descarta por completo a utilização do protocolo nesse meio. Tendo em vista sua facilidade de implementação, baixo custo e capacidade de integração com outros sistemas o *ZigBee* demonstra ser um excelente candidato para sistemas subterrâneos de metrô em detrimento ao GSM-R, pois com custos extremamente baixos é possível criar uma rede subterrânea através de vários nós posicionados nos pontos críticos, que são as trajetórias curvas.

Dessa forma, aliando a evolução das tecnologias de transmissão sem fio à captura do estado dos equipamentos de um trem (Wei et al. 2012), torna-se possível transmitir esta informação em tempo real para equipes de técnicos e engenheiros que poderão identificar previamente possíveis defeitos antes que os mesmo venham a ocorrer durante um percurso (Araújo, 2009).

3 Fundamentação Teórica

Nesta seção serão abordados os conhecimentos necessários para compreensão das tecnologias utilizadas no sistema proposto. Além disto, também será posto em destaque o ambiente de teste na empresa CBTU/METROREC, bem como o funcionamento de alguns sistemas dos trens pertencentes à mesma.

3.1 IEEE 802.15.4

3.1.1 O que é IEEE 802.15.4?

Trata-se de um padrão destinado a regulamentar a realização de redes sem fio pessoais de baixa transmissão, o WPANs (*Wireless Personal Area Networks*). O intuito do padrão é conseguir, através de uma implementação simples, uma diminuição na potência de processamento (obtendo um baixo consumo) sem prejudicar características como: detecção de erro, retransmissão, confirmação de recebimento, etc.

O padrão, de acordo com o modelo OSI¹ de abstração, é definido em duas camadas: camada física (PHY) e a camada de enlace (MAC). A seguir, as mesmas serão detalhadas de acordo com (IEEE 802.15.4-2003).

¹ Organização Internacional para Normalização. Possui como objetivo permitir a comunicação entre máquinas heterogêneas (Modelo OSI, 2013).

3.1.2 Nível Físico: PHY

O nível físico inclui três bandas de frequência: 868 MHz, 915 MHz e 2,4 GHz. Por ser regulamentada na maior parte do mundo, a frequência de 2,4 GHz consequentemente é a mais utilizada (Caprile, 2009). A mesma possui 16 canais, variando de 11 a 26, separados por 5 MHz entre a faixa de 2405 a 2480. O fato de a transmissão ser feita usando DSSS² (*Direct Sequence Spread Spectrum*) possibilita a coexistência com o padrão 802.11 (b e g) como, por exemplo, os canais 15, 20, 25 e 26 que ocupam os espaços entre os canais 1,6 a 11 do padrão 802.11 b/g (Figura 3-1).

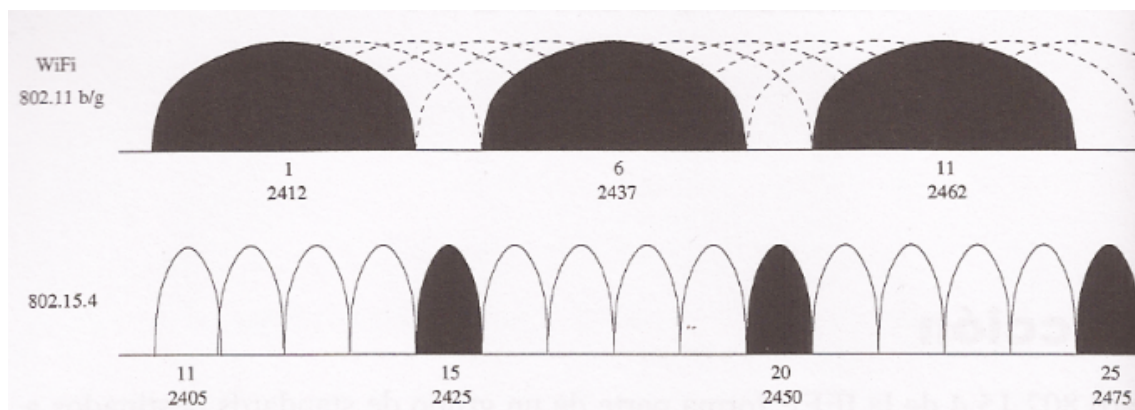


Figura 3-1. Espectro dos Canais (Caprile, 2009).

3.1.3 Nível de Enlace (data-link): MAC

Segundo (Zhou, Xing, & Yu, 2006), o MAC pode operar em dois modos: *beacon* habilitado ou desabilitado. Quando o mesmo encontra-se desabilitado funciona apenas como um protocolo CSMA-CA³. No modo *beacon* habilitado, o padrão IEEE 802.15.4 usa uma estrutura de *superframe*, o parâmetro *Beacon Order* decide o tempo entre cada *superframe* e o parâmetro *Superframe Order* descreve a duração da porção ativa do *superframe*, sendo a parte ativa dividida igualmente em dezesseis *time slots*, o qual é dividido em três partes: *beacon*, Período de Acesso Contido (CAP) e Período de Colisão Livre (CFP).

Para ser possível garantir a integridade da transmissão do quadro, o MAC provê serviços de retransmissão e detecção de erros (FCS) mediante CRC. Os quadros possuem um *header*, o qual transporta o identificador do tipo do mesmo e direcionamento, bem como um *footer* que transporta informações direcionadas para identificação de erros (Figura 3-2).

² Técnica da modulação do espectro de propagação. Fornece uma densidade espectral da potência muito baixa, espalhando a potência do sinal sobre uma faixa de frequência muito larga (DSSS, 2013).

³ Protocolo o qual procura minimizar as colisões maximizando a utilização do canal (CSMA/CA, 2013).

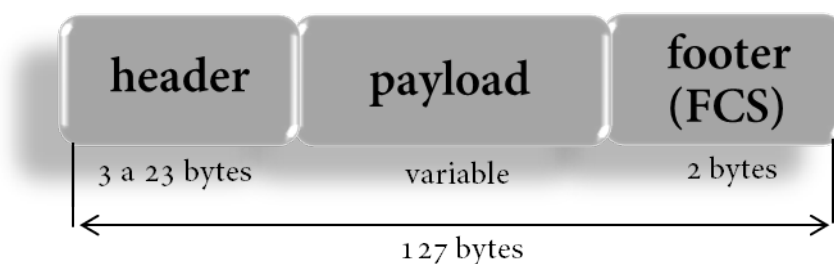


Figura 3-2. Quadro MAC.

3.1.4 Topologia

Os tipos dos dispositivos conectados a uma rede 802.15.4 podem ser: *Full Function Device* (FFD) ou *Reduced Function Device* (RFD). Respectivamente, os primeiros “conversam” com qualquer um dos dois tipos, enquanto que o segundo realiza transmissões apenas para dispositivos FFD.

As redes podem ser caracterizadas pelo fato de possuírem ou não dispositivos coordenadores. O primeiro caso trata-se de redes *ad hoc*, a qual os nós realizam transmissões no instante em que desejam, ou seja, os dispositivos que desejam comunicar-se entre si devem estar com o receptor sempre no aguardo, devido a isso, é possível obter topologias *peer to peer* ou ponto a multiponto (*broadcast*). No segundo caso, é possível a obtenção de uma topologia estrela, permitindo assim, o sincronismo entre os dispositivos FFD e RFD, bem como o emprego de *beacon*; vale ressaltar aqui a necessidade de o coordenador ser um dispositivo do tipo FFD.

3.2 Protocolo ZigBee

3.2.1 O que é ZigBee?

ZigBee é um protocolo criado no ano de 2002 pela *ZigBee Alliance*, uma associação de empresas que trabalham em conjunto para desenvolver tecnologias baseadas em um padrão aberto global, que possibilitem comunicação sem fio confiável, com baixo consumo de energia e baixo custo para aplicações de monitoramento e controle. A pilha de protocolos *ZigBee* encontra-se apoiada sobre o padrão 802.15.4, o qual define os níveis físicos e de enlace, PHY e MAC, respectivamente.

Para completar o padrão, o protocolo *ZigBee* adiciona duas camadas de alto nível de rede para a estrutura básica (ZigBee, 2013): as camadas de rede e aplicação, responsáveis respectivamente pelo roteamento e comunicação entre diversas aplicações mediante um identificador de circuito virtual denominado *endpoint*.

Como especificado pelo padrão 802.15.4, uma rede *ZigBee* utiliza um dos dezesseis canais de 5 MHz disponibilizados pela largura de banda de 2.4 GHz (além dos 868 MHz e 915 MHz utilizados na Europa e Estados Unidos, respectivamente), e possui três tipos de nós: coordenador, roteador e dispositivo final, os quais serão melhor explanados em breve.

3.2.2 Estrutura

A estrutura adicionada pela *ZigBee Alliance* é constituída pela camada de rede (NWK) e o *framework* para a camada de aplicação, o qual inclui: o protocolo APS (*Application Support Sublayer*), os Objetos de Dispositivo *ZigBee* (ZDO) e os objetos de aplicação (*Application Object*) definidos pelo fabricante. A seguir, a Figura 3-3 demonstra a arquitetura do protocolo *ZigBee* (*ZigBee Specification Overview*).

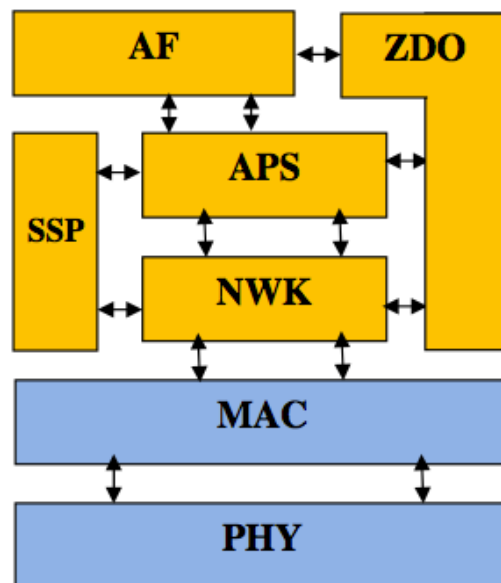


Figura 3-3. Arquitetura do Protocolo *Zigbee* (Araújo, 2009). AF- *Application framework*, ZDO – Objetos de Dispositivo *ZigBee*, APS *Application Support Sublayer*, SSP - Provedor de Serviços de Segurança, NWK – camada de rede , MAC - camada de enlace, PHY - camada física.

A NWK inclui mecanismos usados na conexão e desconexão de dispositivos numa rede, de aplicação de segurança aos frames e roteamento para seus destinos, possibilitando também a descoberta e manutenção de rotas entre os dispositivos envolvidos na rede. O coordenador da NWK é responsável por iniciar uma nova rede e atribuir endereços para os novos dispositivos associados (Araújo, 2009), além de permitir a descoberta de novas rotas após a detecção de algum problema de roteamento.

A arquitetura distribuída do protocolo *Zigbee* é caracterizada pelo fato de uma aplicação ser implementada de forma conjunta por cada um dos integrantes de uma rede, coordenada mediante o intercâmbio de mensagens. Essas aplicações possuem um conjunto de regras, definidos por *profiles*. Como cada rede pode suportar mais de uma aplicação, e cada dispositivo também, a verificação de qual *profile* é suportado por determinado dispositivo fica a cargo do ZDO, o qual se encarrega da tarefa de configuração e funcionamento automático, permitindo assim que um novo dispositivo possa ingressar na rede e realizar sua configuração

automaticamente. Isto é possível devido à troca de mensagens entre os ZDOs de diferentes dispositivos, que por sua vez interage com a subcamada APS, responsável pela manutenção das tabelas para *binding*, que nada mais é que o processo de “descobrir e associar-se”.

O AF (*Application framework*) é o ambiente em que os objetos da aplicação são hospedados nos dispositivos *ZigBee*. Esse ambiente possui perfis de aplicação que definem acordos para as mensagens, formatos de mensagens e processamento de ações. Completando a arquitetura encontra-se o Provedor de Serviços de Segurança (SSP) que oferece mecanismos de segurança para as camadas de rede e aplicação, no entanto, a segurança geral é definida no nível do perfil da aplicação, o qual define o tipo de segurança implementado dentro de uma rede específica (Araújo, 2009).

3.2.3 Tipos de nós

Como já dito anteriormente, existem três tipos de nós, cada um com sua característica específica. Os roteadores (dispositivos FFD – *Full Function Device*) são responsáveis por retransmitir informações dos dispositivos finais para nós coordenadores, ou para outros roteadores quando não é possível entregar diretamente ao destino final, para isso, o mesmo deve “aprender” como chegar ao objetivo e verificar as rotas possíveis. Os roteadores também podem ser considerados coordenadores de um pequeno grupo de *end devices* quando se faz necessário o armazenamento das mensagens destinadas a estes e os mesmo estão “adormecidos”.

O coordenador possui todas as funções de um nó roteador, no entanto, tem como principal característica a inicialização, distribuição de endereços, manutenção da rede e reconhecimento de todos os nós.

Os dispositivos RFD (*Reduced Function Device*) podem atuar apenas como *end devices*, os quais devem ser instalados nos locais onde se encontram os atuadores e sensores, possibilitando assim a captura e envio das informações desejadas. Vale ressaltar que os nós finais são os únicos que são permitidos “adormecer” periodicamente.

3.2.4 Topologia

Uma rede *ZigBee* pode ser caracterizada por três tipos de topologia: árvore, estrela ou malha. A topologia estrela é pouco usada em aplicações de grande demanda devido ao fato que possui apenas um coordenador e vários dispositivos finais, proporcionando assim um acréscimo no *overhead*⁴. Portanto, é recomendada para automação residencial, periféricos de computador pessoal, jogos e aplicações médicas (Golmie et al. 2004).

A topologia em árvore adiciona a figura do nó roteador, o qual se conecta com os dispositivos finais de sua subrede e com o coordenador de toda a árvore. Esta configuração não permite a comunicação entre roteadores; a mesma necessita transitar pelo coordenador para alcançar

⁴ Processamento ou armazenamento em excesso (Overhead, 2013).

uma subrede diferente da origem do quadro. Entretanto, possibilita a comunicação *end devices* → *router* → *end devices* de uma subrede sem a necessidade de transição pelo coordenador geral (o *router* realiza, nesse caso, a função de coordenador da subrede).

Uma rede em malha provê alta confiabilidade, pois diferentes das anteriores, possibilita a comunicação entre os nós roteadores, ou seja, os roteadores devem descobrir a rota para que a mensagem chegue ao destino final, desta forma, existem diversos caminhos que um quadro pode percorrer (Figura 3-4).

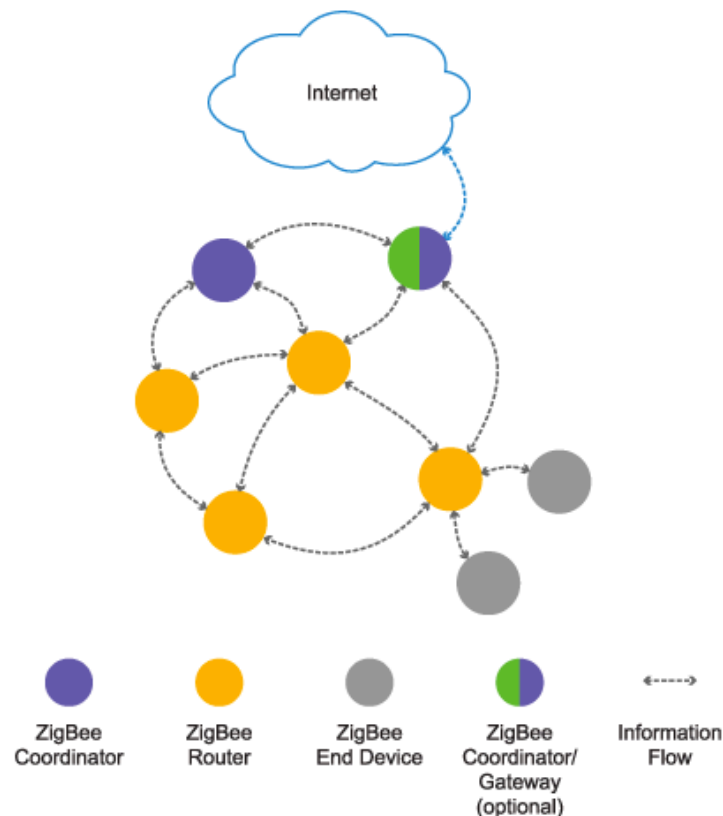


Figura 3-4. Topologia em Malha (ZigBee Specification Network Topology).

3.2.5 Protocolo de Roteamento: NWK

Como já dito anteriormente, dentre outras funções o protocolo NWK é responsável pelo roteamento de informações afim que as mesmas cheguem ao seu destino final. Para isso, a informação transmitida pelo NWK é feita através de quadros com um cabeçalho (*header*), o qual transporta a informação de controle, direcionamento e roteamento (no caso da utilização de *routers*) sem a necessidade de checagem de integridade, pois é realizada em níveis inferiores (Caprile, 2009).

É importante destacar, no cabeçalho do NWK, o campo *SRC addr* (Figura 3-5), pois o mesmo é responsável por identificar os nós dentro de uma rede. Para isso, o espaço destinado para o campo em questão é de 16-bits. Outro campo importante a ser tratado é o de nome *radio*,

responsável por evitar laço errados e *broadcasts* sem controle, pois o mesmo é decrementado cada vez que é transmitido por um *router* (Caprile, 2009).

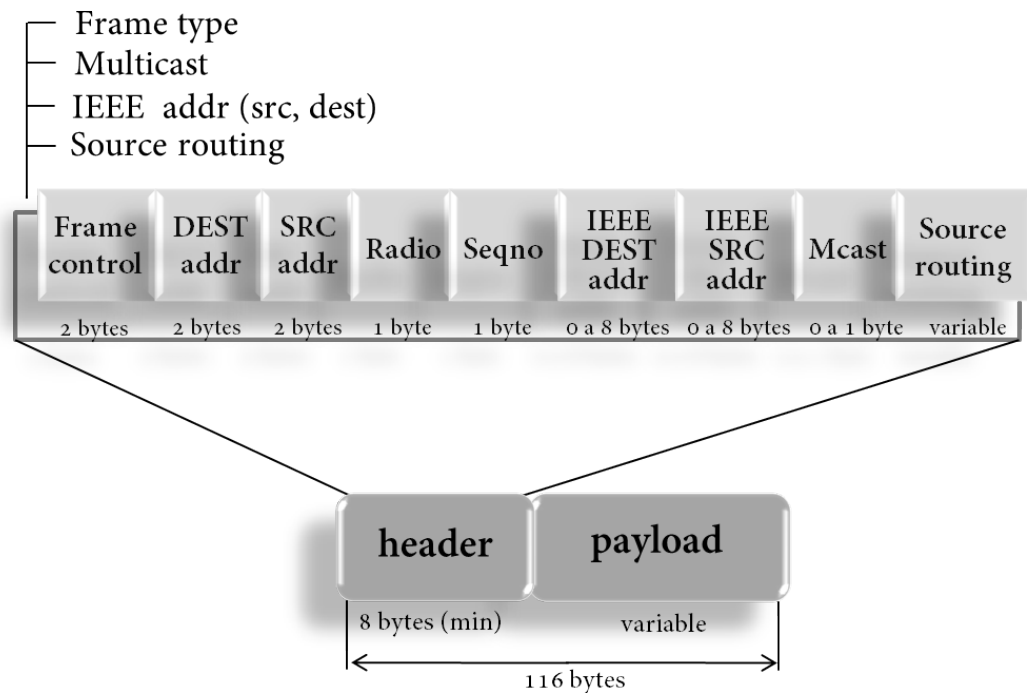


Figura 3-5. Estrutura do Quadro NWK.

3.2.6 Protocolo de Transporte: APS

Protocolo responsável pelo transporte na pilha de protocolos *ZigBee* provê múltiplos circuitos virtuais na comunicação entre dispositivos e da mesma forma que protocolo NWK, o APS não realiza checagem de integridade. Os quadros APS são transportados pelos quadros NWK que por sua vez são transportados por quadros de dados *802.15.4* (Figura 3-6).

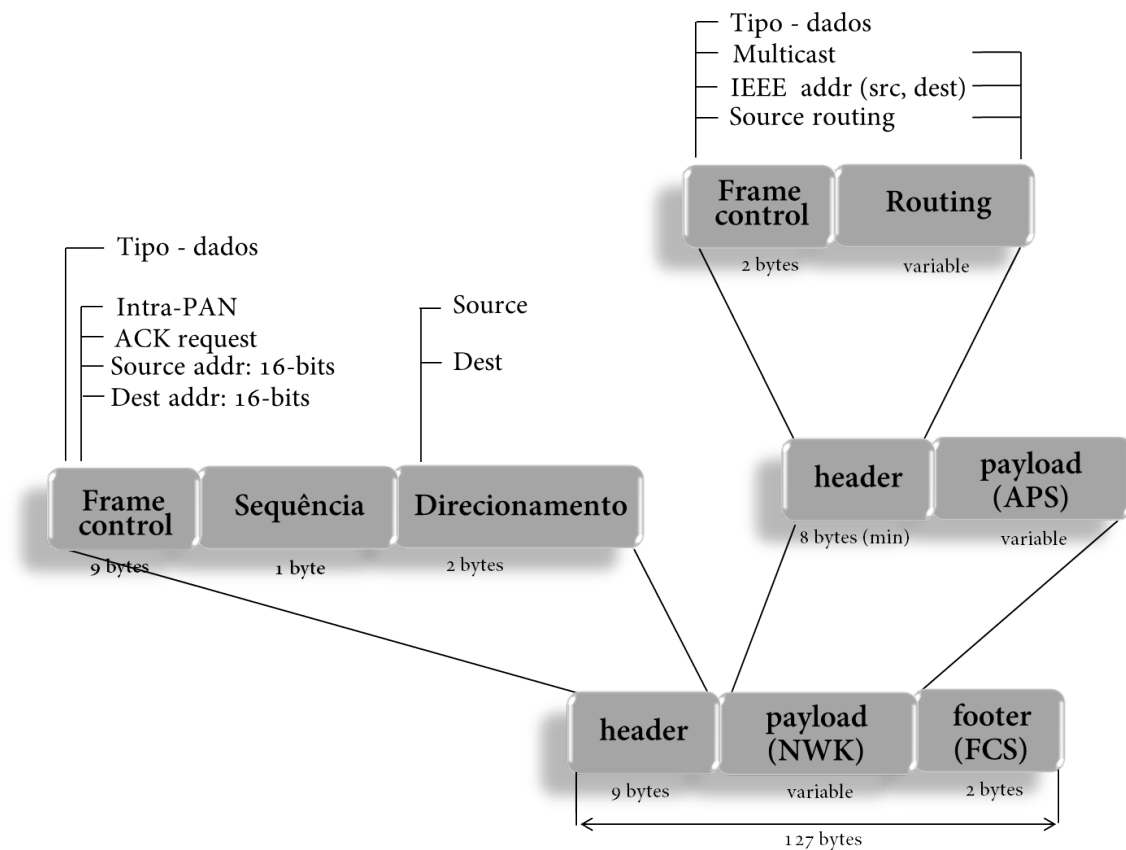


Figura 3-6. Relação entre IEEE 802.15.4, NWK e APS.

O protocolo APS apresenta dois tipos de serviço: com confirmação de recepção e sem confirmação de recepção. A indicação se dá através de um *flag* contido no campo *Frame Control* que pode ser observado na Figura 3-6. A utilização deste serviço proporciona a necessidade de tempos limites (*timeouts*) para evitar retransmissões desnecessárias.

O campo *delivery mode* indica o tipo do direcionamento que deve ser entregue o quadro APS: *unicast*, *broadcast* ou *multicast*. O modo *unicast* é caracterizado por ser a forma mais simples, pois se trata da conexão entre dois *endpoints*. Já o direcionamento *broadcast* implica que o quadro poderá ser enviado por NWK a todos os dispositivos. O *multicast*, por não ser previsto no nível NWK foi implementado no APS, é caracterizado por fazer uso de uma tabela com os *endpoints* existente no campo *Grp addr* (Caprile, 2009).

3.2.7 Segurança

De acordo com *ZigBee Specification Overview* a segurança é considerada não apenas na transmissão dos dados, mas também na inclusão de novos nós na rede. O esquema de criptografia utilizado é o CCM⁵, o qual provê confidencialidade e integridade (Modo de Operação (criptografia), 2013) mediante AES-128 (*Advanced Encryption Standard*).

A especificação *ZigBee* fornece dois tipos de chave: *network key* e *link key*. A primeira é conhecida por todos os dispositivos de uma rede para proteger as informações de todo o tráfego, enquanto a segunda é empregada para proteger o fluxo de informação entre duas aplicações. Existem dois modos de segurança: *standard security mode* e *high security mode*. O primeiro é destinado a instalações residenciais onde normalmente não é tão crítica a necessidade de segurança da informação. Neste caso, os dispositivos se comunicam livremente entre si e com o coordenador usando a chave de rede, que pode estar pré-instalada ou mediante transporte⁶. Já o modo de alta segurança, destinado a aplicações comerciais, permite a comunicação mediante a chave de rede ou de enlace; dessa forma, o coordenador deve manter uma lista de todas as chaves e realizar as operações de transporte e estabelecimento (Caprile, 2009).

Com relação aos protocolos NWK e APS, o campo *frame control* de seus quadros possui uma *flag* para indicar que o mesmo está transportando conteúdo protegido, dessa forma, um cabeçalho auxiliar e o MIC (*Message Integrity Code*, código de integridade da mensagem) são adicionados no início e no fim do campo *payload*, respectivamente. O MIC é utilizado para detectar modificações tanto na informação como também nos campos do cabeçalho.

3.2.8 Comparativo entre Tecnologias

O *Wi-Fi* e o *Bluetooth* são as tecnologias mais utilizadas nos dias atuais que normalmente são comparadas com o *ZigBee* (Tabela 3-1). No entanto, a primeira possui como objetivo claro a comunicação entre computadores pessoais, pois necessita de uma grande largura de banda e velocidade, além de possuir um consumo de energia relativamente alto quando comparado às outras duas tecnologias. O *Bluetooth*, o qual tem como mercado principal a telefonia móvel, consegue uma redução drástica no que diz respeito à energia, porém possui a grande limitação de conexão entre apenas sete dispositivos, além de um alcance curto quando comparado ao *ZigBee*.

O protocolo *ZigBee*, como se pode verificar na Tabela 3-1, permite um baixo consumo de energia (principalmente devido ao recurso de *standby*), menor tempo de inclusão de um nó na rede (30 ms, ideal para sistemas de tempo real), a possibilidade de criação de redes com até 65536 nós - apesar de (Ascariz & Boquete, 2007) recomendar como limite 3000 nós -, uma taxa de transferência de 250 Kbps - que dependendo da aplicação (captação de informação de sensores) pode-se considerar suficiente - e um alcance que pode chegar a 1600 m. Devido a

⁵ Modo de operação que permite ciframento de mensagens de tamanho arbitrário.

⁶ A chave é transportada pela rede, podendo estar cifrada e protegida por outra chave (Caprile, 2009).

essas características, o *ZigBee* é considerado um protocolo distinto quando comparado aos outros protocolos existentes.

Tabela 3-1. Comparativo entre Tecnologias (Araújo, 2009).

Características	Protocolo de comunicação		
	ZigBee	Bluetooth	Wi-Fi
Taxa de transferência	250 Kbps	1 Mbps	54 Mbps
Modulação	DSSS	FHSS	DSSS/OFDM
Alcance	1600 m	10 m	100 m
Tempo de acesso à rede	30 ms	3 s	3 s
Tempo de transição para o estado ativo	15 ms	3 s	----
Corrente de transmissão	30 mA	40 mA	400 mA
Corrente em standby	3 μ A	200 μ A	20 mA
Duração de baterias	1000 dias	1 a 7 dias	0,5 a 5 dias
Número de nós	65536	7	32

3.3 Sistema de Transporte de Passageiros da CBTU/METROREC

Segundo METROREC (2013) o sistema de transportes de passageiros sobre trilhos da Região Metropolitana do Recife, no Estado de Pernambuco, é administrado pela CBTU/METROREC. Essa superintendência fornece seus serviços para os municípios de Recife, Jaboatão dos Guararapes, Camaragibe e Cabo de Santo Agostinho, influenciando também os demais municípios da Região Metropolitana (Figura 3-7) através das integrações com o Sistema Estrutural Integrado (SEI).

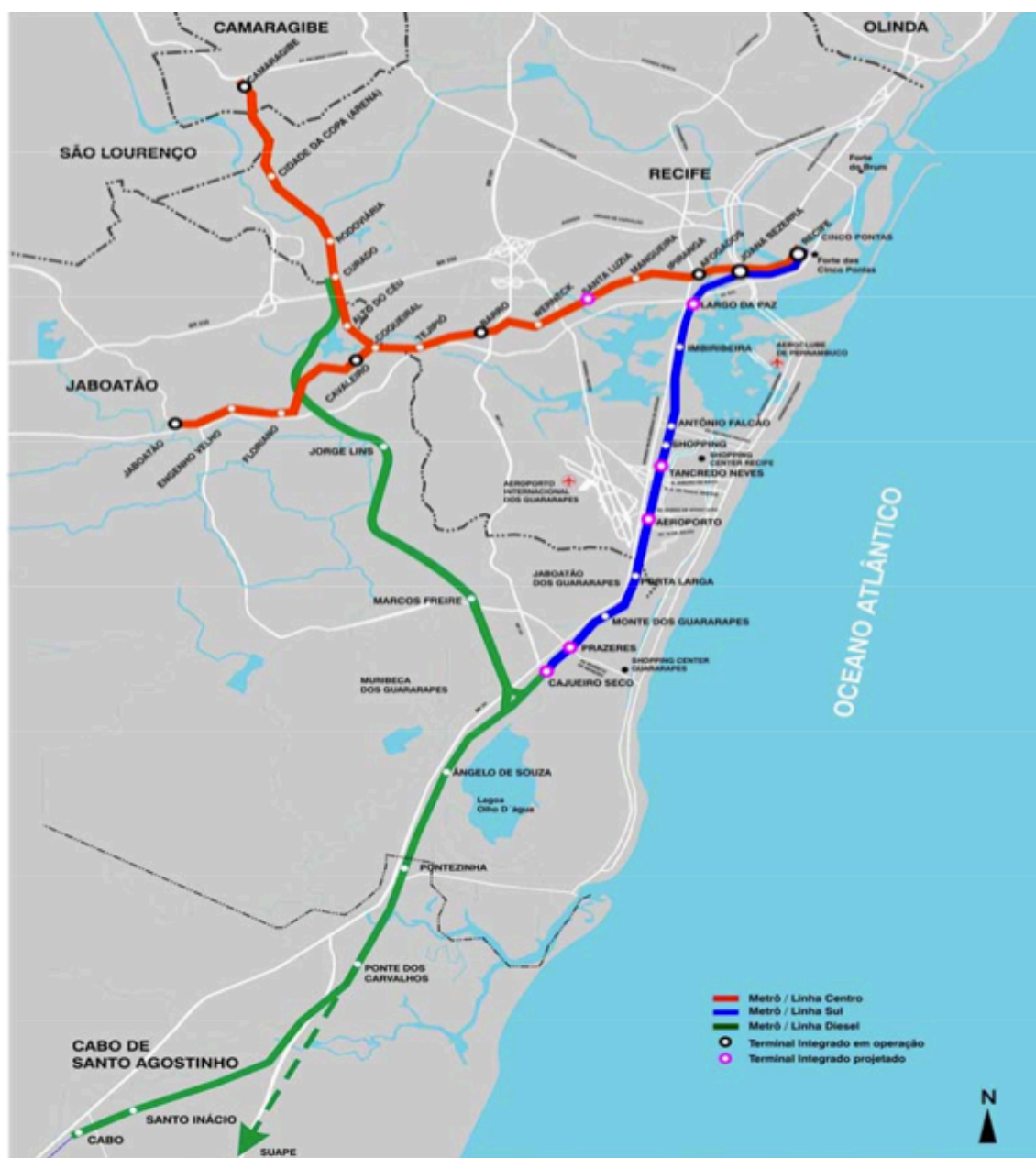


Figura 3-7. Rede Básica das Linhas da CBTU/METROREC (Araújo, 2009).

O sistema sobre trilhos possui três linhas implantadas nos corredores ferroviários centro e sul da Região Metropolitana do Recife: Centro e Sul, com padrão de trem metropolitano e tração elétrica, a Linha Diesel, com trem de subúrbio e tração a diesel. O traçado da Linha Centro é definido por uma linha troncal que parte da Estação Recife, na área central da cidade, e segue no sentido oeste até a Estação Coqueiral, onde se divide em dois ramais: Jaboatão e Camaragibe. A Linha Sul inicia-se paralelamente à Linha Centro, com as estações Recife e Joana Bezerra comuns a ambas as linhas, e segue na direção sul até a Estação Cajueiro Seco (METROREC, 2013).

3.4 Trem Unidade Elétrica

O sistema de transportes de passageiros sobre trilhos da Região Metropolitana do Recife, no estado de Pernambuco, possui em seu material rodante vinte e cinco TUE alimentados por uma rede aérea de 3000 volts e operando em via dupla e exclusiva (METROREC, 2013). A seguir, serão apresentados os principais sistemas existentes nos mesmos.

3.4.1 Estrutura

Um TUE é constituído por quatro carros, sendo dois carros-motores e dois carros-reboques. O carro-reboque (Figura 3-9) possui a capacidade de transportar 289 passageiros, enquanto o carro-motor (Figura 3-8) tem a capacidade de lotação de 268 passageiros, essa diferença se deve à existência das cabines de comando nas extremidades. Alguns dos sistemas existentes nos carros são: Caixa, truque, elétrico, tração, pneumático e freio (CBTU/METROREC, 2009).



Figura 3-8. Carro-Motor (CBTU/METROREC, 2009).



Figura 3-9. Carro-Reboque (CBTU/METROREC, 2009).

A caixa é a parte superior do carro destinada a acomodar e transportar passageiros de forma confortável e segura. A diferença das caixas do carro-motor para as do carro-reboque é justamente a existência da cabine de comando. Os seguintes componentes fazem parte da mesma: Estrutura, revestimento, salão de passageiros e cabine de comando (carro-motor).

O truque (Figura 3-10) é o conjunto de equipamentos que sustenta e possibilita o deslocamento da caixa; os carros do trem unidade elétrico possuem dois truques cada um. O mesmo está dividido em três partes: Estrutura (Figura 3-11), conjunto rodeiro (Figura 3-12) e suspensão (Figura 3-13 e Figura 3-14).



Figura 3-10. Truque (CBTU/METROREC, 2009).



Figura 3-11. Estrutura (CBTU/METROREC, 2009).



Figura 3-12. Conjunto Rodeiro (CBTU/METROREC, 2009).



Figura 3-13. Suspensão Primária (CBTU/METROREC, 2009).

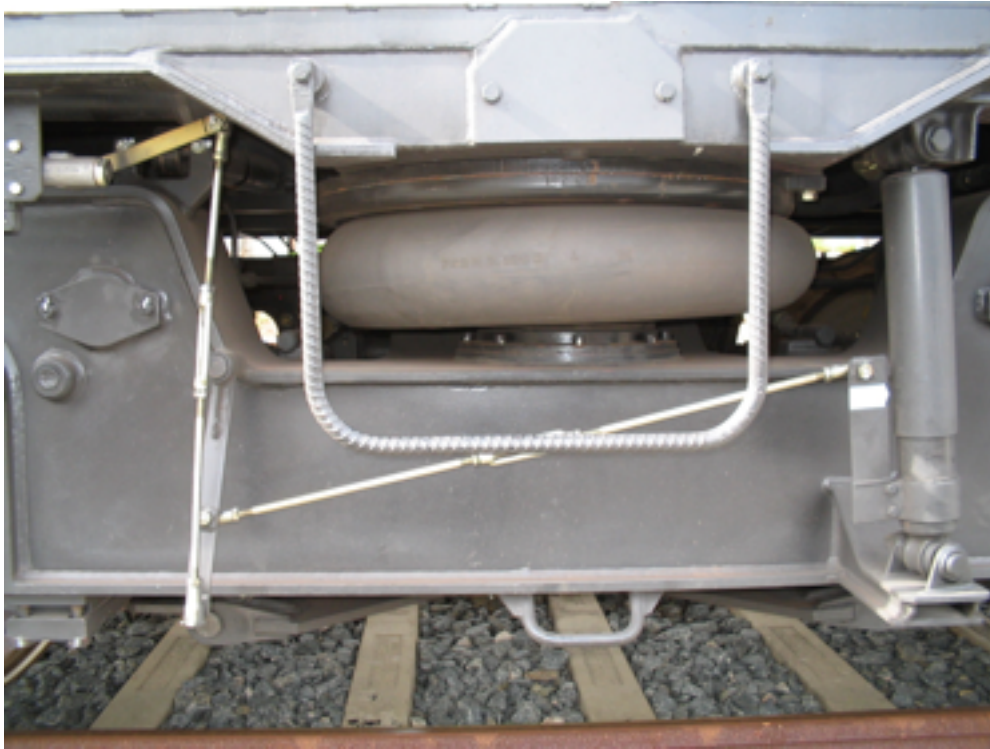


Figura 3-14. Suspensão Secundária (CBTU/METROREC, 2009).

3.4.2 Sistema Elétrico

O sistema de alimentação elétrica tem por finalidade captar, transformar e retificar, distribuindo assim tensões elétricas diferentes para os diversos circuitos e equipamentos elétricos do TUE. A tensão nominal do circuito de alta tensão é de 3000 Vcc, a mesma é captada da rede aérea (Figura 3-15) pelo TUE através dos pantógrafos (Figura 3-16) que se situam na parte superior dos carros-motor, dessa forma, é possível alimentar o: Motor de tração e o motor alternador (CBTU/METROREC, 2009).



Figura 3-15. Rede aérea (CBTU/METROREC, 2009).



Figura 3-16. Pantógrafo (CBTU/METROREC, 2009).

Cada carro motor possui quatro motores de tração (Figura 3-17), os quais são alojados sob os truques, e possuem como função básica tracionar o TUE e efetuar a frenagem dinâmica. Já os motores alternadores (Figura 3-18) recebem os 3000 Vcc e convertem para 220 Vca com o intuito de alimentar o circuito de baixa tensão: iluminação, climatização e compressor (CBTU/METROREC, 2009).

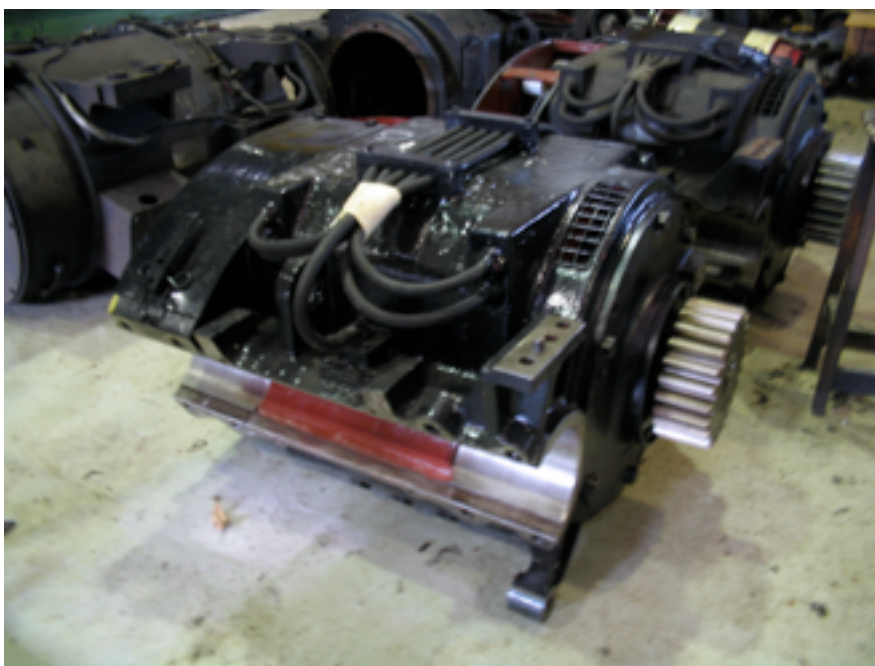


Figura 3-17. Motor de Tração (CBTU/METROREC, 2009).

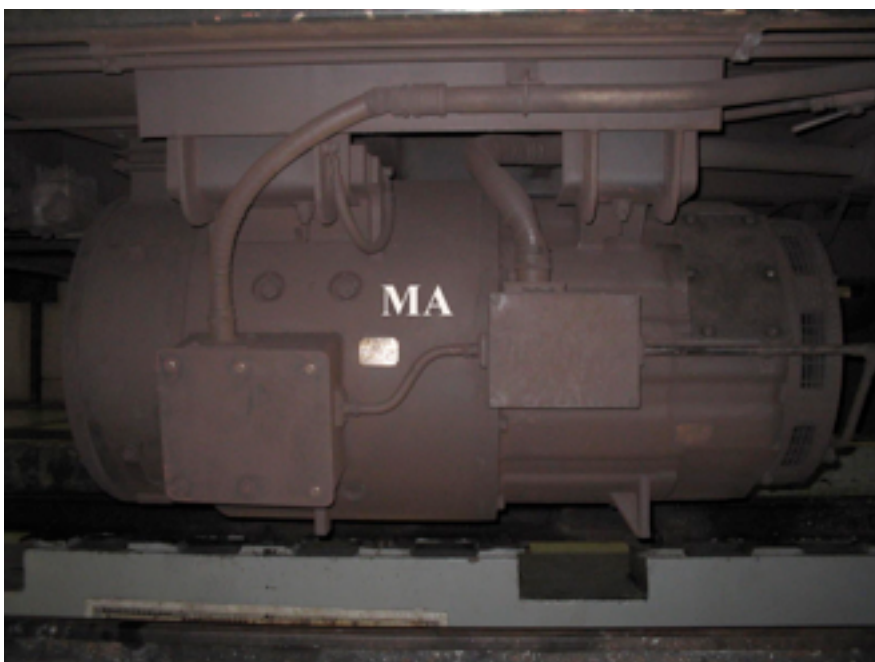


Figura 3-18. Motor Alternado (CBTU/METROREC, 2009).

3.4.3 Sistema Pneumático

O sistema pneumático possui a função de comprimir, armazenar e distribuir ar para os equipamentos do TUE que fazem uso de ar comprimido: Portas, freio, limpador de para-brisa, suspensão primária e secundária. Seus componentes principais são os seguintes: Compressor principal, compressor auxiliar, reservatórios e tubulações.

O compressor principal (Figura 3-19) possui a função de retirar o ar da atmosfera e comprimi-lo nos reservatórios, para isso existem dois por TUE, um em cada carro-reboque, ambos sendo alimentados pelo motor alternador. A faixa de pressão de trabalho, a qual é mantida através de um pressostato, é de 850 a 1000 Kpa no reservatório principal (CBTU/METROREC, 2009).



Figura 3-19. Compressor Principal (CBTU/METROREC, 2009).

Quando a pressão do encanamento principal estiver abaixo de 600 Kpa o compressor auxiliar (Figura 3-20) produz ar comprimido para o sistema de elevação do pantógrafo com a intenção de alimentar os controles do sistema de tração. Existem dois compressores auxiliares para cada TUE, situados nos carros-motor, sob um dos bancos do salão de passageiros (CBTU/METROREC, 2009).



Figura 3-20. Compressor Auxiliar (CBTU/METROREC, 2009).

Para armazenar o ar comprimido gerado pelos compressores o TUE possui quatro reservatórios principais (Figura 3-21), sendo dois para cada carro-reboque e quatro reservatórios suplementares, um em cada carro, utilizados no sistema de freio.

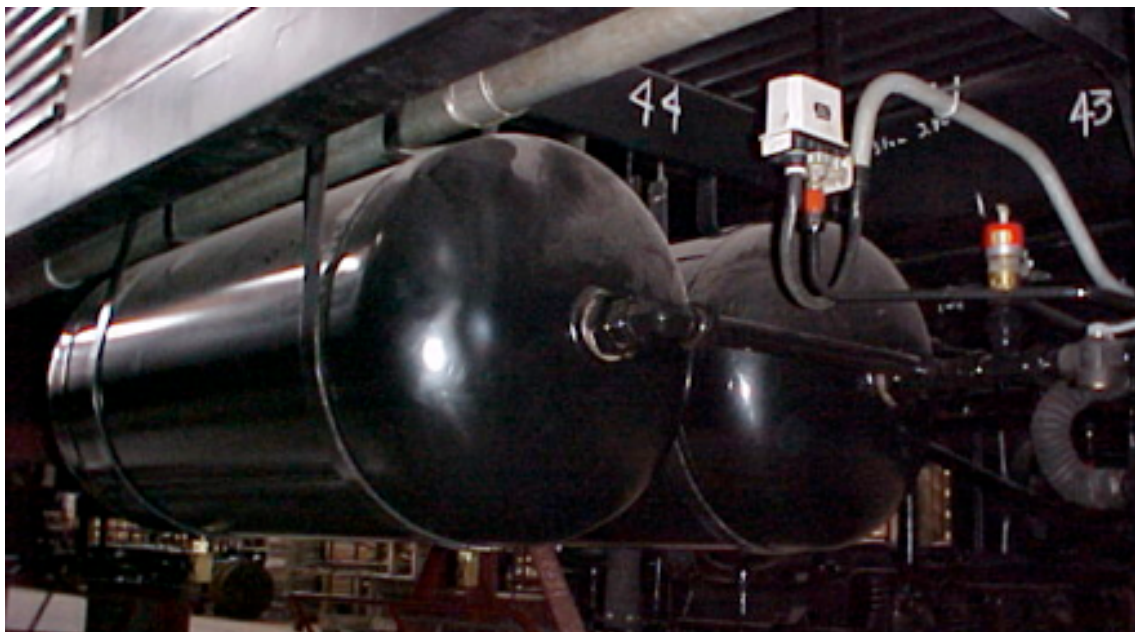


Figura 3-21. Reservatórios Principais (CBTU/METROREC, 2009).

3.4.4 Sistema de Freio

O trem unidade elétrica é provido de um sistema de freio eletropneumático, especialmente projetado para trens que operam em condições que requerem altas velocidades médias e distâncias curtas de parada.

Um manipulador de freio (Figura 3-22), instalado nas cabines de comando, controla os freios através de seu movimento manual, possibilitando assim a obtenção de cinco graus de aplicações de freio, ou alívio, à medida que é movimentado (CBTU/METROREC, 2009).



Figura 3-22. Manipulador de Freio (CBTU/METROREC, 2009).

Nos carros-motor a pressão de pré-controle é encaminhada a válvula de freio reostático, a qual aplica esse tipo de freio quando a velocidade do TUE é superior a 10 Km/h, ou seja, inverte o sentido da corrente dos motores de tração para reduzir a velocidade do trem (CBTU/METROREC, 2009).

Abaixo de 10 Km/h, estando o manipulador de freio ainda acionado, ocorre um escapamento de ar do encanamento geral. Esse escapamento é detectado pela Válvula Controle, que gera uma pressão proporcional ao mesmo, essa vazão é identificada pela Válvula Relé que também recebe a informação a respeito do peso do carro, através da Válvula de Pressão Média, para através da análise das duas variáveis citadas transferirem a quantidade de ar do reservatório

de ar suplementar para os cilindros de freio, possibilitando assim a aplicação do freio pneumático (Figura 3-23) nos carros motores, no entanto no caso dos carros-reboque o freio pneumático é utilizado desde o início da aplicação de frenagem (não possui freio reostático).

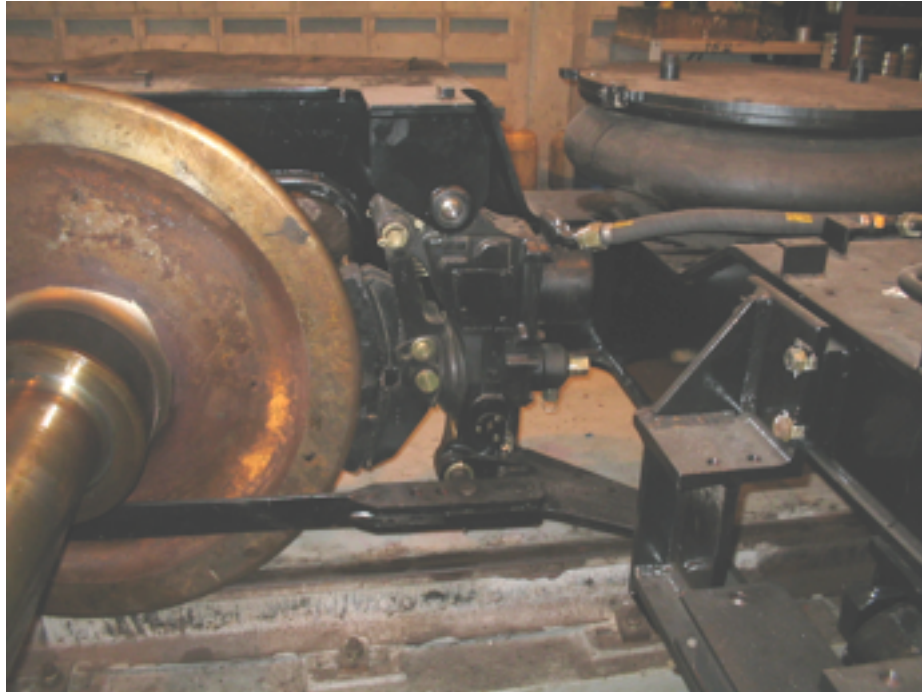


Figura 3-23. Freio Pneumático (CBTU/METROREC, 2009).

A combinação dos dois tipos de freios citados busca obter uma taxa de desaceleração necessária e suficiente para parar por completo o trem. O sinal de entrada para geração dessa taxa de frenagem é proveniente de um transdutor de pressão “AETB” (*Amplifier Electronic Transducer Brake*) (Anexo VI), que realiza a conversão proporcional da pressão do sistema de controle pneumático de frenagem para seu valor em tensão (Eletrocontroles Villares Ltda, 1985). Após isso, o sinal segue para o módulo de seleção de taxa (STA) (Anexos II e III) onde é realizada uma compensação tendo como referência o peso atual do trem (influenciado pela quantidade de usuários no momento) que é proveniente do transdutor “AETW” (*Amplifier Electronic Transducer Weight*) (Anexo VI). Finalmente, ainda no STA, o sinal é processado podendo ser reduzido pelo “*sinal limite de comutação*”, que é definido pela máxima velocidade do veículo e assegura o desempenho de frenagem nos limites dos motores em alta velocidade, atuando a partir de 85 Km/h, evitando assim uma taxa de frenagem muito alta (CBTU/METROREC, 2006).

O princípio de segurança total é mantido durante todo o tempo de operação, pois uma aplicação de freios de emergência pode ser iniciada através do manipulador de freio, de uma válvula de emergência ou em caso de ruptura do encanamento geral (CIA. Industrial Santa Matilde, 1984).

4 Sistema de Análise da Qualidade da Frenagem de Trens Através de Telemetria

Nesta seção será apresentada a implementação de um sistema que propõe aperfeiçoar a análise da qualidade dos freios de um trem dentro do sistema de metrô, o qual tem como base a telemetria sugerida por Araújo (2009).

O sistema aqui proposto permite sua utilização tanto em ambientes com uma estrutura e investimentos maiores, que possibilitam uma captura mais apurada devido ao alto nível de aplicação em tecnologias que fazem o monitoramento constante de diversos sensores, quanto em empresas metro ferroviárias com instalações mais simples, pois este sistema faz uso de variáveis que mesmo de forma precária, por razões de segurança, são analisadas esporadicamente; além disto, possui um custo de implantação bem menor comparado aos existentes e já citados.

Dessa forma, a seguir serão explanados os softwares e hardwares utilizados para seu desenvolvimento; o fluxo de funcionamento do mesmo; o ambiente de teste que permitiu a validação do sistema e as melhorias propostas que também serão citadas como trabalhos futuros posteriormente.

4.1 Visão Geral do Sistema e Ambiente de Teste

Para possibilitar a análise da aceleração (ou desaceleração) em tempo real (ou estudo posterior) e consequentemente o estado atual do sistema de freios de trens o modelo proposto faz uso da telemetria sugerida por (Araújo, 2009). Para uma melhor compreensão e desenvolvimento o sistema foi dividido em três etapas as quais serão melhor detalhadas posteriormente e podem ser observadas na Figura 4-1.

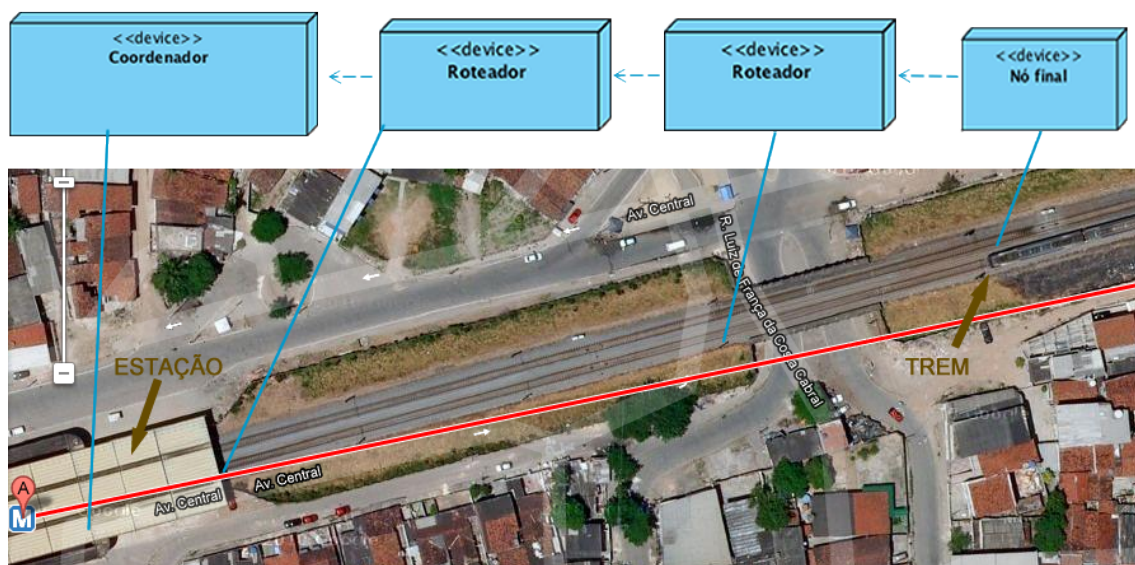


Figura 4-1. Visão Geral do Sistema.

O dispositivo final, que representa o trem através de seu endereçamento único, possui uma Unidade de Controle de Propulsão (PCU) (Figura 4-2) localizada no armário elétrico do trem, um *ZigBee* configurado como nó final (Figura 4-3), uma antena para ampliar sua capacidade de transmissão, uma fonte de alimentação (que converte a tensão de 220 V para 9 V) e um divisor de tensão (responsável por reduzir a variação da tensão que entra nos pinos do dispositivo *ZigBee* para 0-1,2V) (Figura 4-3). Na Figura 4-4 é possível ter uma visão geral da montagem do equipamento.



Figura 4-2. Unidade de Controle de Propulsão (PCU).

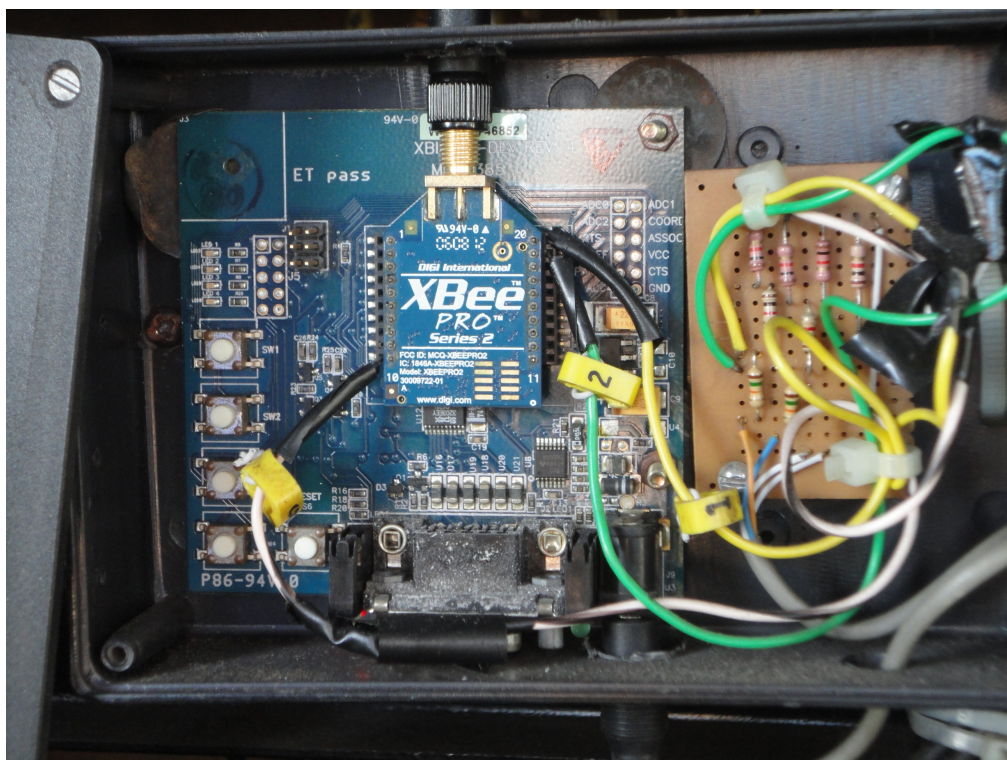


Figura 4-3. Dispositivo Final e Divisor de Tensão.



Figura 4-4. Perspectiva do Armário Elétrico do TUE 11.

Neste caso em específico, será necessário a utilização de dois canais analógicos do módulo *ZigBee* (ligados aos pinos 19 e 20); um para medir diretamente a pressão nos cilindros de freio através da tensão obtida no pino seis do cartão STA (Anexo III) na saída do AETB (Figura 4-5), e outro conectado ao pino dois do cartão decodificador de velocidade DVL (Anexos IV e V) para obtenção da velocidade (Figura 4-6), à qual relacionada com o tempo de amostragem fornece a taxa de aceleração (ou desaceleração), permitindo assim a possibilidade de uma análise da performance dos freios do trem, bem como uma forma de validação do sistema.



Figura 4-5. Local de Captura da Tensão Relativa à Pressão dos Cilindros de Freio.

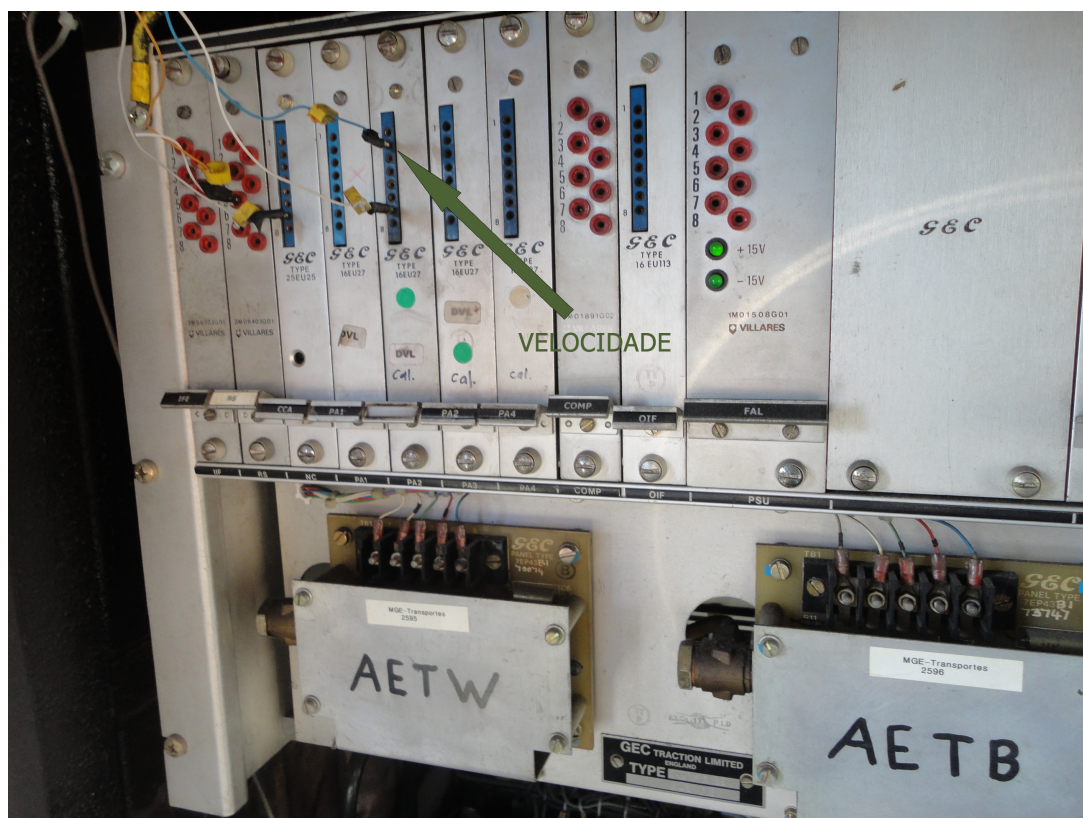


Figura 4-6. Local de Captura da Tensão da Velocidade.

O dispositivo roteador possui todos os equipamentos citados para o nó final, com exceção do divisor de tensão, pois a única alimentação exigida para o mesmo é convertida de 220 V para 9 V por uma fonte de tensão ligada diretamente ao sistema elétrico da estação. A função deste módulo é captar as informações advindas do dispositivo final e enviá-las para o dispositivo coordenador (ou para outro roteador mais próximo do coordenador caso o segundo esteja fora de alcance, o que não é o caso do experimento aqui descrito). Para esta implementação não houve a necessidade de mais de um roteador, pois o ambiente utilizado para testes é o trecho entre a estação Santa Luzia e a estação Werneck. Este percurso foi escolhido devido a sua singularidade em relação a não existência de obstáculos e a ausência de sinuosidades (Figura 4-7 e Figura 4-8). O roteador foi posicionado então na cabeceira Leste da estação Werneck (Apêndice I), possibilitando então menores interferências nos dados capturados (Figura 4-9).



Figura 4-7. Perspectiva da Estação Santa Luzia a partir da estação Werneck.



Figura 4-8. Vista Aérea entre estações Santa Luzia e Werneck (Araújo, 2009).



Figura 4-9. Local de Instalação do Dispositivo Roteador.

A uma distância inferior a 100 m, ainda na mesma estação Werneck, fora instalado o dispositivo coordenador. O mesmo foi disposto na sala da coordenação da estação devido a já existência de um micro computador (Figura 4-10) ligado à rede *Ethernet* da CBTU/METROREC. A comunicação com o computador foi facilitada através do uso da placa *CON-USBEE*, desenvolvida pela *ROGERCOM* (Messias, 2013) (Figura 4-11); a mesma possui um chip conversor USB/Serial que quando plugado (juntamente com o módulo *ZigBee* coordenador) na porta USB do micro permite que o sistema operacional Windows crie uma porta *COMx* virtual, possibilitando assim uma comunicação serial *RS232*. Além disto, a placa *CON-USBEE* também foi utilizada para configuração dos dispositivos *ZigBee* usados, através da interação com o software *X-CTU* que será explicado posteriormente.



Figura 4-10. Micro Computador com Dispositivo Coordenador.

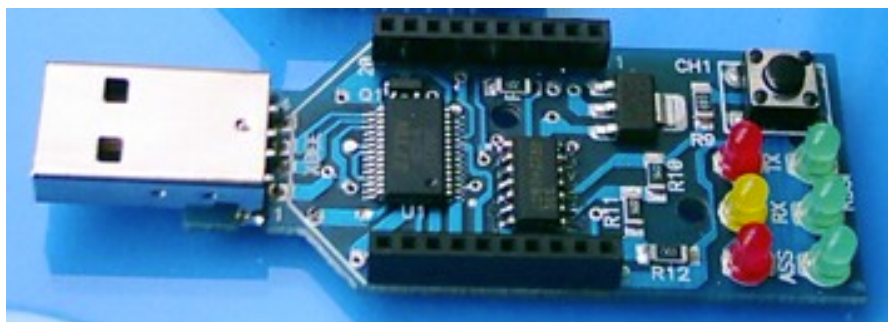


Figura 4-11. Placa CON-USBEE (Messias, 2013).

Instalado no micro computador está o servidor desenvolvido para capturar, interpretar e armazenar os dados recebidos pelos dispositivos roteadores, ou diretamente dos dispositivos finais. O armazenamento é feito em um banco de dados que pode não necessariamente estar instalado na máquina interligada ao módulo coordenador, e consequentemente possibilitar que o mesmo seja acessado para análise por qualquer equipamento da rede local que tenha permissão para efetuar este procedimento. Devido a isto, para fins de validação da proposta do sistema em questão, foi testado no CCO o monitoramento do TUE 11 através da captura dos dados enviados pelo módulo coordenador à rede *Ethernet* da CBTU/METROREC (Figura 4-12).



Figura 4-12. Monitoramento no CCO - CBTU/METROREC.

4.2 Ferramentas utilizadas

4.2.1 Hardware

O modelo do dispositivo utilizado para implementação do sistema é o *XBEEPRO2* (Figura 4-13), desenvolvido pela *Digi International Inc.* (outrora denominada *MaxStream*). No entanto, para realizar o monitoramento de sensores e criação de redes sem fio, baseados na pilha de protocolos *ZigBee*, encontramos diversas outras empresas que são integrantes da *ZigBee Alliance*: *Atmel*, *Radiocrafts*, *Texas Instrument*, *Freescale*, *Philips*, *Silicon Labs*, *Microchip*, *Panasonic*, *Samsung*, dentre outras (ZigBee Alliance, 2013).



Figura 4-13. Módulo XBEEPRO2 da *Digi International Inc.*

Para montagem, os módulos são desenvolvidos de forma a necessitar apenas de um *socket* específico, o qual não precisa realizar nenhum tipo de solda, pois os *XBEEPRO Development Kits* normalmente possuem placas contendo a comunicação serial *RS-232* (Figura 4-14 e Figura 4-15) com vinte pinos para encaixe. A seguir, o Quadro 4-1 mostra a pinagem do dispositivo em questão.

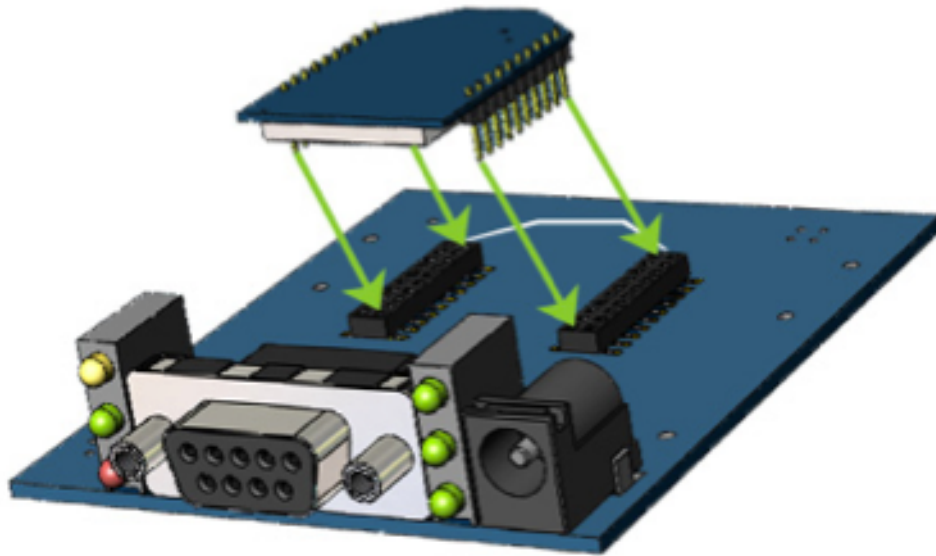


Figura 4-14. Ilustração da Placa para Desenvolvimento (Digi, 2010).

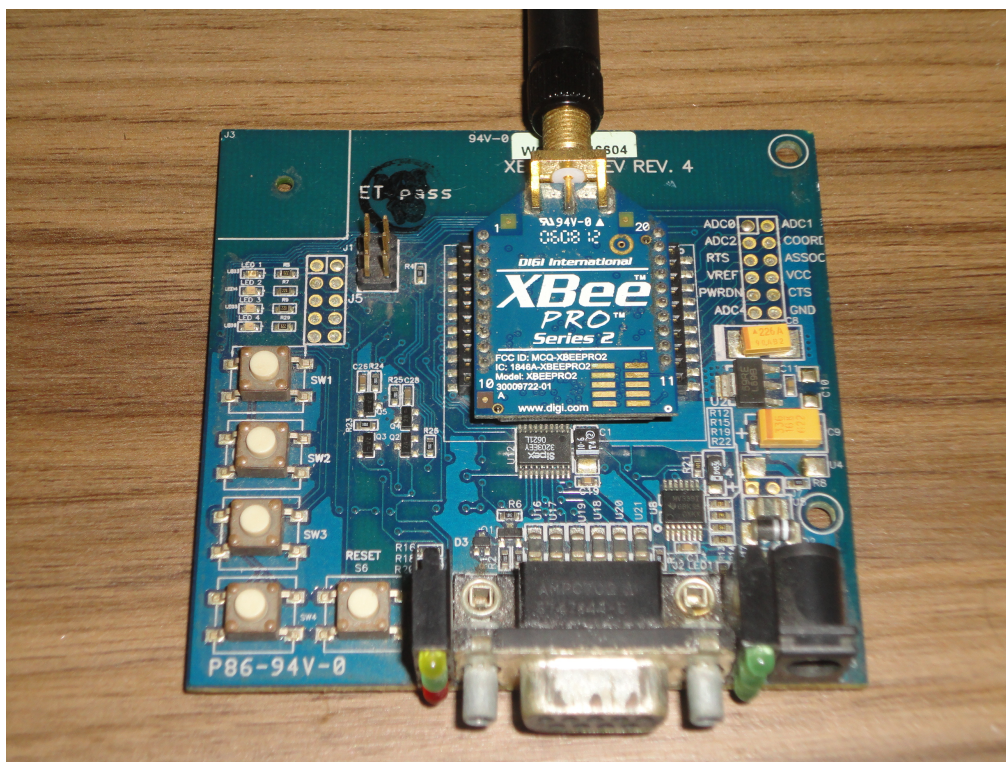


Figura 4-15. Placa para Desenvolvimento em Conjunto com XBEEPRO2.

Quadro 4-1. Pinagem do XBEEPRO2 (Digi, 2010).

Pin #	Name	Direction	Default State	Description
1	VCC	-	-	Power supply
2	DOUT	Output	Output	UART Data Out
3	DIN / CONFIG	Input	Input	UART Data In
4	DIO12	Both	Disabled	Digital I/O 12
5	RESET	Both	Open-Collector with pull-up	Module Reset (reset pulse must be at least 200 ns)
6	RSSI PWM / DIO10	Both	Output	RX Signal Strength Indicator / Digital IO
7	DIO11	Both	Input	Digital I/O 11
8	[reserved]	-	Disabled	Do not connect
9	DTR / SLEEP_RQ/ DIO8	Both	Input	Pin Sleep Control Line or Digital IO 8
10	GND	-	-	Ground
11	DIO4	Both	Disabled	Digital I/O 4
12	CTS / DIO7	Both	Output	Clear-to-Send Flow Control or Digital I/O 7. CTS, if enabled, is an output.
13	ON / SLEEP	Output	Output	Module Status Indicator or Digital I/O 9
14	VREF	Input	-	Not used for EM250. Used for programmable secondary processor. For compatibility with other XBEE modules, we recommend connecting this pin voltage reference if Analog sampling is desired. Otherwise, connect to GND.
15	Associate / DIO5	Both	Output	Associated Indicator, Digital I/O 5
16	RTS / DIO6	Both	Input	Request-to-Send Flow Control, Digital I/O 6. RTS, if enabled, is an input.
17	AD3 / DIO3	Both	Disabled	Analog Input 3 or Digital I/O 3
18	AD2 / DIO2	Both	Disabled	Analog Input 2 or Digital I/O 2
19	AD1 / DIO1	Both	Disabled	Analog Input 1 or Digital I/O 1
20	AD0 / DIO0 / Commissioning Button	Both	Disabled	Analog Input 0, Digital IO 0, or Commissioning Button

Alguns fatores (Quadro 4-2) foram determinantes para a escolha desta tecnologia, como por exemplo, sua performance/alcance em ambientes externos (o ambiente de teste permite uma redução na necessidade de roteadores pois trata-se de um metrô de superfície), taxa de transferência suficiente para as informações relevantes, baixo consumo, possibilidade de configuração de rede em malha (afinal os dispositivos finais são móveis, consequentemente existe a necessidade da existência de vários caminhos para informação chegar ao coordenador) (Figura 4-16), e funcionamento na frequência de 2,4 GHz (permitida no Brasil).

Quadro 4-2. Especificação XBEEPRO2 (Digi, 2010).

Specification	XBee	XBee-PRO (S2)
Performance		
Indoor/Urban Range	up to 133 ft. (40 m)	Up to 300 ft. (90 m), up to 200 ft (60 m) international variant
Outdoor RF line-of-sight Range	up to 400 ft. (120 m)	Up to 2 miles (3200 m), up to 5000 ft (1500 m) international variant
Transmit Power Output	2mW (+3dBm), boost mode enabled 1.25mW (+1dBm), boost mode disabled	50mW (+17 dBm) 10mW (+10 dBm) for International variant
RF Data Rate	250,000 bps	250,000 bps
Data Throughput	up to 35000 bps (see chapter 4)	up to 35000 bps (see chapter 4)
Serial Interface Data Rate (software selectable)	1200 bps - 1 Mbps (non-standard baud rates also supported)	1200 bps - 1 Mbps (non-standard baud rates also supported)
Receiver Sensitivity	-96 dBm, boost mode enabled -95 dBm, boost mode disabled	-102 dBm
Power Requirements		
Supply Voltage	2.1 - 3.6 V	3.0 - 3.4 V
Operating Current (Transmit, max output power)	40mA (@ 3.3 V, boost mode enabled) 35mA (@ 3.3 V, boost mode disabled)	295mA (@3.3 V) 170mA (@3.3 V) international variant
Operating Current (Receive)	40mA (@ 3.3 V, boost mode enabled) 38mA (@ 3.3 V, boost mode disabled)	45 mA (@3.3 V)
Idle Current (Receiver off)	15mA	15mA
Power-down Current	< 1 uA @ 25°C	3.5 uA typical @ 25°C
General		
Operating Frequency Band	ISM 2.4 GHz	ISM 2.4 GHz
Dimensions	0.960" x 1.087" (2.438cm x 2.761cm)	0.960 x 1.297 (2.438cm x 3.294cm)
Operating Temperature	-40 to 85° C (industrial)	-40 to 85° C (industrial)
Antenna Options	Integrated Whip, Chip, RPSMA, or U.FL Connector	Integrated Whip, Chip, RPSMA, or U.FL Connector
Networking & Security		
Supported Network Topologies	Point-to-point, Point-to-multipoint, Peer-to-peer, and Mesh	Point-to-point, Point-to-multipoint, Peer-to-peer, and Mesh
Number of Channels	16 Direct Sequence Channels	14 Direct Sequence Channels
Channels	11 to 26	11 to 24
Addressing Options	PAN ID and Addresses, Cluster IDs and Endpoints (optional)	PAN ID and Addresses, Cluster IDs and Endpoints (optional)

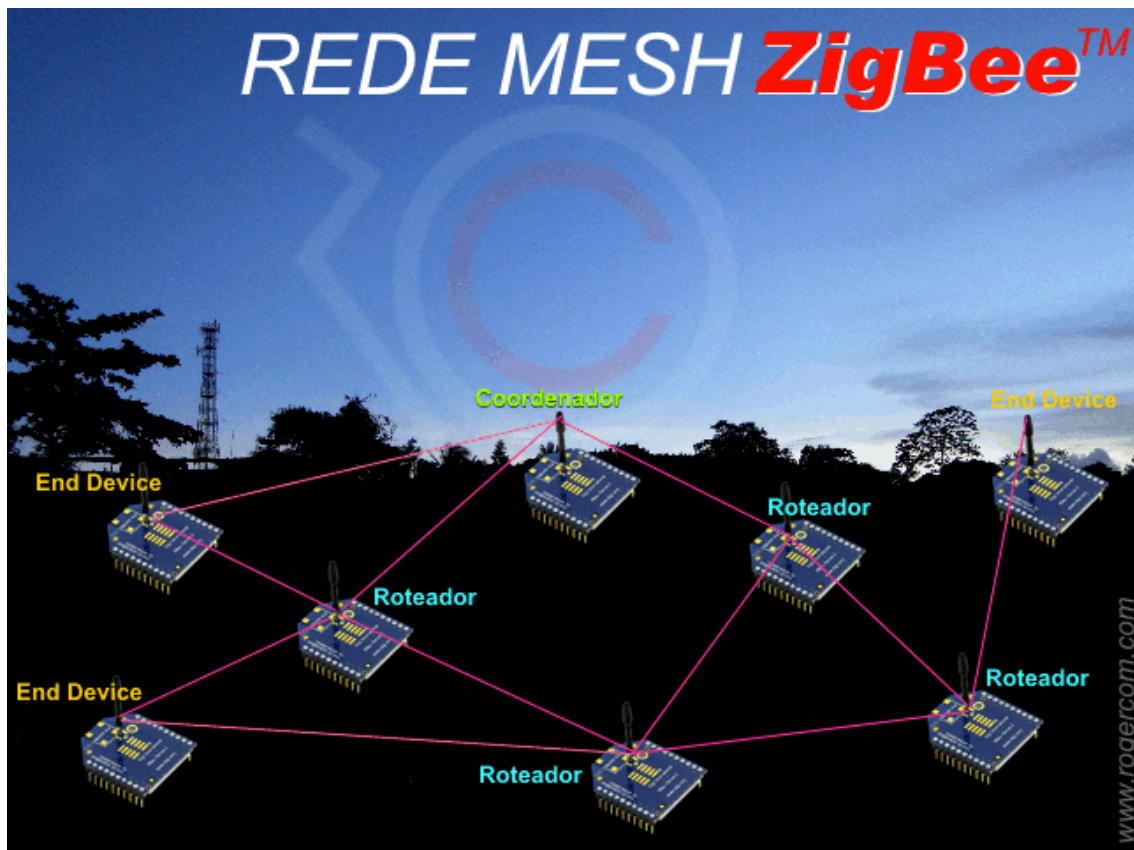


Figura 4-16. Rede ZigBee em Malha (Messias, 2013).

É importante frisar também o modo de operação utilizado para operação dos XBEEPRO2, o modo API, que é baseado em frame e assim estende o nível para o qual uma aplicação de *Host* pode interagir com as capacidades de rede do módulo. Através desse modo é possível enviar endereço fonte, endereço destino, nome de um determinado nó, estado, dentre outros mais. Basicamente o *frame* (Figura 4-17) inicia com 1 Byte (7E), o que permite perceber o início do envio, posteriormente 2 Bytes que indicam o comprimento da cadeia de Bytes que vêm a seguir, e um *checksum* que permite verificar se a informação recebida está correta (Caprile, 2009).



Figura 4-17. Estrutura do Pacote ZigBee no Modo API (Digi, 2010).

4.2.2 Software

4.2.2.1 X-CTU

O X-CTU é um software desenvolvido pela *Digi International Inc.* (Digi, 2008) com o intuito de promover uma melhor interação do usuário de seus produtos de radio frequência com seus respectivos *firmwares* através de uma interface gráfica (Figura. 4-18).

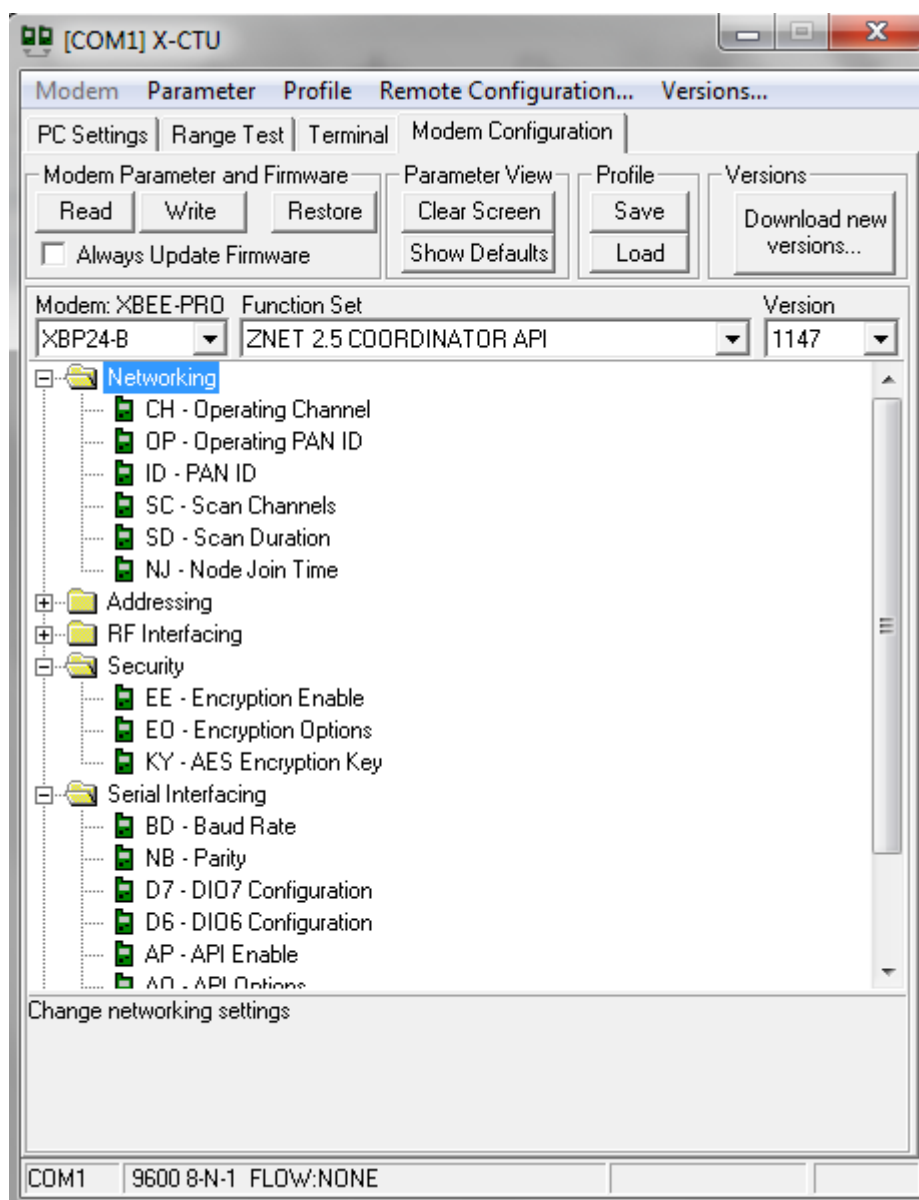


Figura. 4-18 X-CTU da *Digi Internacional Inc.*

Dependendo da função que o dispositivo *Xbee-Pro* irá realizar (coordenador, roteador ou nó final) é possível através do X-CTU realizar a configuração específica para cada um dos parâmetros visualizados na Figura. 4-18, os quais determinam o seu comportamento.

No caso do dispositivo coordenador, foram realizadas configurações específicas como: identificador da rede (ID – PAN ID), permissão de conexão de roteadores e nós finais a qualquer instante (NJ – *Node Join Time*), escaneamento dos dezesseis canais possíveis e tempo limite para realizar essa atividade (SC e SD, respectivamente), taxa de transmissão (BD – *Baud Rate*), segurança da rede (EE – *Encryption Enable*, e KY – *AES Encryption Key*), dentre outros (Figura. 4-18).

Com relação ao dispositivo roteador, sua configuração se assemelha bastante a do coordenador, no entanto faz-se necessário modificar o parâmetro relacionado à verificação de existência de coordenadores no mesmo canal (JV – *Channel Verification*) (Figura 4-19).

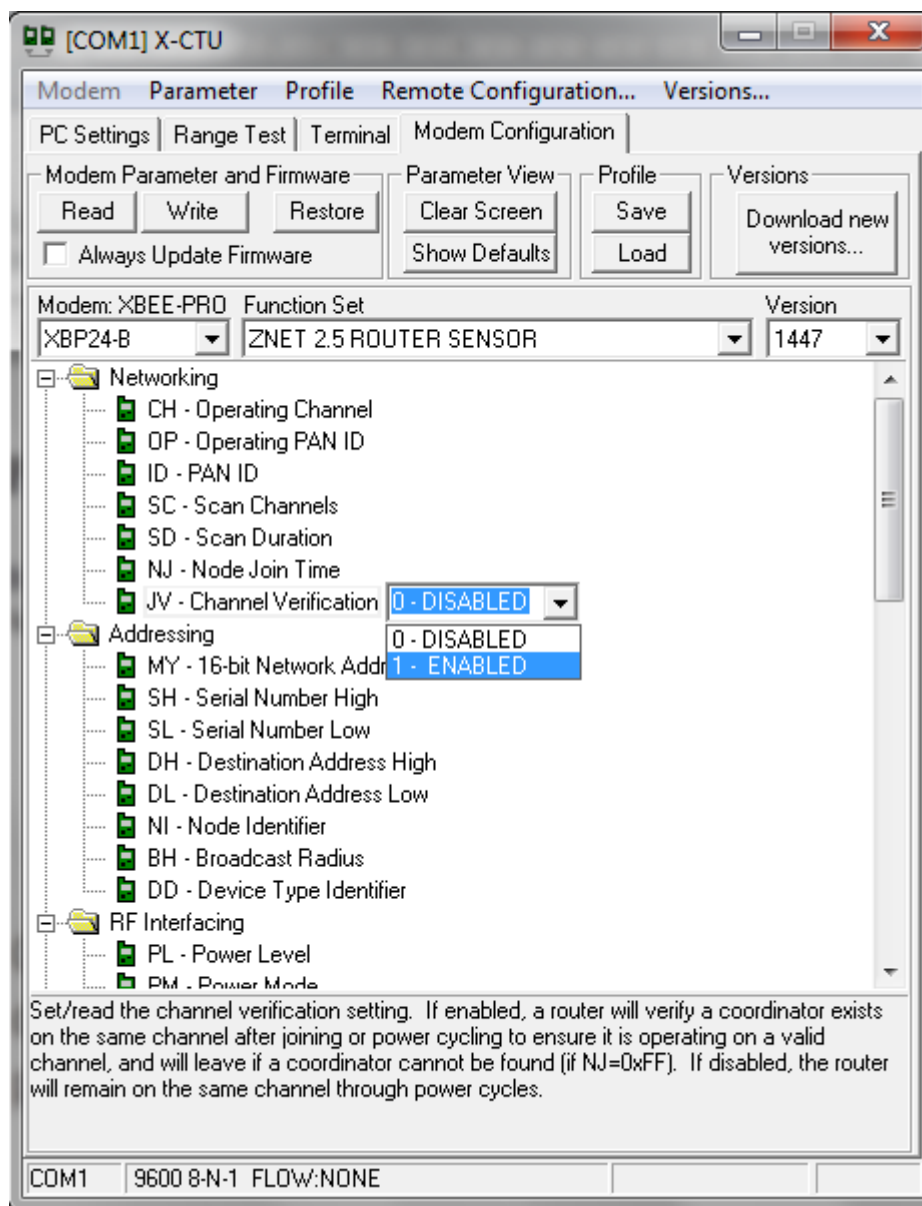


Figura 4-19. Habilitação para Verificação de Canais no X-CTU.

O nó final, para o sistema proposto, possui características bastante específicas, tais como: atribuição do valor zero como endereço final (Figura 4-20), ou seja, determinar que a mensagem deva ter como destino o dispositivo coordenador (DH – *Destination Address High*, e DL – *Destination Address Low*); habilitar os pinos 20 e 19 para captura da velocidade e pressão nos cilindros de freio através da conversão A/D (D0 – *AD0/DIO0 Configuration* e D1 – *AD1/DIO1 Configuration*), e a taxa de transmissão dos dados capturados configurada para envio a cada 125 ms (7D - Hexadecimal) /8HZ (IR – *IO Sampling Rate*) (Figura 4-21).

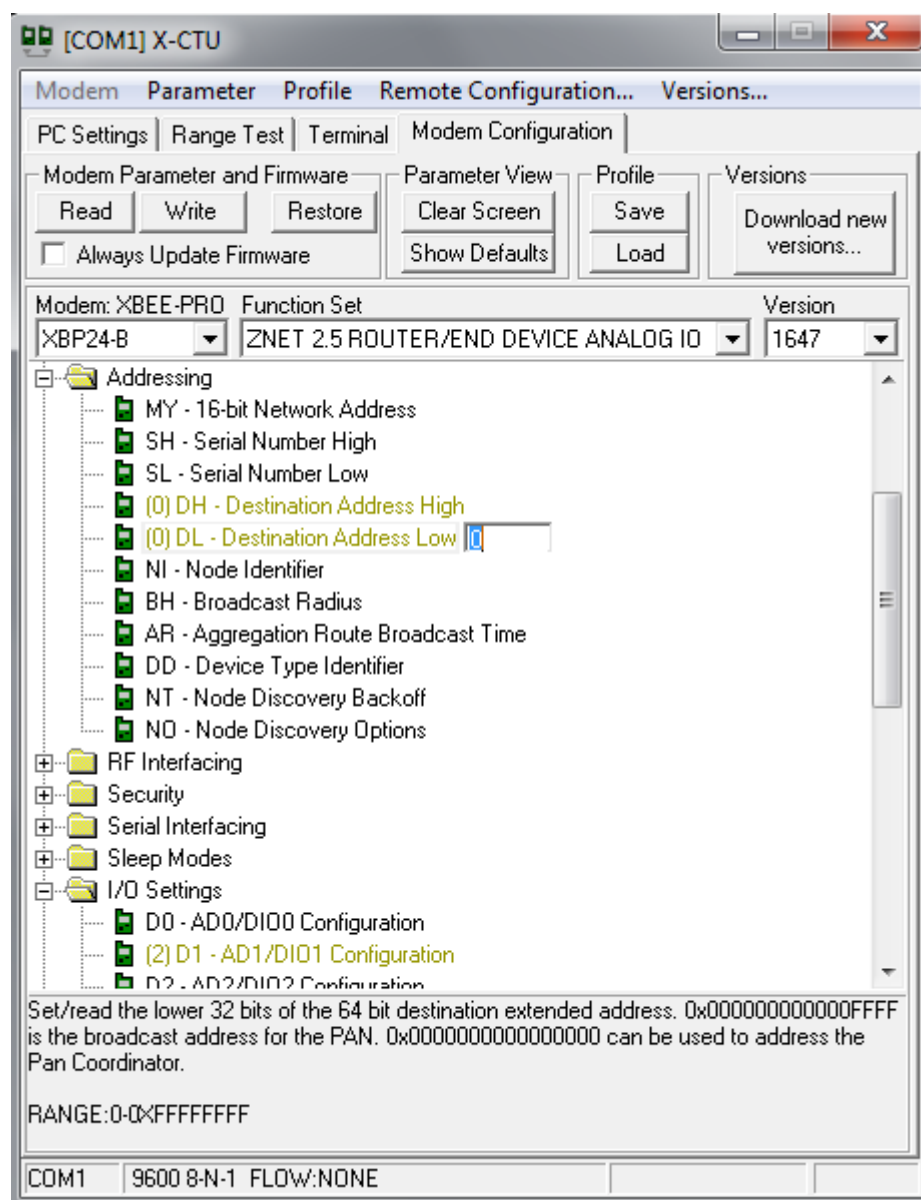


Figura 4-20. Parâmetros DH, DL e D1.

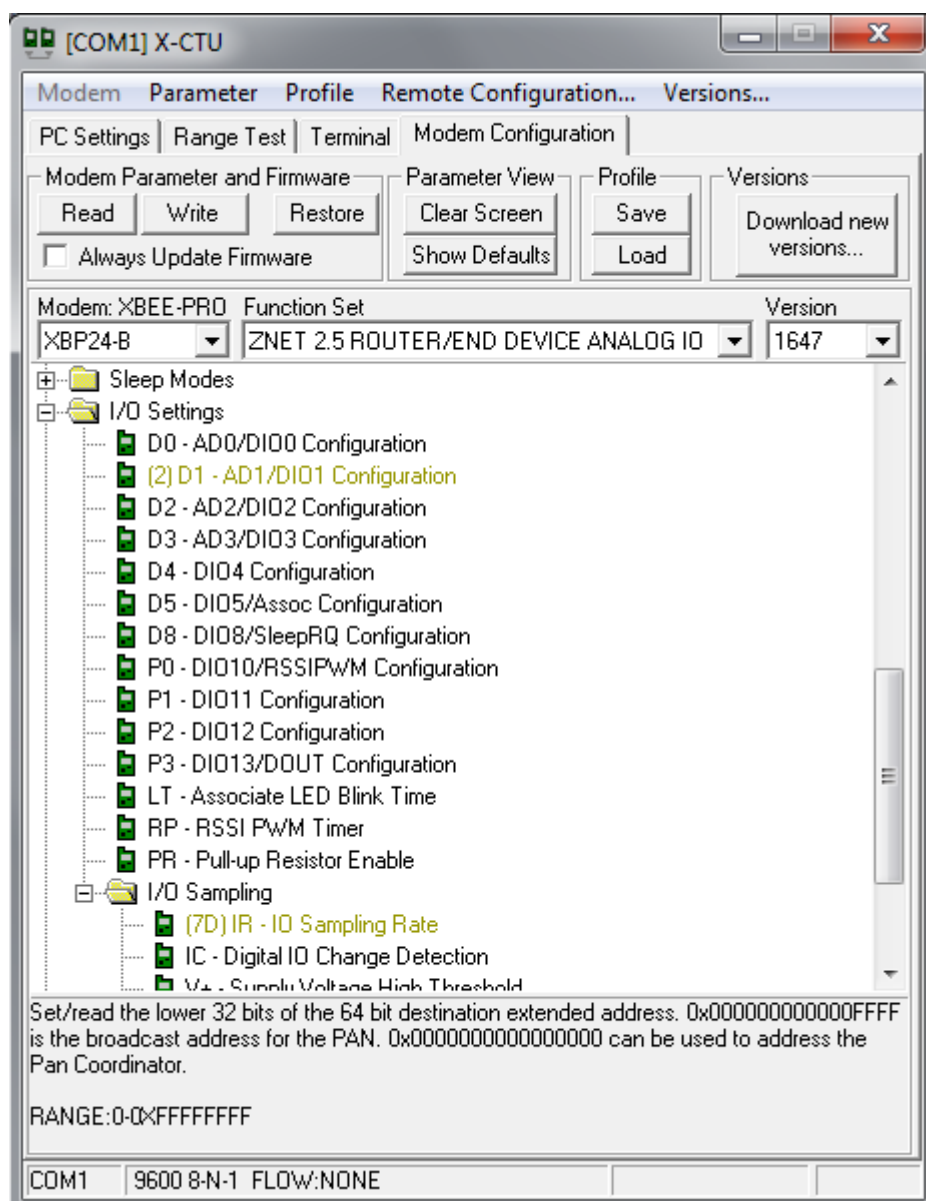


Figura 4-21. Parâmetros D1 e IR.

4.2.2.2 Servidor e BD

Para interpretação dos pacotes enviados pelo dispositivo coordenador (advindos do roteador que por sua vez recebeu do nó final) e disposição destes na rede local *Ethernet* da CBTU/METROREC fora implementado um servidor fazendo uso da linguagem de programação *JAVA*. O mesmo realiza a comunicação com o coordenador através do uso da placa *CON-USB*, já citada anteriormente, por meio de uma comunicação serial padrão *RS232*, possibilitando então a conexão e recepção dos “Pacotes *Zigbee*”.

O servidor em questão realiza então a captura dos dados de byte em byte, o que permite a separação e compreensão dos campos relevantes para o sistema proposto. A partir desta segregação, as identificações mais relevantes são: o endereço de 64 bits que identifica o nó final e consequentemente o trem monitorado, e os valores dos quatro canais referentes às

entradas analógicas que foram convertidas para digital no formato hexadecimal. Em posse dos valores hexadecimais é possível então realizar a conversão para o formato decimal e em seguida realizar a multiplicação pela ponderação de valor "0,001171875"⁷, obtendo assim a tensão de entrada do respectivo pino. O Quadro 4-3 abaixo ilustra a delimitação dos campos do pacote *ZigBee* e o significado dos mesmos.

Quadro 4-3. Detalhamento dos campos de um Pacote *ZigBee* no Modo API (Digi, 2010).

7E	Delimitador de início de pacote
0018	Quantidade de <i>bytes</i> de um pacote, excluindo o <i>byte</i> de <i>checksum</i> , o delimitador de início de pacote e os <i>bytes</i> deste campo.
92	Identificador de operação da API (<i>ZigBee IO Data Sample Rx Indicator</i>). Ao receber um pacote com este identificador, o coordenador envia os dados recebidos para a porta serial do dispositivo.
0013A200 4054DF79	Endereço de 64 bits do dispositivo. Cada dispositivo possui um endereço de 64 bits que já vem configurado de fábrica, não podendo ser modificado
125A	Endereço de 16 bits. Este endereço é atribuído dinamicamente e aleatoriamente no momento da inicialização dos dispositivos. É usado para comunicação entre os nós.
01	Opção de recebimento de Pacote. Este <i>byte</i> indica se o pacote recebido é um pacote reconhecido(01) ou se é um pacote em broadcast.(02)
01	Este campo indica o número de amostras contidas no pacote.
0000	Este campo indica quais canais digitais estão habilitadas no dispositivo remoto. O valor 0000 indica que não há entradas analógicas habilitadas.
0F	Indica quais canais analógicos do dispositivo remoto estão habilitados. O valor 0F indica que os quatro canais analógicos estão habilitados
023A	Valor recebido na entrada analógica do canal 0. Este valor representa o valor analógico 0,6679, referente a tensão do sensor, convertido para digital no formato hexadecimal.
0115	Valor recebido na entrada analógica do canal 1. Este valor representa o valor analógico 0,3246, referente a tensão do sensor, convertido para digital no formato hexadecimal.
0205	Valor recebido na entrada analógica do canal 2. Este valor representa o valor analógico 0,6058 convertido para digital no formato hexadecimal.
0128	Valor recebido na entrada analógica do canal 3. Este valor representa o valor analógico 0,3757 convertido para digital no formato hexadecimal.
5A	<i>Checksum</i> dos dados do pacote

⁷ Referente a divisão de (1,2 / 1024). 1,2 = Tensão máxima de entrada nos pinos de IO, e 1024 = 2¹⁰ pois dos 16 bits disponíveis por entrada apenas 10 bits são utilizados (Digi, 2010).

O campo referente à velocidade é obtido após realizar a multiplicação da tensão pelo valor 100, pois a velocidade máxima do TUE é 120 Km/h – no entanto alcança apenas 90 Km/h devido a restrições de segurança (CIA. Industrial Santa Matilde, 1984) - à qual é representada no DVL da PCU por 10 V, que é reduzido para 1.2 V pelo divisor de tensão instalado no armário elétrico. No caso do freio requerido o valor máximo de tensão gerado é 5,3 V (Eletrocontroles Villares Ltda, 1985), representado dessa forma, após a conversão pelo divisor de tensão, pelo número 0,636. Ou seja, para transformar os valores obtidos para o capturado da PCU basta realizar a divisão por 0,12, pois cada 1 V de tensão real é representado após o divisor de tensão por 0,12 V.

Para estudo posterior dos valores obtidos é realizado o armazenamento das informações em um banco de dados *MySQL 5.1.61*, e como ferramenta de visualização o software *Sequel Pro 0.9.8.1*. O armazenamento dos dados no banco de dados permite que uma consulta pela situação de determinado trem pode ser realizada a qualquer momento, de qualquer lugar da empresa, pelos setores permitidos e responsáveis pelos trens.

5 Resultados Práticos

Com o intuito de validar o sistema de captação de informações referentes ao estado atual do sistema de frenagem de trens foram realizadas diversas coletas de dados durante o percurso do TUE 11, tanto no sentido cidade (estação Barro - estação Werneck), quanto no sentido subúrbio (estação Santa Luzia - estação Werneck). As informações foram coletadas durante o período das 6 – 12h do dia 09/04/2013 (Anexo I), o qual é suficiente para perceber o comportamento do trem em diversas situações.

A análise é feita durante a aplicação de Freio de Serviço Máximo, que deve gerar uma tensão de $3,3 \text{ Vdc} \pm 0,2 \text{ Vdc}$ (CBTU/METROREC, 2006) e consequentemente provocar uma desaceleração média de $0,77 \pm 0,05 \text{ m/s}^2$ (Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT), 1985), e como limite superior, para casos mais extremos, uma tensão de $4,7 \text{ Vdc} \pm 0,2 \text{ Vdc}$ equivalente a uma redução da ordem de $1,1 \pm 0,1 \text{ m/s}^2$ ao realizar a aplicação de Freio de Emergência. Já no acionamento parcial do equipamento a redução deverá atingir níveis satisfatórios caso esteja dentro do intervalo de $0,45 \text{ m/s}^2$ a $0,5 \text{ m/s}^2$. Para ambos os casos podem ocorrer algumas variações devido à influência das perdas inerentes ao movimento (IPT, 1986).

Análise da correlação entre velocidade, voltagem de freio requerido e desaceleração do TUE 11, em quatro de Abril de 2013, às 06h10min.

Apesar de o horário de coleta dos dados demonstrados na Figura 5-1 ser considerado de pico (Araújo, 2009), o grande fluxo de usuários ocorre no sentido contrário ao percurso em questão. Devido a isso, com uma quantidade de usuários menor, e consequentemente uma menor pressão nas bolsas de ar (que se encontram situadas abaixo dos carros do trem), torna-se possível a utilização de uma taxa de desaceleração dentro dos padrões considerados necessários durante o uso parcial do equipamento de frenagem. É possível observar este fato no período que compreende as amostras 65 a 145 onde se observa uma taxa média de desaceleração dentro do intervalo de $0,45 \text{ m/s}^2$ a $0,5 \text{ m/s}^2$, condizente com a voltagem de freio requerido necessária para esta taxa, situada abaixo dos 3 V. À medida que a velocidade do trem aproxima-se de zero (para realizar sua parada na estação Werneck), entre as amostras 145 a 209, nota-se um pico de tensão característico do uso de freio de serviço máximo, percebido devido ao valor de 3,3 V, o qual proporciona uma redução média de $0,77 \text{ m/s}^2$, que segundo (IPT, 1985) está dentro dos padrões ideais.

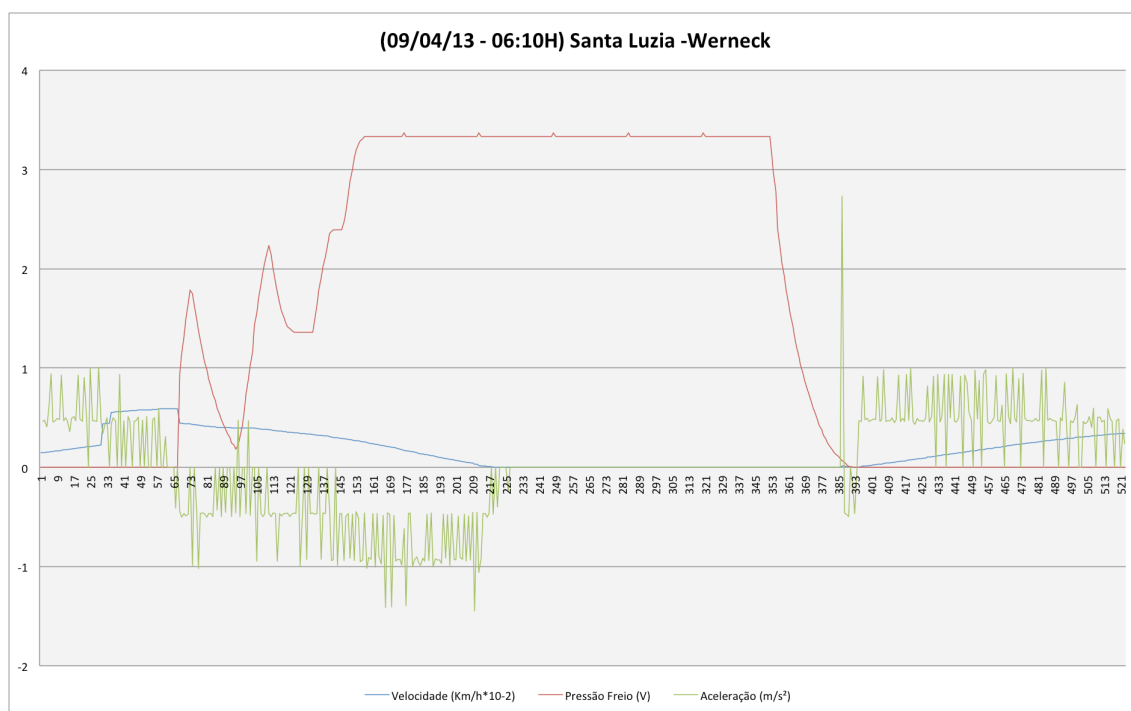


Figura 5-1. Gráfico da Correlação Entre Velocidade, Tensão de Freio Requerido e Desaceleração do TUE 11 (06h10min).

Análise da correlação entre velocidade, voltagem de freio requerido e desaceleração do TUE 11, em quatro de Abril de 2013, às 06h54min

O trecho analisado na Figura 5-2 tem como característica o horário de pico (alto fluxo de usuários) que proporciona uma demanda maior tanto do freio pneumático, quanto do reostático. É possível observar este fato através da análise da tensão de freio requerido durante as amostras 1 a 64, onde a mesma alcança o patamar de 4 V, para que seja possível obter a taxa de desaceleração média de $0,77 \text{ m/s}^2$, estando dessa forma dentro dos valor considerados ideais, ainda abaixo da tensão de aplicação de freio de emergência. Vale ressaltar que a informação da grande quantidade de usuários é levada em consideração para o aumento da voltagem de freio através do transdutor AETB, que recebe as informações das pressões das bolsas de ar situadas abaixo dos carros do trem e repassa a mesma para o módulo STA.

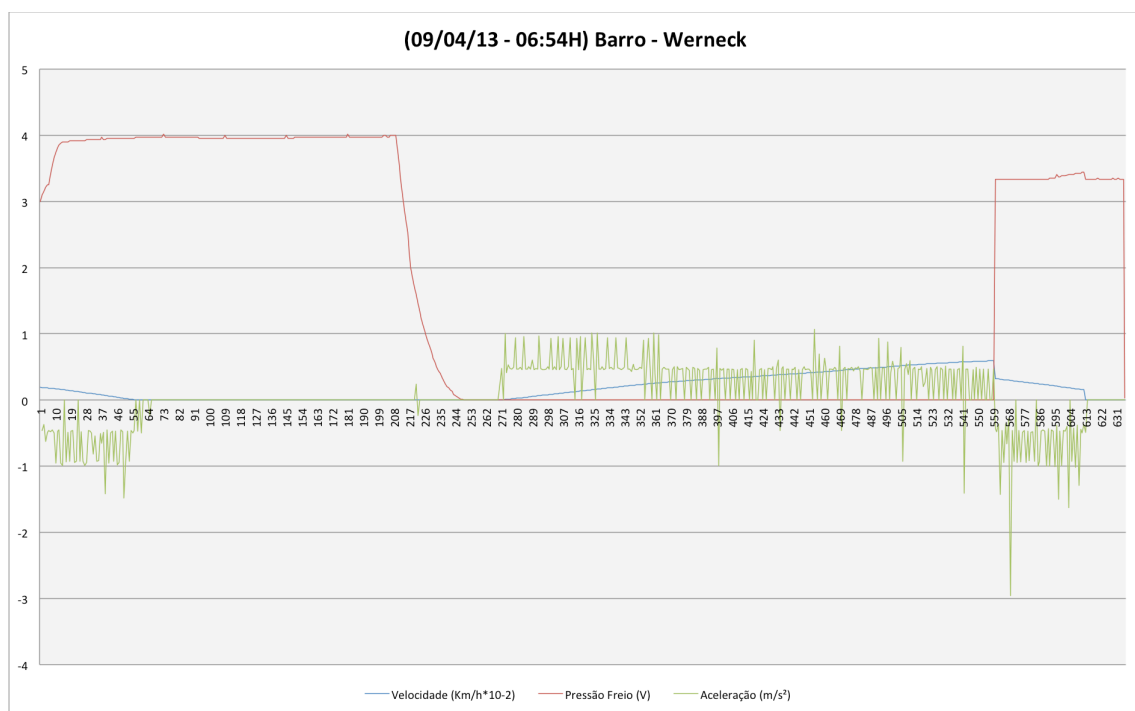


Figura 5-2. Gráfico da Correlação Entre Velocidade, Tensão de Freio Requerido e Desaceleração do TUE 11 (06h54min).

Análise da correlação entre velocidade, voltagem de freio requerido e desaceleração do TUE 11, em quatro de Abril de 2013, às 07h30min

No gráfico da Figura 5-3, nota-se a necessidade durante um maior período de tempo da utilização de freio de serviço máximo devido ao fato da coleta ainda ser realizada no horário de pico. Essa percepção é obtida ao observar as amostras contidas nos intervalos 29 a 70 e 85 a 106, obtendo a taxa de desaceleração média correspondente a $0,77 \text{ m/s}^2$, e nos demais intervalos uma frenagem condizente a utilização parcial do sistema de freios, entre os valores de $0,45 \text{ m/s}^2$ a $0,5 \text{ m/s}^2$, com valores de tensão de 3,3 V e abaixo de 3 V, respectivamente.

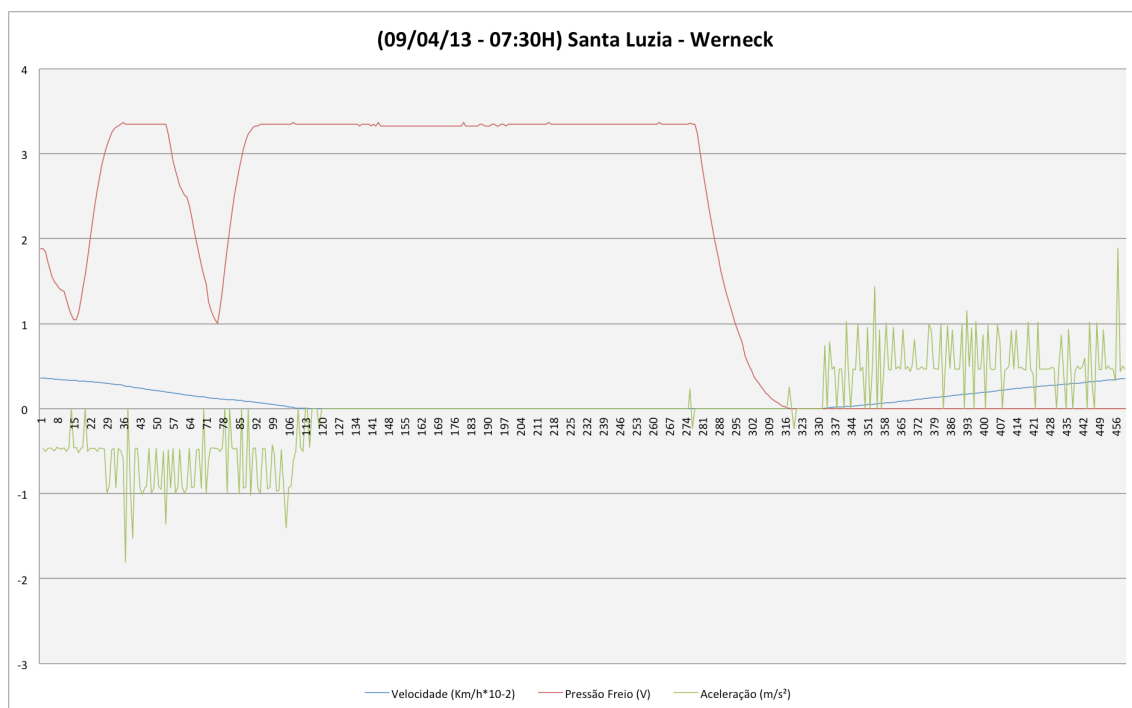


Figura 5-3. Gráfico da Correlação Entre Velocidade, Tensão de Freio Requerido e Desaceleração do TUE 11 (07h30min).

Análise da correlação entre velocidade, voltagem de freio requerido e desaceleração do TUE 11, em quatro de Abril de 2013, às 08h09min

Através dos dados coletados e observados na Figura 5-4 é possível notar a grande quantidade de usuários devido à necessidade de uma maior pressão nos cilindros de freios, fato este percebido pela voltagem representativa da mesma. Esta se encontra no patamar de 4 V, obtendo dessa forma uma taxa média de desaceleração ideal de $0,77 \text{ m/s}^2$ durante o intervalo das amostras 1 a 70, condizente com a aplicação de freio de serviço máximo e o horário de pico no trajeto sentido Recife.

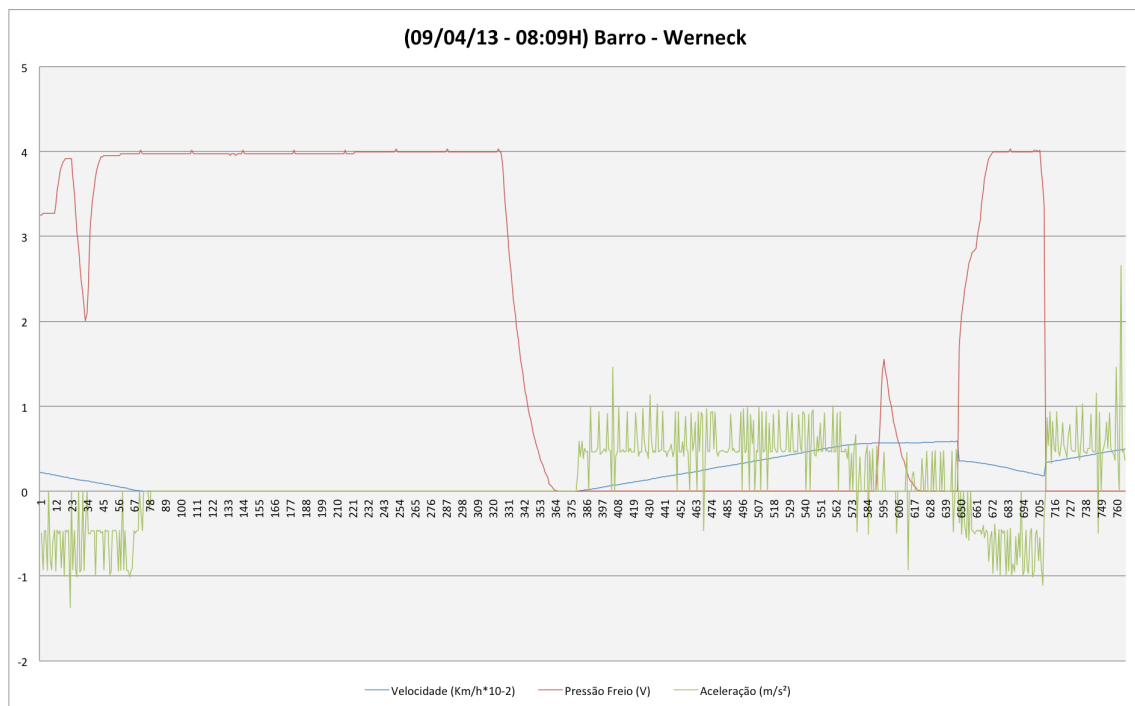


Figura 5-4. Gráfico da Correlação Entre Velocidade, Tensão de Freio Requerido e Desaceleração do TUE 11 (08h09min).

Análise da correlação entre velocidade, voltagem de freio requerido e desaceleração do TUE 11, em quatro de Abril de 2013, às 08h42min

No gráfico da Figura 5-5, observa-se durante um maior período de tempo a utilização parcial do sistema de freio devido a uma voltagem representativa da pressão dos cilindros de freio abaixo dos 3 V e uma taxa de desaceleração ideal e condizente com a mesma, dentro do intervalo de $0,45 \text{ m/s}^2$ a $0,5 \text{ m/s}^2$. Estes valores, que se encontram dentro do espaço de amostras de 15 a 85 denunciam uma redução na quantidade de passageiros devido ao término do horário considerado de pico.

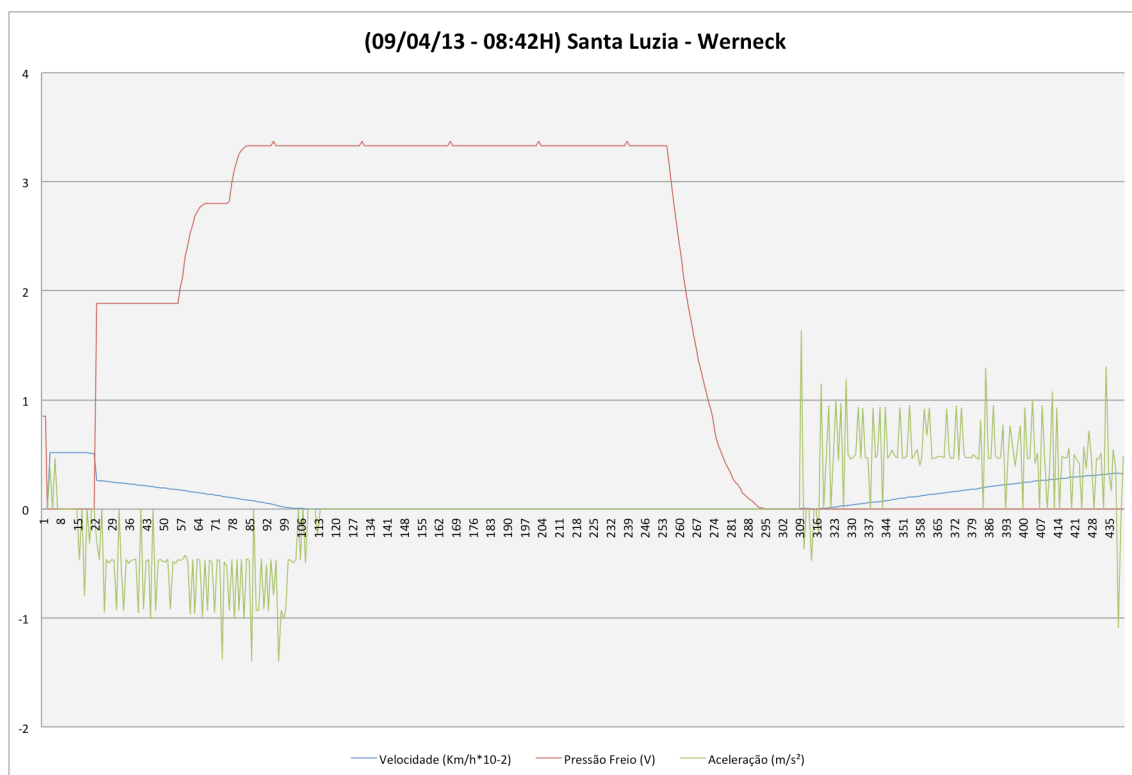


Figura 5-5. Gráfico da Correlação Entre Velocidade, Tensão de Freio Requerido e Desaceleração do TUE 11 (08h42min).

Análise da correlação entre velocidade, voltagem de freio requerido e desaceleração do TUE 11, em quatro de Abril de 2013, às 09h20min

Na Figura 5-6 é possível observar dentro do intervalo de amostras 1 a 66 uma necessidade de taxa de desaceleração média da ordem de $0,77 \text{ m/s}^2$ para possibilitar a redução da velocidade do trem a zero e consequentemente parar na Estação Werneck, no entanto, é importante frisar os valores da tensão de freio requerido que está no patamar ideal de 3,3 V, caracterizando então a diminuição do fluxo de usuários devido ao encerramento do horário de pico.

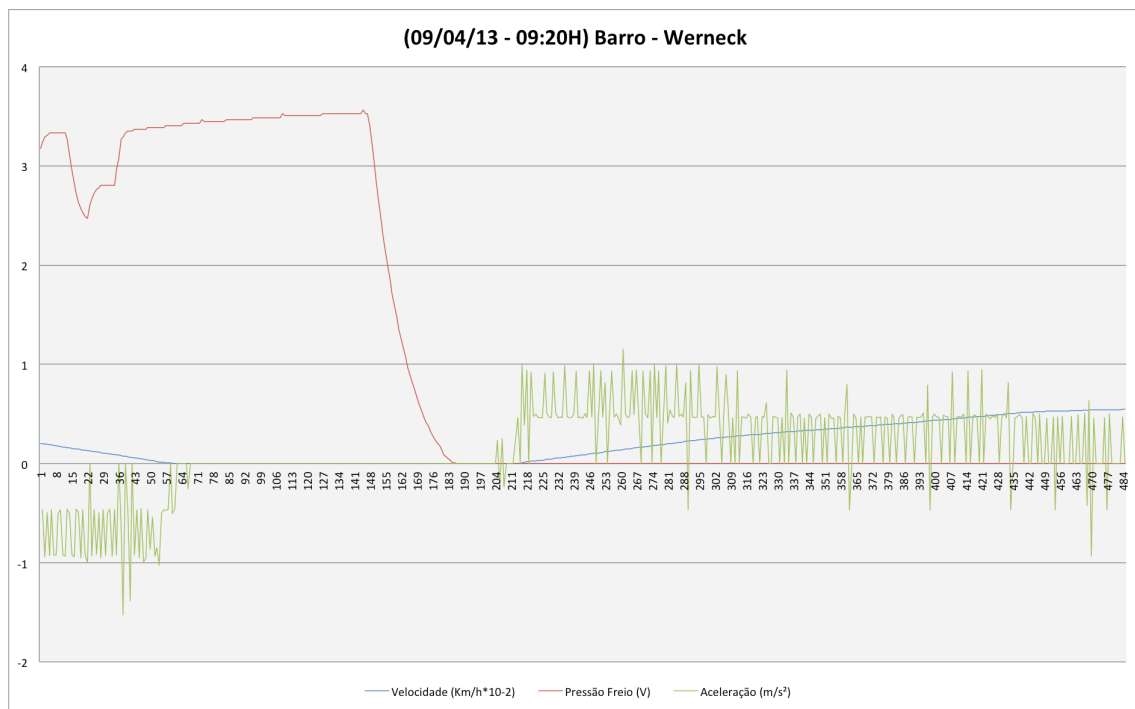


Figura 5-6. Gráfico da Correlação Entre Velocidade, Tensão de Freio Requerido e Desaceleração do TUE 11 (09h20min).

Análise da correlação entre velocidade, voltagem de freio requerido e desaceleração do TUE 11, em quatro de Abril de 2013, às 09h49min

Na Figura 5-6, observa-se dois momentos distintos; inicialmente durante o intervalo de amostras 1 a 17 o trem em questão apresenta uma taxa de desaceleração considerada ideal dentro do intervalo de $0,45 \text{ m/s}^2$ a $0,5 \text{ m/s}^2$, enquanto que antes do momento de parada total do trem nota-se a aplicação do freio de serviço máximo devido ao mesmo obter uma tensão de freio requerido da ordem de $3,3 \text{ V}$ adequada à taxa de desaceleração de $0,77 \text{ m/s}^2$ considerada ideal para este patamar de tensão.

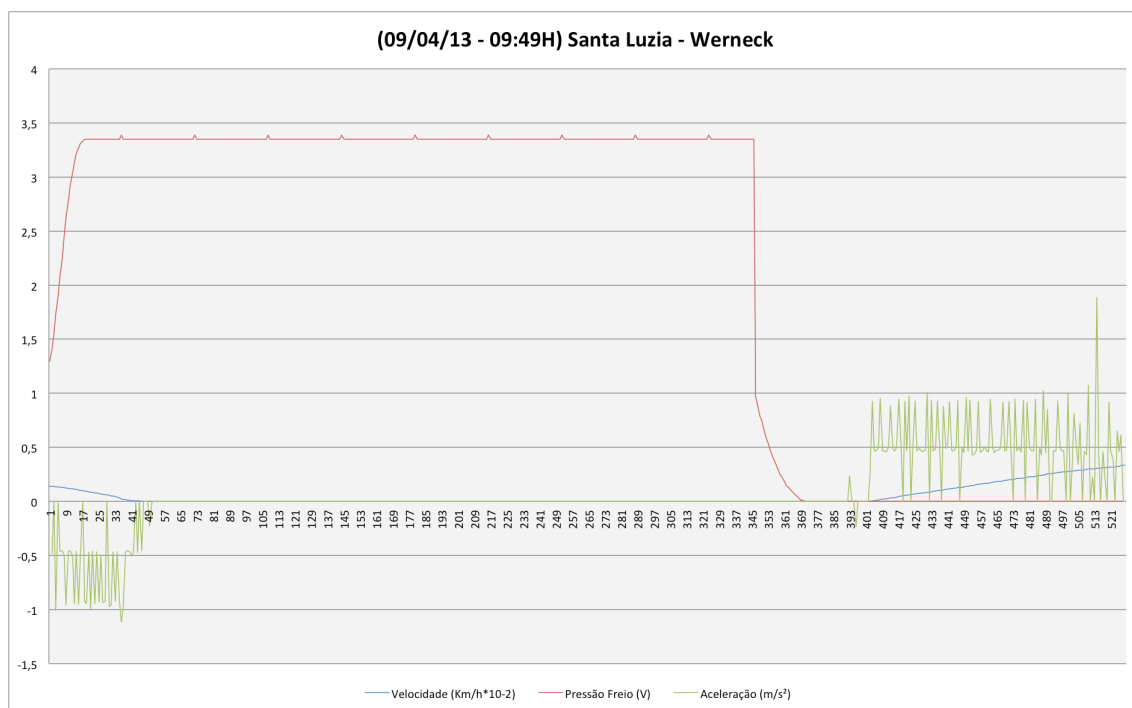


Figura 5-7. Gráfico da Correlação Entre Velocidade, Tensão de Freio Requerido e Desaceleração do TUE 11 (09h49min).

Análise da correlação entre velocidade, voltagem de freio requerido e desaceleração do TUE 11, em quatro de Abril de 2013, às 10h29min

Na Figura 5-8, observa-se uma diminuição maior ainda do fluxo de usuários, pois apesar de durante o intervalo de amostras 1 a 17 ter sido necessário uma taxa média de desaceleração da ordem de $0,77 \text{ m/s}^2$, com uma tensão de freio requerido de $3,3 \text{ V}$; é possível notar que para conseguir uma parada total do trem na estação Werneck fora suficiente o uso parcial do sistema de freios, notado através dos valores de desaceleração dentro do intervalo de $0,45 \text{ m/s}^2$ a $0,5 \text{ m/s}^2$, ambos considerados dentro dos padrões aceitáveis.

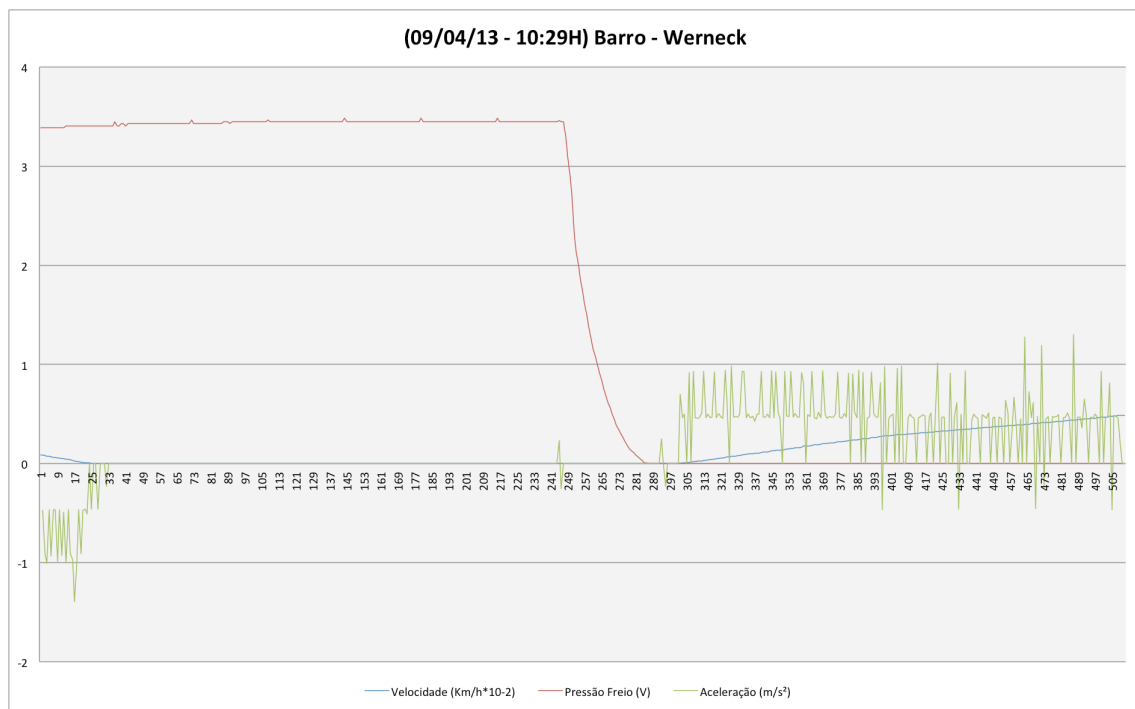


Figura 5-8. Gráfico da Correlação Entre Velocidade, Tensão de Freio Requerido e Desaceleração do TUE 11 (10h29min).

Análise da correlação entre velocidade, tensão de freio requerido e desaceleração do TUE 11, em quatro de Abril de 2013, às 11h04min

Na Figura 5-9, observa-se através da tensão de freio requerido uma grande variância, influenciando dessa forma, negativamente, uma melhor análise no que diz respeito a possível ocupação do trem no horário em questão. Dessa forma não é possível afirmar a necessidade real da utilização do freio de serviço máximo durante o intervalo de amostras de 29 a 113, no entanto, é válido notar que o valor da taxa média de desaceleração observada ($0,77 \text{ m/s}^2$) é condizente com os momentos de pico de tensão de freio requerido (3,3 V).

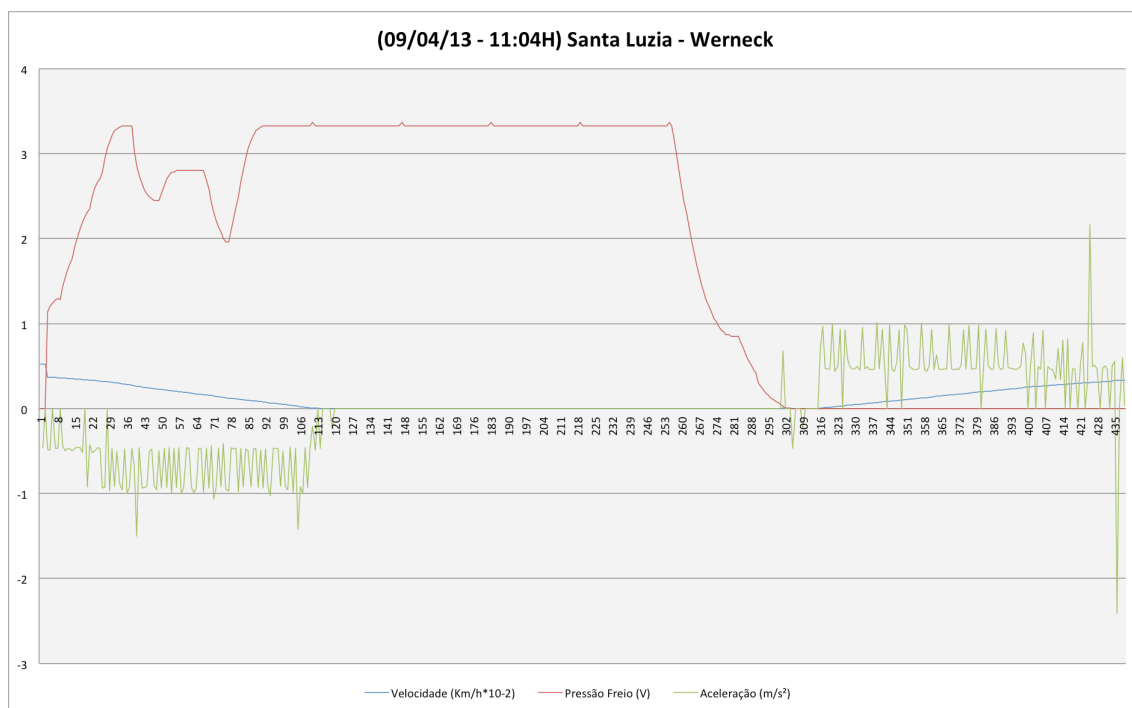


Figura 5-9. Gráfico da Correlação Entre Velocidade, Tensão de Freio Requerido e Desaceleração do TUE 11 (11h04min).

Análise da correlação entre velocidade, voltagem de freio requerido e desaceleração do TUE 11, em quatro de Abril de 2013, às 11h51min

Na Figura 5-10, nota-se uma aproximação do trem da estação Werneck em uma velocidade bastante reduzida, tendo como referência as amostras anteriores, no entanto, é perceptível a utilização de freio de serviço máximo durante o intervalo de amostras de 1 a 13, no qual a taxa média de desaceleração obteve o valor de $0,77 \text{ m/s}^2$. Este valor é condizente com a tensão de freio requerido da ordem de 3,3 V, demonstrado dessa forma o correto funcionamento do sistema de frenagem do TUE 11.

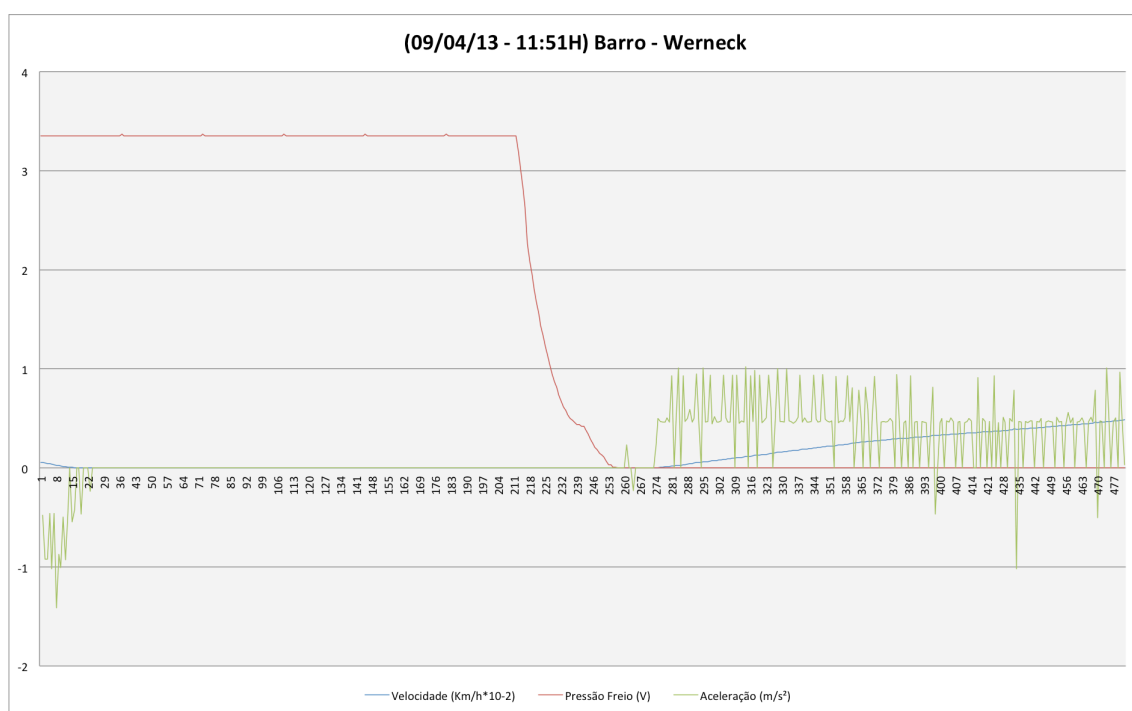


Figura 5-10. Gráfico da Correlação Entre Velocidade, Tensão de Freio Requerido e Desaceleração do TUE 11 (11h51min).

6 Conclusão

É válido ressaltar aqui neste trabalho todo o estudo teórico, coleta de dados e equipamentos, além do trabalho de campo, necessários para criação e validação do sistema implementado. Afinal, em posse destes, fora possível realizar diversos testes em um trem da CBTU/METROREC, em situações reais, as quais possibilitaram a avaliação de um sistema que pode vir a ser útil não apenas neste ambiente de teste, mas também em diversos outros sistemas metro ferroviários, pois a tecnologia utilizada e a mão de obra necessária para sua implantação estão ao alcance de diversas empresas deste ramo.

Logo, devido aos resultados obtidos neste levantamento dos dados realizado, e demonstrados anteriormente, é correto dizer que o sistema aqui proposto foi capaz de fornecer as informações relacionadas ao trem monitorado no que diz respeito à velocidade e pressão dos cilindros de freio, possibilitando assim expressar que o sistema é válido. Tal afirmação é possível devido a comparação com valores padrões de medições já existentes, que permitiram verificar que a desaceleração do trem era compatível com a voltagem gerada e fornecida para a PCU.

Dessa forma, partindo deste pressuposto é necessário salientar o ganho na qualidade das análises relacionadas ao sistema de frenagem dos trens, os quais são essenciais para prestação de um serviço apto no que diz respeito a segurança e conforto dos usuários de sistemas metro ferroviários, pois além de garantir a redução total da velocidade de um trem em um determinado espaço percorrido, também evita paradas bruscas e desnecessárias. Outro benefício são as decisões estratégicas tomadas pelo CCO, que poderá levar em conta informações em tempo real, evitando assim, que um defeito em pleno funcionamento venha a se agravar.

Por fim, com a validação do trabalho pode-se enfatizar o potencial de um sistema de telemetria de baixo custo, alto desempenho e pouco consumo de energia, que é capaz de abranger uma grande área e transmitir informações vitais de um trem aos setores das empresas metro ferroviárias interessados, os quais são revolucionados a partir do momento em que mudam por completo a forma que realizam o monitoramento e consequentemente manutenção de trens, pois o que outrora era uma análise esporádica, torna-se uma avaliação constante e exata.

7 Trabalhos Futuros

Dentro do âmbito deste trabalho, posteriormente, é possível realizar ainda uma análise mais profunda fazendo uso desta vez da pressão gerada nas bolsas de ar, as quais estão situadas embaixo dos carros-motor e carros-reboque; dessa forma poderá ser feito a correlação da quantidade de usuários para determinada taxa de desaceleração (ou aceleração), que baseada em padrões já definidos, poderá ser suficiente ou não.

Outro aprimoramento possível é realizar a análise da distância percorrida pelo TUE após a aplicação do freio de emergência, que também baseado em padrões, determinará a suficiência da taxa de frenagem obtida. Vale ressaltar que o uso de RFID (*Radio-Frequency Identification*) neste caso proporcionará um resultado mais preciso, e conseqüentemente uma maior segurança nos resultados gerados.

Além disto, pensando ainda no aumento da precisão da varredura da taxa de frenagem, bem como do acompanhamento do funcionamento dos sensores relacionados a este módulo, é possível através do STA também acompanhar a desaceleração do trem, no entanto, este valor gerado pode ser falso e influenciar outros módulos do TUE que fazem uso do mesmo, devido a isso se faz necessário também seu monitoramento. Monitoramento esse que pode ser mais preciso identificando qual ponto de frenagem do manipulador de freio está sendo usado pelo maquinista, pois para cada ponto existem taxas de desaceleração consideradas ideais, dessa forma é possível realizar uma análise mais profunda da frenagem.

Por fim, o sistema de telemetria proporciona uma variedade enorme de possibilidades para rastreamento dos diversos sensores do trem, possibilitando assim uma melhor prestação de serviço para os usuários dos sistemas metro ferroviário.

APÊNDICE I

Programação de Atividade

PROGRAMAÇÃO DE ATIVIDADES - LINHA CENTRO

No: 1469

Período: 25/ 3/2013 A 31/ 3/2013

Emissão: 01/abr/13

Responsável: LUIZ LEVY R-8559

ATIVIDADE N.: 236

DESCRIÇÃO: TESTE DE ENGENHARIA COM TREM - PROJETO DE TESE - RAILBEE.

Equipamento instalado no TUE-11 e na Estação Werneck.

Dia	Entrada	Saída	Local	Responsáveis:
25	08:00	17:00	TRECHO REC-JAB/COQ-GIB	Funcionário do DETRA (Romulo César- CBTU-IFPE . Eric Borba CBTU-UFPE.
26	08:00	17:00	TRECHO REC/CAJ	
27	08:00	17:00		
28	08:00	17:00		
29	08:00	17:00		

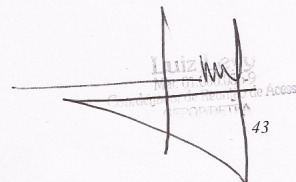
OBSERVAÇÕES

Solicitar acesso ao supervisor da Sala Verde.

Solicitar acesso ao chefe do Posto de Movimento de CAV.

Receber/devolver trecho via rádio.

Comunicar início e fim da atividade.


 LUIZ LEVY
 43

ANEXO I



Metrorec - Tráfego Linha Centro Chegadas e Partidas em Plataformas - Rec/Coq

Filtros Aplicados

Data e Hora Inicial: 9/4/2013 06:00:48

Data e Hora Final: 9/4/2013 12:05:48

Trem: 11

Plataforma: Werneck

Data e Hora da Geração: 09/04/2013 - 12:05:59

Server 1

VIA 1								VIA 2							
Identificação			Headway Realizado	Chegada	Plataforma			Identificação			Headway Realizado	Chegada	Plataforma		
Trem	Viagem	Estação			Atraso	Partida	Atraso	Trem	Viagem	Estação			Atraso	Partida	Atraso
REC GIB 011	21	WEK1	00:04:36	06:11:21	00:01:20	06:11:31	00:01:20	GIB REC 011	39	WEK2	00:03:39	06:54:55	00:04:49	06:55:29	00:05:03
REC JAB 011	54	WEK1	00:04:34	07:30:26	00:05:22	07:30:42	00:05:22	JAB REC 011	68	WEK2	00:05:50	08:09:25	00:04:28	08:10:14	00:04:57
REC JAB 011	82	WEK1	00:06:35	08:42:55	00:05:51	08:43:11	00:05:51	JAB REC 011	94	WEK2	00:10:05	09:21:08	00:14:11	09:21:34	00:14:17
REC JAB 011	104	WEK1	00:10:15	09:49:58	00:09:54	09:50:44	00:09:54	JAB REC 011	111	WEK2	00:05:23	10:28:14	00:24:17	10:28:58	00:24:41
REC GIB 011	120	WEK1	00:10:01	11:05:11	00:30:37	11:05:24	00:30:37	GIB REC 011	142	WEK2	00:14:06	11:51:37	00:06:58	11:52:17	00:07:18

ANEXO II

VILLARES
Eletrocontroles Villares Ltda

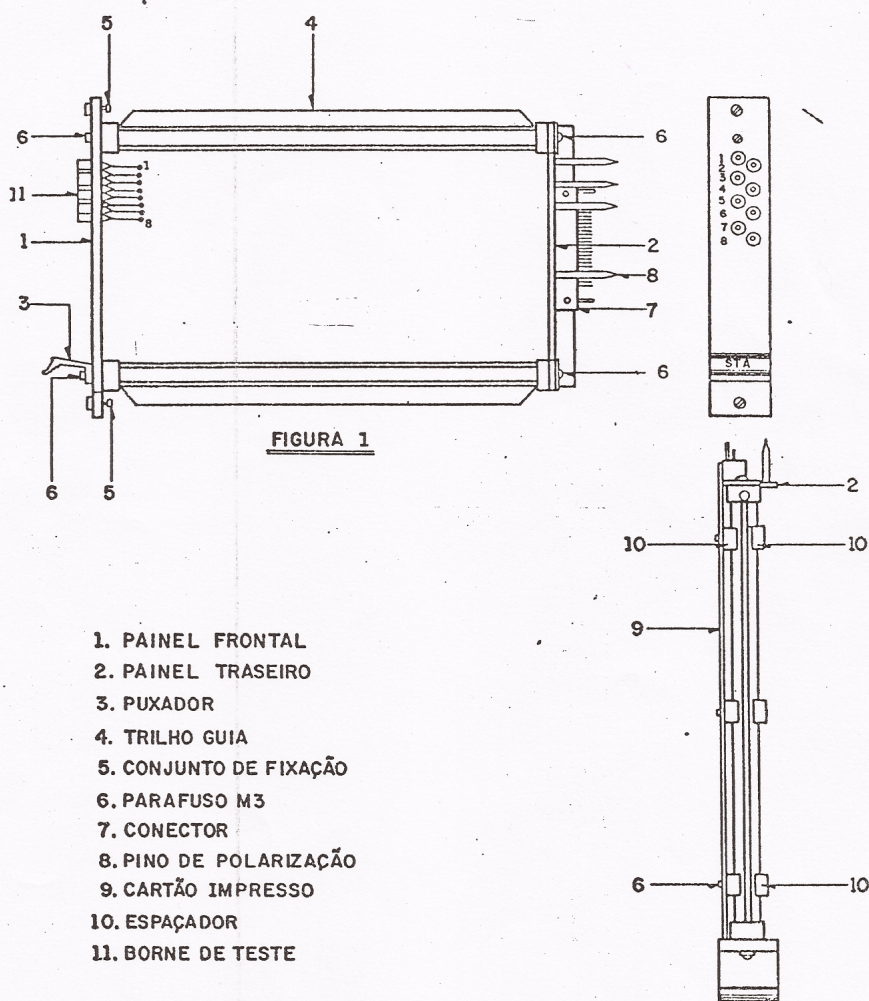
Manual Técnico
COMPONENTES

Código MC 306 403 FI 11/32

Emissão Date 7/85
Signa EET

Visto

Título MÓDULO DO CARTÃO SELEÇÃO DE TAXA



ANEXO III

VILLARES
Eletrocontroles Villares Ltda

Manual Técnico
COMPONENTES

Código MC 306 403 FI 12/32
Data 7/85
Emissão EET
Visto

Título MÓDULO DO CARTÃO SELEÇÃO DE TAXA

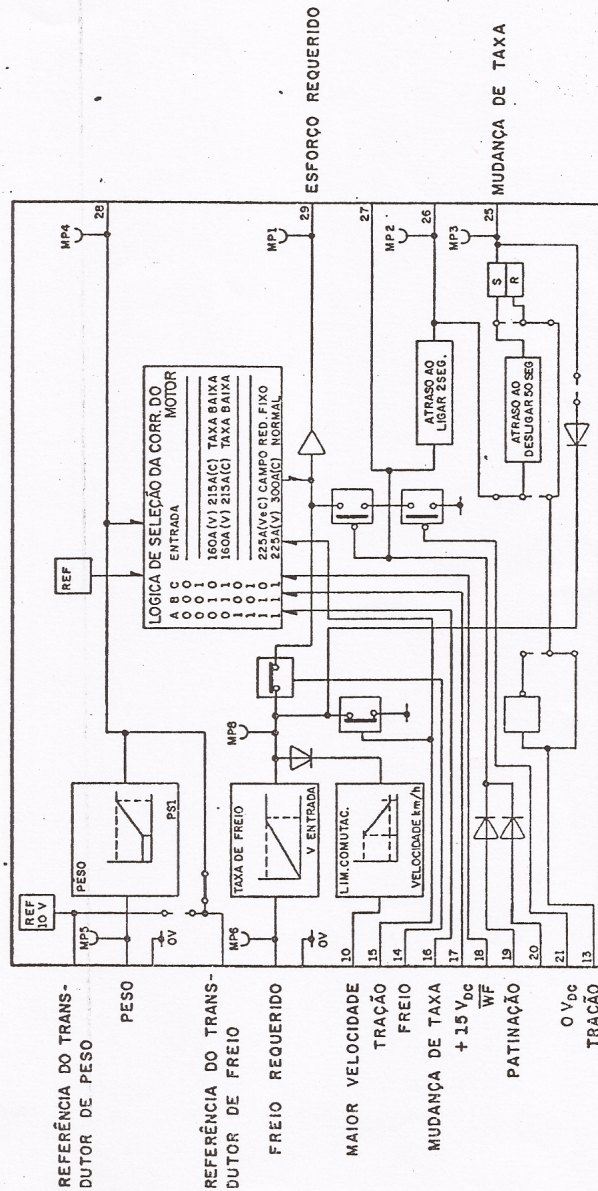
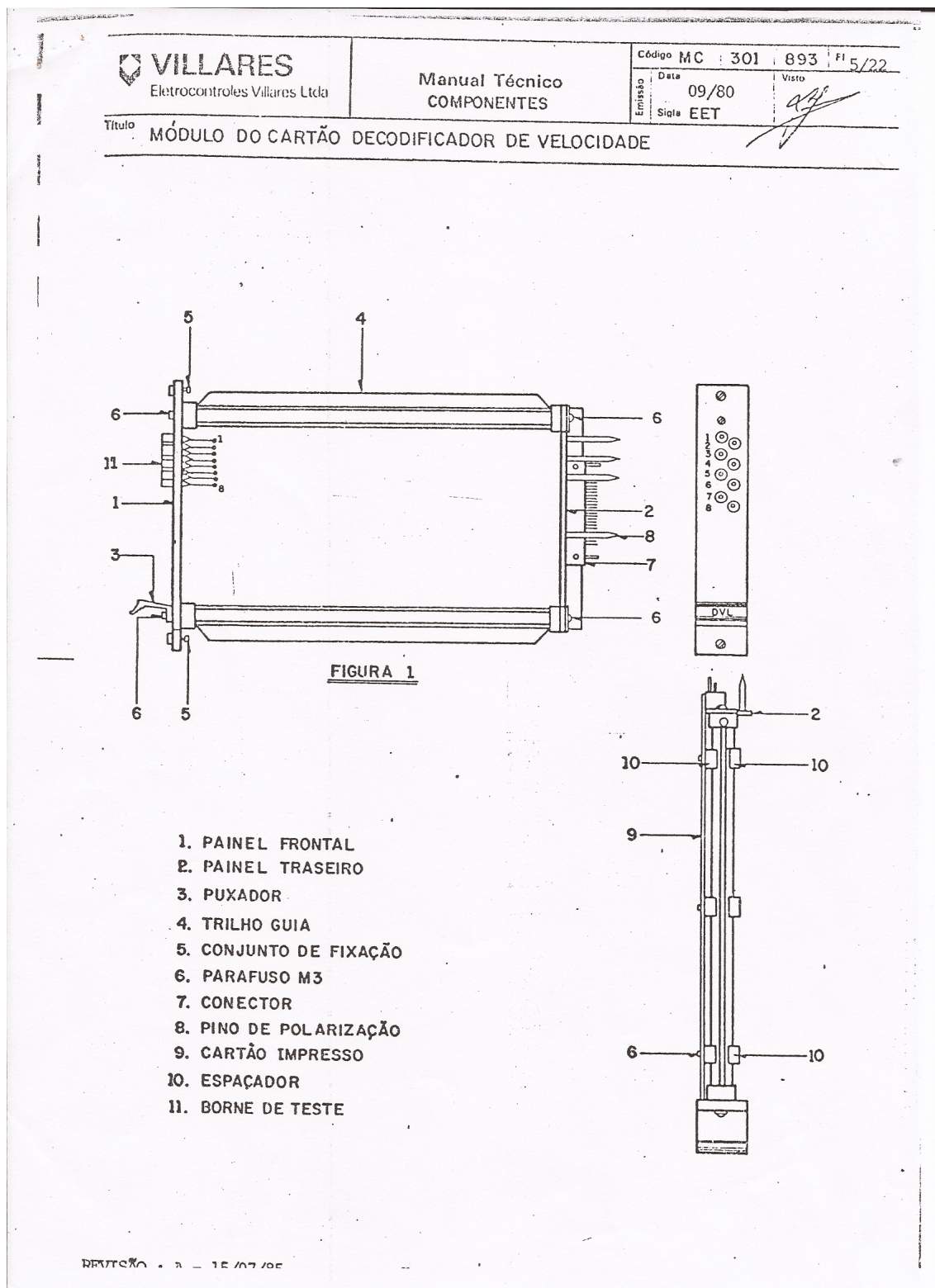


DIAGRAMA EM BLOCO - FIGURA 2

ANEXO IV



ANEXO V

VILLARES
Eletrócontroles Villares Ltda

Manual Técnico
COMPONENTES

Código	MC	301	893	Fl	6/22
Data	09/80			Visto	
Emissão	Sigla			EET	

Título **MÓDULO DO CARTÃO DECODIFICADOR DE VELOCIDADE**

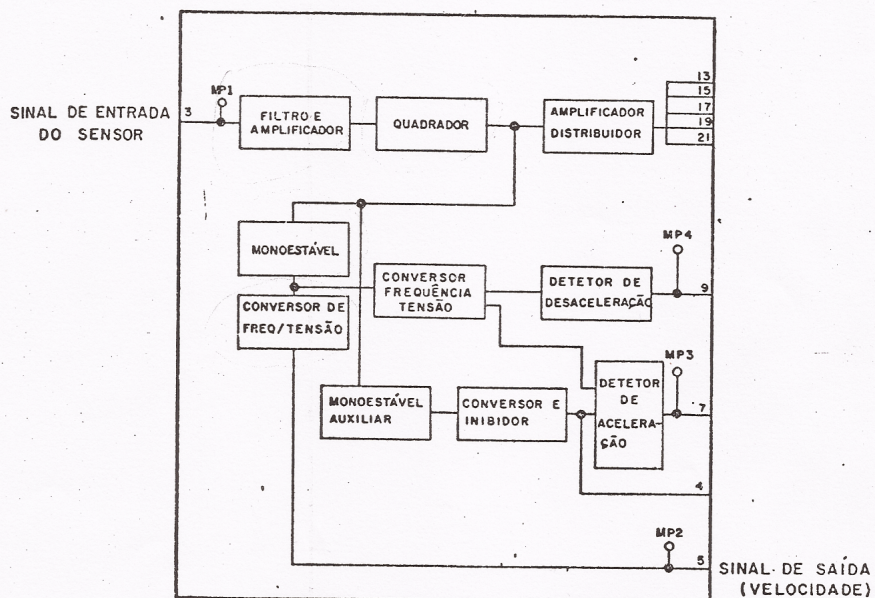


DIAGRAMA EM BLOCO - FIGURA 2

24
11
12
1

Referências

ZigBee. (28 de Março de 2013). Acesso em 01 de Abril de 2013, disponível em Wikipédia: <http://pt.wikipedia.org/wiki/ZigBee>

ZigBee Specification Network Topology. (s.d.). Acesso em 01 de Abril de 2013, disponível em ZigBee Alliance: <http://www.zigbee.org/Specifications/ZigBee/NetworkTopology.aspx>

ZigBee Specification Overview. (s.d.). Acesso em 1 de Abril de 2013, disponível em ZigBee Alliance: <http://docs.zigbee.org/zigbee-docs/dcn/07-5299.pdf>

Zhou, Y., Xing, J., & Yu, Q. (2006). Overview of Power-Efficient MAC and Routing Protocols for Wireless Sensor Networks. *Mechatronic and Embedded Systems and Applications, Proceedings of the 2nd IEEE/ASME International Conference* (pp. 1-6). Beijing: Conference Publications.

Wei, C.-L., Cai, Z., Tam, H.-Y., Ho, S.-L., & Xin, Q. (2012). Real-Time Fault Diagnosis of Train Bogie Using FBG Sensors. *Intelligent System Design and Engineering Application (ISDEA), 2012 Second International Conference on*, (pp. 1087-1090). Sanya, Hainan.

Xuhui, Z., Junfeng, J., Jiaxin, W., & Yingjie, Z. (2011). Using BP Neural Network Algorithm Improve the Prediction Accuracy of Distance between ZigBee. *Intelligent Computation Technology and Automation (ICICTA), 2011 International Conference on*, 2, pp. 790-794. Shenzhen, Guangdong.

Yang, Y., Huan, Z.-Q., Zhong, Z.-d., & Fu, X. (2010). Railways, A Study of Real-Time Data Transmission Model of Train-to-Ground Control in High-Speed. *Vehicular Technology Conference Fall (VTC 2010-Fall), 2010 IEEE 72nd*, (pp. 1-5). Ottawa.

Yamazaki, H., Marumo, Y., Iizuka, Y., & Tsunashima, H. (2008). Driver model simulation for railway brake systems. *Railway Condition Monitoring, 2008 4th IET International Conference on*, (pp. 1-6). Derby.

(01 de Abril de 2013). Fonte: ZigBee Alliance: www.zigbee.org

Abed, S. K. (2010). European Rail Traffic Management System - An Overview. *1st International Conference on Energy, Power and Control*. Basrah.

Aboelela, E. H., Edberg, W., Papakonstantinou, C., & Vokkarane, V. M. (2006). Wireless sensor network based model for secure railway operations. *Performance, Computing, and Communications Conference, 2006. IPCCC 2006. 25th IEEE International*, 6, p. 628. Phoenix, AZ.

Aldred, B. R., & Gorasia, N. S. (2009). REIS 2009 Railway Communications Systems. *Railway Electrification Infrastructure and Systems, 2009. REIS 2009. 4th IET professional Development Course on*, (pp. 149-167). London.

Ascariz, J. M., & Boquete, L. (2007). System for Measuring Power Supply Parameters with ZigBee Connectivity. *Instrumentation and Measurement Technology Conference Proceedings, 2007. IMTC 2007. IEEE*, (pp. 1-5). Warsaw.

- Arun, P., Sabarinath, G., Madhukumar, S., & Careena, P. (2013). Implementation of ZigBee Based Train Anti-Collision And Level Crossing Protection System for Indian Railways. *International Journal of Latest Trends in Engineering and Techonology*, 2 (1).
- Araújo, R. (July de 2009). "RailBee" Sistema de instrumentação virtual de veículos em malhas metroferroviárias. *Revista Ferroviária*, ano 70, pp. 58-61.
- Cao, L., Jiang, W., & Zhang, Z. (2008). Networked wireless meter reading system based on ZigBee technology. *Control and Decision Conference, 2008. CCDC 2008. Chinese*, (pp. 3455-3460). Yantai, Shandong.
- Caprile, S. R. (2009). *Equisbí : desarrollo de aplicaciones con comunicación remota basadas en módulos ZigBee y 802.15.4* (1a Edition ed.). Buenos Aires: Gran Aldea Editores.
- CBTU/METROREC. (29 de Abril de 2009). Manual de Tecnologia do TUE. Recife, Pernambuco, Brasil.
- CBTU/METROREC. (2006). *Sistemas Elétricos de Tração Frenagem Reostática e Circuito Auxiliar do TUE - Módulo Controle de Propulsão (PCU)*. Recife.
- CIA. Industrial Santa Matilde. (1984). *Detalhes de Fabricação e Montagem dos Trens* (Vol. I). Recife.
- Chen, R.-C., & Lin, Y.-S. (2012). Using ZeeBee Sensor Network with artifical neural network for indoor location. *Natural Computation (ICNC), 2012 Eighth International Conference on*, (pp. 290-294). Chongqing.
- CSMA/CA. (28 de Março de 2013). Acesso em 01 de Abril de 2013, disponível em Wikipédia: <http://pt.wikipedia.org/wiki/CSMA/CA>
- Edwards, M. C., Donelson, J., Zavis, W. M., Prabhakaran, A., Brabb, D. C., & Jackson, A. S. (2005). Improving freight rail safety with on-board monitoring and control systems. *Rail Conference, 2005. Proceedings of the 2005 ASME/IEEE Joint*, (pp. 117-122). Colorado.
- Eleetrocontroles Villares Ltda. (1980). *Módulo do Cartão Decodificador de Velocidade*. Recife.
- Eleetrocontroles Villares Ltda. (1985). *Módulo do Cartão Seleção de Taxa*. Recife.
- Digi. (20 de 8 de 2008). *Support Documentation*. Acesso em 1 de Abril de 2013, disponível em Digi Your M2M Expert: http://ftp1.digi.com/support/documentation/90001003_A.pdf
- Digi. (17 de 5 de 2010). *Support Documentation*. Acesso em Abril 01 de 2013, disponível em Digi Your M2M Expert: http://ftp1.digi.com/support/documentation/90000976_M.pdf
- Ding, F., Song, G., Li, J., & Song, A.-g. (2008). A ZigBee Based Mesh Network for Home Control System. *Education Technology and Training, 2008. and 2008 International Workshop on Geoscience and Remote Sensing. ETT and GRS 2008. International Workshop on*, 1, pp. 744-748. Shanghai.

Dhahbi, S., Abbas-turki, A., Hayat, S., & El Moudni, A. (2011). Study of the high-speed trains positioning system: European signaling system ERTMS / ETCS. *Logistics (LOGISTIQUA), 2011 4th International Conference on*, (pp. 468-473). Hammamet.

DSSS. (29 de Março de 2013). Acesso em 01 de Abril de 2013, disponível em Wikipédia: <http://pt.wikipedia.org/wiki/DSSS>

Fathirad, I., & Whittington, J. (2011). A Flexible FPGA and SBC Based Electric Vehicle Telemetry System., (pp. 219-226). Melbourne.

França, H. M. (09 de Novembro de 2011). *Agência Nacional de Transportes Terrestres*. Acesso em 20 de Fevereiro de 2013, disponível em Encontro Brasil e Portugal para Troca de Experiências nas Telecomunicações Ferroviárias: www.tavbrasil.gov.br

Golmie, N., Cypher, D., & Rebala, O. (2004). Performance evaluation of low rate WPANs for medical applications. *Military Communications Conference, 2004, 2*, pp. 927-933.

Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo - (IPT). (1985). *Análise dos Resultados dos Testes de Aceitação do Trem do METROREC*. São Paulo.

Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo - (IPT). (1986). *Testes do Tipo do TUE de Recife*. São Paulo.

Hu, G., Huang, A., Chang, T., Cheng, X., Wu, H., Xie, L., et al. (2012). A Sensor-Based Seamless Handover Solution for Express Train Access Networks (ETANs). *Communications Letters, IEEE*, 16 (4), 470-472.

Hu, J., Tian, X., Feng, Q., & Li, H. (2011). Design and implementation of the train brake monitoring system. *Control and Decision Conference (CCDC), 2011 Chinese*, (pp. 1824-1827). Mianyang.

Higuera, J., Kartsakli, E., Valenzuela, J., Alonso, L., Laya, A., Martínez, R., et al. (2012). Experimental Study of Bluetooth, ZigBee and IEEE 802.15.4 Technologies on Board High-Speed Trains. *Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*, (pp. 1-5). Yokohama.

Ho, S.-L. L. (2008). Futuristic railway condition monitoring system. *Railway Engineering - Challenges for Railway Transportation in Information Age, 2008. ICRE 2008. International Conference on*, (pp. 1-9). Hong Kong.

Hofestadt, H. (1995). GSM-R: global system for mobile radio communications for railways. *Electric Railways in a United Europe, 1995., International Conference on*, (pp. 111-115). Amsterdam.

Ke, Y., & Ruiqiang, L. (2008). Initialization of ZigBee Communication Module and Information Processing. *Computational Intelligence and Industrial Application, 2008. PACIIA '08. Pacific-Asia Workshop on*, 1, pp. 617-620. Wuhan.

Kootkar, S., & Al-Ars, Z. (2008). Design and Implementation of Reliable Wireless Sensor Networks - A Case Study in Commuter Trains. *Workshop for Research on Integrated Systems and Circuits (ICWMC)*, (pp. 399-403).

- Liu, K. Y., Siew, W. H., Stewart, R. W., & Wang, Y. (2008). Smart wireless railway monitoring system. *Railway Condition Monitoring, 2008 4th IET International Conference on*, (pp. 1-3). Derby.
- Li, Y. (2011). Implementing ZigBee Protocol as Assignments in Teaching Embedded Systems. *Electronic Design, Test and Application (DELTA), 2011 Sixth IEEE International Symposium on*, (pp. 34-38). Queenstown.
- Nejikovsky, B., & Keller, E. (2000). Wireless communications based system to monitor performance of rail vehicles. *Railroad Conference* (pp. 111-124). Newark, NJ: Proceedings of the 2000 ASME/IEEE Joint.
- Nishibori, N., Sasaki, T., Kawai, O., Ogushi, H., Kasai, T., & Toyoda, A. (2001). Development of tracking train detection device (COMBAT) by using wireless communication. *Railroad Conference, 2001* (pp. 161-170). Toronto, Ont.: Proceedings of the 2001 IEEE/ASME Joint.
- Muhaidheen, M. (2007). New Application of M2M in Railway Protection. *Conference on Computational Intelligence and Multimedia Applications, 2007. International Conference on*, 4, pp. 110-114. Sivakasi, Tamil Nadu.
- Messias, A. (2013). Acesso em 1 de Abril de 2013, disponível em ROGERCOM: www.rogercom.com
- METROREC. (2013). Acesso em 01 de Abril de 2013, disponível em Sítio da Superintendência de Trens Urbanos do Recife: www.metrorec.com.br
- Modelo OSI. (27 de Março de 2013). Acesso em 01 de Abril de 2013, disponível em Wikipédia: http://pt.wikipedia.org/wiki/Modelo_OSI
- Modo de Operação (criptografia). (29 de Março de 2013). Acesso em 01 de Abril de 2013, disponível em Wikipédia: [http://pt.wikipedia.org/wiki/Modo_de_opera%C3%A7%C3%A3o_\(criptografia\)](http://pt.wikipedia.org/wiki/Modo_de_opera%C3%A7%C3%A3o_(criptografia))
- Overhead. (16 de Março de 2013). Acesso em 01 de Abril de 2013, disponível em Wikipédia: <http://pt.wikipedia.org/wiki/Overhead>
- SatheeshKumar, P. (2010). An efficient way of monitoring and controlling the train parameters using Multi-core Embedded Processors (MCEP). *Computer Science and Information Technology (ICCSIT), 2010 3rd IEEE International Conference on*, 9, pp. 552-555. Chengdu.
- Shao-hua, C., Zi-wei, Z., Zhong-gao, S., & Qing-hua, W. (2011). A research on technique of linear networking based on Zigbee wireless sensor network. *Communication Software and Networks (ICCSN), 2011 IEEE 3rd International Conference on*, (pp. 263-266). Xi'an.
- Shi, J., Zhang, X., & Gao, T. (2010). Performance Analysis of GSM-R Network Structure in China Train Control System. *International Conference on Eletronics and Information Engineering, II*, pp. 214-218. Kyoto.
- Tang, H., Wu, H., & Wen, S. (2011). A Novel GSM-R Train Control System and Method for Real-time Transmission of Data. *Microwave, Antenna, Propagation, and EMC Technologies for*

Wireless Communications (MAPE), 2011 IEEE 4th International Symposium on, (pp. 675-678).
Beijing.