UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO JOÃO DEL-REI PRÓ-REITORIA DE PESQUISA	CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA - PPGEL	

PROTÓTIPO DE UM CONTROLE DE DEMANDA DE ENERGIA BASEADO EM SISTEMAS SUPERVISÓRIO E REDE DE SENSORES SEM FIO.

Eduardo Henrique Ferroni

Orientador: Profª. Dra. Valceres Vieira Rocha e Silva

Dissertação submetida ao PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA – PPGEL, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Ciências em Engenharia Elétrica.

Novembro de 2013

São João del-Rei – MG – BRASIL

Eduardo Henrique Ferroni

PROTÓTIPO DE UM CONTROLE DE DEMANDA DE ENERGIA BASEADO EM SISTEMAS SUPERVISÓRIO E REDE DE SENSORES SEM FIO.

Banca Examinadora:

Orientadora: Profª. Valceres Vieira Rocha e Silva
Universidade Federal de São João del Rei

Prof. Eduardo Gontijo Carrano
Universidade Federal de Minas Gerais

Prof. Humberto Xavier Araújo
Universidade Federal de São João del Rei

Profa. Patrícia Romeiro da Silva Jota
CEFET - MG

São João del-Rei, 22 de novembro de 2013

AGRADECIMENTOS

A Deus a força e saúde.

À professora Valceres pelo apoio e compartilhamento de conhecimentos e experiências acadêmicas incalculáveis.

Ao professor Omar Branquinho, as orientações, sugestões e apoio técnico e financeiro ao ceder toda estrutura para realizar os testes.

Ao professor Mateus Costa, pelas orientações prestadas.

À todos os professores do PPGEL, a confiança.

Aos secretários do PPGEL, a paciência e colaboração.

Aos meus pais Sebastião e Claudete, o apoio, ensinamentos e por sempre acreditarem em mim.

À minha esposa e filhas Suely, Carolina e Letícya, a compreensão, paciência, o carinho e o amor.

Ao Grupo UNIS pelo apoio.

À FAPEMIG e ao PPGEL, o apoio financeiro.

RESUMO

Este trabalho consiste no projeto de um protótipo de controle de demanda de energia utilizando três ferramentas: algoritmo genético, sistema supervisório e rede de sensores sem fio. O algoritmo genético escolhe a melhor combinação de cargas em um processo industrial que devem permanecer ligadas. Esta escolha se faz em função das condições do ambiente produtivo e da limitação do consumo de energia. O sistema supervisório faz a interface entre o algoritmo genético e a rede de sensores sem fio. Esta, por sua vez, têm como função proporcionar a telemetria, o telecomando e a telesupervisão.

Os testes deste sistema supervisório e rede de sensores sem fio foram realizados em campo e laboratório. Entretanto, dados coletados do sistema elétrico e produtivo de uma empresa do ramo de alimentos foram usados para testar a montagem e implementação deste sistema de telecontrole através de simulações computacionais.

Esta empresa usada como modelo possui um sistema de cogeração cuja capacidade está abaixo da demanda de potência necessária para manter todo o processo produtivo. Trabalhos desenvolvidos, usando estes dados, se mostraram eficientes na aplicação de um algoritmo genético para definir a melhor combinação de cargas que devem permanecer ligadas no horário de ponta. Entretanto, o corte de carga é feito de forma manual, o que não isenta o sistema de um colapso de energia em casos de falha do fornecimento ou até mesmo um colapso devido às alterações do ambiente produtivo, o que tornaria a combinação inicial de cargas não mais adequada.

Então, em função de medidas coletadas por sensores e levadas à central, este algoritmo genético passa a usar essas informações para definir a melhor combinação de cargas. Estas informações que ficam armazenadas são constantemente lidas pelo Sistema Supervisório ScadaBR® criado, que um segundo antes do horário de ponta ou quando ocorrem falhas do sistema de fornecimento pela concessionária, atua sobre os controladores instalados nas cargas quando necessário. A coleta de dados e atuação nos equipamentos é realizada por uma rede de sensores de 915 MHz, que se mostrou confiável quando submetido~~s~~ a ambientes industriais.

ABSTRACT

This work consists on developing a prototype of an energy demand controller through three tools: genetic algorithm, supervisory system and wireless sensor network. The genetic algorithm selects the best combination of loads in an industrial process which must be kept turned on. That choice takes place according to the production process requirements and the energy consumption limitation. The supervisory system establishes the interface between the genetic algorithm and the wireless sensor network. That network is in charge of providing telemetric actions, remote control and telesupervision.

The supervisory system and wireless sensor network were tested in the field and in the experimental laboratory but the electrical and production data collected came from a food company. Through those data the assembly and implementation of this remote system device were tested by applying computing simulations.

The food company used as model has a thermal co-generation for peaks of demand and eventual power supply loss. Studies developed by using those data, proved to be efficient applying the genetic algorithm to determine the best combination of loads that must be connected at peak hours. As the load is manually switched off, the system can be driven to an energy collapse if power supply fails or even due to changes in the manufacturing environment. Any delay on cutting the load can invalidate the initial load combination proposal suggested by the genetic algorithm. Then, based on the information collected by the sensors and led to the central, the genetic algorithm determines the best combination of loads. Those information are stored and can be constantly read by the ScadaBR™ Supervisory System which, a second before the peak hours or when the power supplier fails, acts over the loads drivers, when necessary. The data collection and the action on the equipments are performed by a network composed of 915 MHz sensors that have proven to be reliable when working in an industrial section.

ÍNDICE

LISTA DE TABELAS ..... **xi**

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS ..... **xii**

INTRODUÇÃO **13**

1.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS 13

1.2 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO 16

TÉCNICAS COMPUTACIONAIS PARA USO EM SISTEMAS DE CONTROLE EMBARCADOS E SEM FIO PARA APLICAÇÕES INDUSTRIAIS **17**

2.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS 17

2.2 REDES DE COMPUTADORES 18

2.2.1 TIPOS DE REDES 18

2.2.2 TOPOLOGIAS 20

2.2.3 ARQUITETURA DE REDE 21

2.2.4 PROTOCOLOS 22

2.2.5 QUALIDADE DE SERVIÇO 24

2.3 SISTEMAS EMBARCADOS 25

2.4 *ZIGBEE* E RADIUINO 26

2.4.1 PROTOCOLO 802.15.4 27

2.5 SISTEMA SUPERVISÓRIO 28

2.6 ALGORITMO GENÉTICO 30

2.6.1 REPRESENTAÇÃO DAS SOLUÇÕES VIÁVEIS 32

2.6.2 FUNÇÃO CUSTO 33

2.6.3 POPULAÇÃO INICIAL 33

2.6.4 OPERADORES GENÉTICOS 33

2.6.5 SELEÇÃO 34

2.6.6 CRUZAMENTO 34
2.6.7 MUTAÇÃO 35
2.6.8 ELITISMO 36
2.7 CONCLUSÃO 36

REDE DE SENSORES SEM FIO - RSSF 38

3.1 INTRODUÇÃO 38
3.2 REDE DE SENSORES SEM FIO - RSSF 40
3.3 PLATAFORMA RADIUINO 41
3.4 MODELOS DE PROPAGAÇÃO 45
3.4.1 MODELO DO ESPAÇO LIVRE – FÓRMULA DE FRIIS 46
3.4.2 MODELO DE LOG-*DISTANCE* 48
3.4.3 MODELO COM OBSTÁCULOS 49
3.5 CONCLUSÃO 49

A PLANTA INDUSTRIAL UTILIZADA COMO MODELO DE CARGA PARA O PROJETO DO CONTROLE DE DEMANDA DE ENERGIA POR REDE DE SENSORES SEM FIO 51

4.1 INTRODUÇÃO 51
4.2 A PLANTA INDUSTRIAL 53
4.3 ESTUDO DE CASO: CORTE INTELIGENTE E AUTOMÁTICO DE CARGAS E AJUSTE ATRAVÉS DE UM SISTEMA SUPERVISÓRIO 57
4.4 CONCLUSÃO 58

CONFIABILIDADE DE REDE DE SENSORES SEM FIO OPERANDO EM SUBESTAÇÃO DE POTÊNCIA ELÉTRICA INDUSTRIAL 60

5.1 INTRODUÇÃO 60
5.2 TESTE DE CONFIABILIDADE 61
5.3 RESULTADOS E ANÁLISES 65

5.3.1 CARACTERIZAÇÃO DO TESTE 65
5.3.2 *PATH LOSS* 66
5.3.3 ANÁLISE ESTATÍSTICA 66
5.4 CONCLUSÃO 69

RETIRADA INTELIGENTE DE CARGAS INDUSTRIAIS POR REDE DE SENSORES EM COMUNICAÇÃO VIA RÁDIO EM 915 MHz. 71

6.1 INTRODUÇÃO 71
6.2 IMPLEMENTAÇÃO DA RSSF E DO SCADABR® 72
6.3 IMPLEMENTAÇÃO DO ALGORITMO GENÉTICO 75
6.4 RESULTADOS DO CORTE DE CARGAS VIA RSSF 86
6.5 CONCLUSÃO 89

CONCLUSÃO 90

7.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS 90
7.2 SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS 93

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 94

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Método de Seleção SUS (LUGER, 2004). 34

Figura 3.1: Arquitetura de uma RSSF (INTERNET OF THINGS, 2009)..... 39

Figura 3.2: Protocolos para as redes sem fio (RAPAPPORT, 2009)..... 39

Figura 3.3: Faixas de frequências não licenciadas (RAPPAPORT, 2009) 41

Figura 3.4: Pinagem do Arduino que abstrai o microcontrolador (OXER e BLEMINGS, 2009)..... 43

Figura 3.5: Plataforma de comunicação Radiuino..... 43

Figura 3.6: Pilhas de Protocolo TCP/IP com 5 camadas (BRANQUINHO, 2011). 44

Figura 3.7: *Frame* da plataforma Radiuino 44

Figura 3.8: Sistema de Comunicação Sem Fio 45

Figura 3.9: Frente de onda de uma fonte isotrópica a uma distância r (RAPPAPORT, 2009)..... 46

Figura 3.10: Diagrama de radiação das antenas isotrópicas e direcionais (RAPPAPORT, 2009)..... 47

Figura 4.1: Vista panorâmica da empresa (Google Earth) 52

Figura 4.2: *Layout* da planta industrial (COSTA, 2012)..... 53

Figura 4.3: Diagrama unifilar com as principais cargas da planta (COSTA, 2012)55

Figura 5.1: Testes realizados na subestação 61

Figura 5.2: Subestação utilizada no experimento..... 62

Figura 5.3: Rádio BE 900 63

Figura 5.4: As duas situações analisadas. 64

Figura 5.5: Diagrama de irradiação da antena da base com 60 graus de ângulo de abertura..... 64

Figura 5.6: Tela do ScadaBR® com os resultados 65

Figure 5.7: Distribuição normal para a situação 1. 67

Figure 5.8: Distribuição normal para a situação 2. 67

Figura 5.9: Função distribuição Gaussiana cumulativa da situação 1. 68

Figura 5.10: Função distribuição Gaussiana cumulativa da situação 2. 69

Figura 6.1: Estrutura do sistema de tele controle. 72

Figura 6.2: Estrutura dos *bytes* de comunicação entre base e sensor. 73

Figura 6.3: Tela de configuração dos parâmetros de comunicação da plataforma Radiuino. 73

Figura 6.4: Rádio BE900 fazendo *upload* do *firmware* 74

Figura 6.5: Estrutura dos Indivíduos do AG implementado 75

Figura 6.6: Estrutura dos arquivos de entrada do AG. 77

Figura 6.7: Fluxograma do *script* principal do sistema supervisório. 79

Figura 6.8: Placa do nó sensor..... 83

Figura 6.9: Tela de controle quando a energia é fornecida pela concessionária . 86

Figura 6.10: Tela de controle quando a energia é fornecida pela cogeração..... 87

Figura 6.11: Valores de consumo medidos e propostos pelo indivíduo gerado pelo AG. 88

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1.Tecnologia de transmissão sem fio (KOCHHANN, 2012) 28

Tabela 3.1: O valor de β em função do ambiente..... 49

Tabela 4.1: Valores das potências ativas das cargas que o sistema de controle poderá atuar 56

Tabela 5.1: O valor de β nas duas situações 66

Tabela 5.2: O valor de σ para as duas situações. 68

Tabela 6.1: Parâmetros do AG desenvolvido 75

Tabela 6.2: *Datapoints* e *Datasouces* tratados no supervisório 78

Tabela 6.3: Correspondência entre o *bit* do indivíduo, com o equipamento e o seu peso em decimal 81

Tabela 6.4: Configuração da rede de sensores utilizada na simulação 84

Tabela 6.5: Faixas das temperaturas e pressão utilizadas. 86

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

AG	**Algoritmo Genético.**
FC	**Função de Custo.**
SCADA	***Supervisory Control and Data Acquisition.***
CLP	**Controlador Lógico Programável.**
SUS	***Stochastic Universal Sampling.***
SE	**Subestação.**
MAC	**Controle de Acesso ao Meio.**
LAN	***Local Area Networks*.**
CPD	**Centro de Processamentos de Dados.**
MAN	***Metropolitan Area Networks*.**
WLAN	***Wireless Local Area Networks*.**
TCP	***Transmission Control Protocol*.**
IP	***Internet Protocols*.**
USB	***Universal Serial Bus*.**
IoT	***Internet of Things*.**
RSSF	**Redes de Sensores Sem Fio.**
RSSI	***Received Signal Strength Indicator*.**

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

Segundo Aneel, em 2013 o setor industrial tem sido responsável por consumir mais de 47% da energia total e por mais da metade da energia elétrica, incluindo a cogeração. O gerenciamento de cargas combinado com o sistema produtivo é fundamental para se obter uma melhor eficiência na utilização da energia, isto é, maior produtividade com menor consumo de energia. A determinação das cargas de maior importância para um determinado instante, dentro de uma planta industrial é fundamental no processo decisório (ALLEN e LEE, 2005).

As unidades industriais que possuem geração própria geralmente adotam planos de cortes de cargas nos horários de pico e/ou em momentos emergenciais de falta de fornecimento de energia. Esta política geralmente acontece devido às limitações dos sistemas de geração, que afetam o processo produtivo. A eliminação das cargas menos prioritárias e o comportamento elétrico das mesmas mantêm a estabilidade do processo (IEEE, 2007).

Em muitas indústrias, a suspensão temporária no suprimento de energia pode significar enormes prejuízos por interromper o ritmo produtivo, a geração própria faz a diferença no balanço financeiro, pois tem como objetivo primordial, a manutenção do sistema elétrico e consequente manutenção da produção. Os consumidores autoprodutores podem ser classificados em três tipos (CPFL, 2005):

- **Autoprodutores com venda de excedente:** são os consumidores que possuem geração própria, a qual pode operar em paralelo com o sistema da concessionária de energia e vendem o excedente de sua geração para a distribuidora usando a rede de distribuição;

- **Autoprodutores sem venda de excedente:** são consumidores com geração própria que pode operar em paralelo com o sistema elétrico e não possuem excedente para venda;

- **Autoprodutores com paralelismo momentâneo:** são consumidores que possuem geração própria que opera em paralelo com o sistema somente por um curto período de tempo e que alimentam a carga própria. Este paralelismo dura alguns segundos e é realizado pelo relé de transferência. Muitas concessionárias de energia exigem um relé de proteção coordenado pela função 31(função de potência reversa), que não permite o paralelismo por uma potência superior a 5% da potência máxima gerada, isto é, no momento que o sistema de geração própria alcança 5% do valor nominal de geração o relé de proteção desconecta a rede elétrica da distribuidora (Ilhamento).

Os três tipos de autoprodutores seguem rígidas normas de atuação definidas pelas concessionárias de distribuição objetivando a manutenção dos níveis de tensão o mais constante possível (CIRED WORKING GROUP 04, 1999).

O “Ilhamento” ocorre quando uma parte da rede de distribuição torna-se eletricamente isolada da fonte de energia principal (subestação), mas continua energizada por geradores distribuídos conectados no subsistema isolado (JENKINS *et al.,* 2002). Ao se projetar uma subestação de energia que contemplará a transferência de energia entre distribuidora e geração própria é fundamental que sejam destacados dois pontos: 1) Um sistema de proteção contra potência reversa; 2) o correto dimensionamento do sistema de cogeração para que o mesmo tenha a capacidade de sustentar as cargas da indústria (VASCONCELOS, 2006).

O corte inicial inteligente de cargas (kW), em resposta a um evento específico, garante a não rejeição de cargas pelo sistema de geração de energia. Porém, como o processo produtivo é dinâmico, o consumo também passa a ser flutuante e a escolha inicial de uma combinação de cargas pode, em algum momento, não ser a mais adequada. Com isso uma rede de sensores que captam e mostra todo sistema produtivo em tempo real é capaz de fornecer o perfil instantâneo de consumo e um sistema supervisório pode fazer a adequação das cargas quando necessário.

Para que o sistema atue em tempo real é proposta uma rede de sensores sem fio, que têm como função primordial a coleta de dados e a atuação no sistema de forma rápida e eficiente. A escolha do protocolo de comunicação definirá a flexibilidade ou não da rede de sensores. Este projeto utiliza o Radiuino como protocolo de comunicação, que é uma plataforma livre para criação de rede de sensores sem fio (ZHENG e JAMALIPOUR, 2009). A comunidade científica envolvida no desenvolvimento de *hardware, firmware* e *software* tem por objetivo criar aplicações de fácil utilização para construção de rede de sensores sem fio de forma amigável. A meta é permitir que pessoas, mesmo sem grande experiência em programação, consigam montar sua solução em formulação de rede de sensores.

O uso da plataforma está em aplicações das mais diversas possíveis, desde controle de irrigação em jardins, e controle de dispositivos em residência (Hugh e Jonathan, 2009), até treinamento de rede de sensores e desenvolvimento de novos protocolos de Controle de Acesso ao Meio (MAC) e roteamento (FOROUZAN, 2006).

No caso deste projeto, a empresa usada como modelo possui um sistema de cogeração que já não atende mais o suprimento de energia da indústria. Isto devido ao aumento sistemático da produção, inclusão de novos equipamentos e ampliações da empresa. Desta forma, a empresa deve adotar o corte de cargas e consequente redução da produção nos horários de ponta, para não levar o sistema elétrico da indústria ao colapso. O corte de carga deve acontecer de maneira automática e rápida e isso só é possível com o uso de um sistema de controle confiável, sendo a manutenção do sistema elétrico desta indústria o motivo fundamental do uso de um sistema de controle.

O sistema de gerenciamento deve levar em conta a estabilidade do sistema elétrico, o que demanda rapidez no corte de cargas mínimo. Além disso o corte de cargas deve acontecer de modo a interferir o mínimo possível no sistema produtivo. Um sistema efetivo de gerenciamento de cargas industriais deve fornecer um método que aumente a sobrevivência tanto do sistema elétrico de potência quanto do processo industrial que está sendo alimentado (ALLEN e LEE, 2005).

Uma rede de sensores/atuadores, cujo objetivo é a atuação rápida e precisa no

controle de máquinas elétricas é uma ferramenta importante quando associada a um processo decisório eficiente e rápido. Os algoritmos genéticos (AG) têm sido a ferramenta capaz de proporcionar o corte inteligente de cargas, ou escolher a melhor combinação de cargas a permanecerem ligadas. Em Costa *et al.*, (2012) o AG estabelece a melhor combinação de cargas que deve permanecer em funcionamento, quando o sistema tiver uma limitação de energia. Tudo isso aplicado a uma planta real de um sistema industrial.

Este trabalho consiste em fornecer a melhor combinação de cargas que deve permanecer ligadas no momento em que o sistema de cogeração for acionado, programado ou não, de maneira automática. Uma rede de sensores fornecerá, em tempo real, as condições do sistema produtivo. Estas informações são avaliadas por um algoritmo genético que toma uma decisão da melhor combinação de cargas. Os resultados formarão um banco de dados, que um sistema supervisório acessará num momento programado ou quando o sistema de energia solicitar. As mudanças na produção passarão por pequenos ajustes definidos pelo sistema supervisório, permitindo que o operador modifique a combinação de cargas inicialmente proposta pelo AG.

1.2 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

O Capítulo 2 aborda o conceito da *Internet* das coisas (IoT), conceito básico de uma rede de sensores sem fio e as ferramentas utilizadas neste trabalho. A planta industrial e a importância do corte inteligente e automático de cargas para manutenção do equilíbrio elétrico da empresa são apresentadas no capítulo 3.

No Capítulo 4 são feitas as implementações do corte de cargas usando um sistema supervisório, ScadaBR® e o MatLab® (Algoritmo Genético apresentado no trabalho de Costa *et al*., 2012). Neste capítulo, são descritos também os testes de confiabilidade da rede de sensores sem fio quando submetidas ao efeito da radiação de baixa frequência originárias das tensões elétricas de subestações industriais.

O Capítulo 5 e 6, respectivamente, contêm os resultados e as principais considerações a respeito dos estudos realizados e proposta para trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2

TÉCNICAS COMPUTACIONAIS PARA USO EM SISTEMAS DE CONTROLE EMBARCADOS E SEM FIO PARA APLICAÇÕES INDUSTRIAIS

2.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

O conceito de Qualidade de Energia está relacionado a um conjunto de alterações que podem ocorrer no sistema elétrico. Uma boa definição para o problema de qualidade de energia é: "Qualquer problema de energia manifestado na tensão, corrente ou nas variações de frequência que resulte em falha ou má operação de equipamentos de consumidores". Tais alterações podem ocorrer em várias partes do sistema de energia, seja nas instalações de consumidores ou no sistema supridor da concessionária.

Estes problemas vem se agravando rapidamente em todo o mundo por diversas razões, das quais destacamos duas:

- instalação cada vez maior de cargas não-lineares. O crescente interesse pela racionalização e conservação da energia elétrica tem aumentado o uso de equipamentos que, em muitos casos, aumentam os níveis de distorções harmônicas e podem levar o sistema a condições de ressonância.

- maior sensibilidade dos equipamentos instalados aos efeitos dos fenômenos (distúrbios) de qualidade de energia.

Em alguns ramos de atividade, como as indústrias têxtil, siderúrgica e petroquímica, os impactos econômicos da qualidade da energia são enormes. Nestes setores, uma interrupção elétrica de até 1 minuto pode ocasionar prejuízos de até US$ 500 mil. Diante deste potencial de prejuízos possíveis, fica evidente a importância de uma análise e diagnóstico da qualidade da energia elétrica, no intuito de determinar as causas e as consequências dos distúrbios no sistema, além de apresentar medidas técnica e economicamente viáveis para solucionar o problema.

Nas indústrias, a gestão de energia deve ser vista como um fator de produção tão importante quanto o trabalho, o capital e as matérias-primas. O monitoramento das cargas elétricas, além de garantir uma melhor qualidade de energia, melhora o desempenho produtivo e consequente lucro da indústria (BROLIN, 2010).

A aplicação de ferramentas que permitam a coleta de informações dos processos produtivos e dos equipamentos envolvidos neste processo. Técnicas computacionais capazes de dar suporte à tomada de decisão e sistemas que proporcionem uma visão geral e simples do processo produtivo completo. Estas tecnologias juntas implicam em uma indústria eficiente energeticamente e por consequência um nível de qualidade de energia melhor.

2.2 REDES DE COMPUTADORES

O entendimento de rede de computadores ajudará o entendimento da estrutura da rede de sensores sem fio usada neste trabalho. Redes de computadores podem ser definidas como um conjunto de computadores autônomos interconectados por alguma tecnologia e compartilhando recursos (KUROSE e ROSS, 2002). As redes de computadores são caracterizadas em tipos de redes, topologias, arquiteturas de rede, protocolos, e a necessidade da qualidade do serviço.

2.2.1 TIPOS DE REDES

Para classificar as redes de computadores, não existe uma taxonomia, mas duas características se destacam das demais: a tecnologia de transmissão e a escala.

Generalizando, há dois tipos de tecnologia de transmissão: Redes de difusão e redes ponto a ponto.

A primeira tem apenas um canal de comunicação, compartilhado por todas as máquinas. As mensagens curtas, que em determinados contextos são chamadas de pacotes, enviadas por uma das máquinas são recebidas por todas as outras. Um campo de endereço dentro do pacote especifica seu destinatário. Quando recebe o pacote, a máquina analisa o campo do endereço. Caso o pacote tiver sido endereçado à própria máquina, ela o processará; caso contrário, o pacote será ignorado.

Existe também a possibilidade de endereçamento de um pacote a todos os destinos por meio de um código especial contido no campo do endereço. Esse modo de operação é chamado de difusão (*broadcasting*). Alguns sistemas de difusão suportam transmissão para um subconjunto de máquinas, conhecido como multidifusão (*multicasting*).

Por outro lado, as redes ponto a ponto consistem em muitas conexões entre pares individuais de máquinas. Para ir de origem ao destino, talvez um pacote desse tipo de rede tenha que visitar uma ou mais máquinas intermediárias. Em geral é possível ter diferentes rotas com diferentes tamanhos. Nesses casos os algoritmos de roteamento desempenham um importante papel nas redes ponto a ponto (TANENBAUM, 2003).

As redes de computadores podem ser classificadas como (DANTAS, 2002):

a) Redes Locais

As redes locais são chamadas de LAN's (Local Área Networks) e apresentam a facilidade de comunicação em alta velocidade entre processadores, periféricos, terminais e dispositivos de comunicação contidas em um prédio, ou em um campus.

b) Redes Metropolitanas

As redes metropolitanas (MAN's) podem ser entendidas como aquelas que provêm a interligação das redes locais em uma área metropolitana de uma determinada região. Elas ainda podem oferecer serviços, tais como a interligação

de centrais telefônicas, suporte à facilidade de vídeo conferência e transmissão de sinais de televisão, dados e voz.

c) Redes Geograficamente Distribuídas

Uma rede é chamada geograficamente distribuída (WAN) quando as distâncias envolvidas na interligação dos computadores é superior a uma região metropolitana, tão grande quanto a distância entre continentes. Em uma WAN, existe o roteamento dos datagramas ao longo de várias redes diferentes. Geralmente, elas têm uma taxa de transmissão menor e uma taxa de ocorrência de erros maior quando comparadas às LAN's.

Para efetuar a interligação das redes dispersas geograficamente, as WAN's, empregam dispositivos para efetuar o roteamento dos datagramas e a ligação à rede de comunicação.

d) Redes Sem Fio

Os ambientes de redes sem fio são configurações interessantes para agregar valor às redes locais das corporações. O diferencial é o custo reduzido da sua infraestrutura para distâncias superiores a algumas dezenas de metros e o suporte às aplicações móveis. Além disso, oferecem ganhos para os processos envolvidos na utilização desta tecnologia, tais como a eficiência, a precisão e o baixo custo da solução quando comparado com uma rede local guiada.

As redes sem fio têm muitos usos, dentre os quais destaca-se o escritório portátil. Quando as pessoas viajam, pode ser que queiram fazer uso de equipamento eletrônico portátil para enviar e receber chamadas telefônicas, fax, correio eletrônico, ler arquivos e estabelecer *login* com computadores remotos, estejam eles em terra, no mar ou no ar. São úteis também nos trabalhos de resgate em locais em que um desastre (como incêndio, enchente, terremoto) tenha destruído o sistema telefônico, além de serem de grande importância nas operações militares (STALLINGS, 2004).

2.2.2 TOPOLOGIAS

Numa rede de comunicação, a topologia é a maneira pela qual os enlaces de comunicação e dispositivos de comutação estão interligados, provendo efetivamente a transmissão do sinal entre nós da rede (DANTAS, 2002).

a) Estrela

A característica da topologia estrela é a ligação de todos os computadores a um equipamento central numa forma de ligação dupla ponto-a-ponto. Uma das ligações ponto-a-ponto serve para a transmissão no sentido da estação para o equipamento central; a outra provê a comunicação do equipamento central para a estação.

b) Barra

Esta topologia na maioria das vezes, utiliza a configuração multiponto, e é mais empregada nas redes locais. Como exemplos clássicos tem-se a *Ethernet*, *Fast-Ethernet* e *Gigabite-Ethernet*. Esta topologia é passiva e usa repetidores de sinal para a extensão da rede.

c) Anel

Na topologia anel, cada computador, obedecendo a um determinado sentido, é conectado a um computador vizinho. Por sua vez, o segundo computador é conectado a seu outro vizinho, e assim por diante formando um anel, até o último computador se interligar ao primeiro, fechando o anel.

2.2.3 ARQUITETURA DE REDE

a) Modelo de Referência OSI

Esse modelo é baseado em uma proposta desenvolvida pela ISSO (*International Standards Organization*) como um primeiro passo na direção da padronização internacional dos protocolos usados nas diversas camadas. O nome desse modelo é Modelo de Referência ISSO OSI (*Open Systems Interconnection*), pois ele trata da interconexão de sistemas abertos, isto é, sistemas que estão abertos à comunicação com outros sistemas. O modelo OSI possui sete camadas (TANEMBAUM, 2003):

– Camada Física;

– Camada de Enlace de Dados;

– Camada de Rede;

– Camada de Transporte;

– Camada de Sessão;

– Camada de Apresentação;

– Camada de Aplicação;

b) Modelo de Referência TCP/IP

O TCP/IP (Protocolo de Controle de Transmissão/Protocolo de *Internet*) surgiu com a criação de uma rede patrocinada pelo Departamento de Defesa do governo dos Estados Unidos, a ARPANET. Uma das tarefas essenciais dessa rede seria manter a comunicação, sob qualquer situação, mantendo as máquinas de origem e destino em funcionamento, mesmo que algumas máquinas ou linhas de transmissão intermediárias deixassem de operar repentinamente. O modelo TCP/IP possui quatro camadas (TANEMBAUM, 2003):

– Camada de Host/Rede: o modelo TCP/IP não especifica coisa alguma, exceto o fato de que o *host* tem de se conectar com a rede utilizando um protocolo, para que seja possível enviar pacotes IP. Esse protocolo não é definido e varia de *host* para *host* e de rede para rede.

– Camada Inter-rede: sua tarefa é permitir que os *hosts* injetem pacotes em qualquer rede e garantir que eles sejam transmitidos independentemente do destino. É possível, inclusive, que estes pacotes cheguem em ordem diferente daquela em que foram enviados, obrigando as camadas superiores a reorganiza-los, caso a entrega tenha que respeitar algum tipo de ordem. Essa camada define um formato de pacote oficial e um protocolo chamado de IP. Sua tarefa, portanto é entregar pacotes IP onde eles são necessários.

– Camada de Transporte: a finalidade dessa camada é permitir que as entidades pares (*pair entity*) dos *hosts* de origem e de destino mantenham uma conversação, exatamente como acontece na camada de transporte OSI. Dois protocolos fim a fim foram definidos aqui: o TCP e o UDP (Protocolo de Datagramas de Usuário).

– Camada de Aplicação: esta camada contém os protocolos de alto nível, dentre eles estão o protocolo de terminal virtual (TELNET), o protocolo de transferência de arquivos (FTP) e o protocolo de correio eletrônico (SMTP).

2.2.4 PROTOCOLOS

Protocolo é um conjunto de regras que controla o formato e o significado dos

quadros, pacotes ou mensagens trocadas pelas entidades pares contidas em uma camada. As entidades utilizam protocolos com a finalidade de implementar suas definições de serviço. Elas têm a liberdade de trocar seus protocolos, desde que não alterem o serviço visível para seus usuários (TANEMBAUM, 2003)

a) TCP

O Protocolo de Controle de transmissão (*Transmission Control Protocol)* é um protocolo orientado a conexão confiável que permite a entrega sem erros de um fluxo de *bytes* originados de uma determinada máquina em qualquer computador da rede. Ele fragmenta o fluxo de *bytes* de entrada em mensagens e passa cada uma delas para a camada inter-redes. No destino, ele remonta as mensagens recebidas no fluxo de saída. O TCP cuida também do controle de fluxo, impedindo que um transmissor rápido sobrecarregue um receptor lento com um volume de mensagens muito grande.

b) IP

O Protocolo de *Internet* (*Internet Protocol)* é o protocolo que mantém a *Internet* unida. Sua principal tarefa é transportar datagramas da origem para o destino qualquer que sejam as localizações das máquinas, podendo estas estarem na mesma rede ou em redes diferentes. Um datagrama IP é composto por um cabeçalho e uma parte de dados, tendo o cabeçalho uma parte de tamanho fixo de 20 *bytes* e uma parte opcional de tamanho variável. Atualmente o datagrama IP mais utilizado é o IPv4. No entanto, devido ao aumento significativo de *hosts* conectados à *Internet*, a tendência para um futuro breve é a utilização predominante do IPv6. Esta versão que mantém os bons recursos do IP, simplifica o cabeçalho, permitindo uma maior rapidez no processamento, aumenta significantemente o número de endereços e descarta ou reduz as características ruins da versão anterior (TANENBAUM, 2003).

c) UDP

O Protocolo de Datagramas de Usuário (*User Datagram Protocol)* é um protocolo sem conexão confiável para aplicações que não necessitam de controle de fluxo, nem da manutenção da sequência das mensagens enviadas. Ele é amplamente usado em aplicações em que a entrega imediata é mais importante do que a entrega precisa, como a transmissão de voz ou vídeo.

d) SIP

O Protocolo de Iniciação de Sessão (SIP) é um protocolo de aplicação baseado em texto, que utiliza o modelo “requisição-resposta”, similar ao Protocolo de Transferência de Hipertexto (HTTP - *Hypertext Transfer Protocol*), para iniciar sessões de comunicação interativa entre usuários; é um padrão da *Internet Engineering Task Force* (IETF).

e) RTP

O Protocolo de Transporte em Tempo Real (RTP - *Real Time Protocol*) é um protocolo de redes utilizado em aplicações de tempo real como, por exemplo, entrega de dados áudio ponto-a-ponto, como Voz sobre IP.

2.2.5 QUALIDADE DE SERVIÇO

A principal função da camada de transporte é melhorar a qualidade de serviço oferecida pela camada de rede. Se o serviço de rede for perfeito, o trabalho da camada de transporte será fácil. Mas, se o serviço de rede não for eficaz, a camada de transporte terá que servir de ponte para cobrir a distância entre o que os usuários de transporte desejam e o que a camada de rede oferece.

O serviço de transporte pode permitir ao usuário determinar os valores preferenciais, os valores aceitáveis e os valores mínimos para vários parâmetros de serviço no momento que uma conexão é estabelecida. Examinar esses parâmetros é mais uma função da camada de transporte e, dependendo do(s) tipo(s) de serviço de rede disponível(eis), determinar se é possível realizar o serviço solicitado. Poucas redes ou protocolos oferecem todos os parâmetros para qualidade de serviço; muitas apenas tentam reduzir a taxa de erros da melhor maneira possível. Os principais parâmetros para medida da qualidade de serviço são:

a) Retardo no estabelecimento da conexão;

b) Probabilidade de falha no estabelecimento da conexão;

c) *Throughput*: (esse parâmetro tem a função de calcular o número de *bytes* de dados dos usuários transmitidos por segundo durante um determinado intervalo de tempo);

d) Retardo de trânsito;

e) Taxa de erros residuais;

f) Proteção;

g) Prioridade;

h) Resiliência;

Para conseguir qualidade de serviço (QoS), é necessário se ter redes confiáveis. Assim, é vital a determinação das necessidades dos usuários e a geração dos parâmetros que assegurem o atendimento das aplicações dos mesmos.

A rede de sensores utilizada neste trabalho é uma rede local sem fio, topologia estrela e modelo de referência TCP/IP.

2.3 SISTEMAS EMBARCADOS

Um sistema embarcado (ou sistema embutido) é um sistema microprocessado no qual o microcomputador é completamente encapsulado ou dedicado ao dispositivo ou sistema que ele controla. Diferente de computadores de propósito geral, como o computador pessoal, um sistema embarcado realiza um conjunto de tarefas predefinidas, geralmente com requisitos específicos. Já que o sistema é dedicado a tarefas específicas, através de engenharia pode-se otimizar o projeto reduzindo tamanho, recursos computacionais e custo (OLIVEIRA e ANDRADE, 2008).

Sistemas embarcados são desenvolvidos para uma tarefa específica. Por questões como segurança e usabilidade, alguns inclusive possuem restrições para computação em tempo real. O *software* escrito para sistemas embarcados é muitas vezes chamado *firmware*, e armazenado em uma Memória Somente de Leitura (ROM) ou memória *Flash* ao invés de um disco rígido. Por vezes o sistema também é executado com recursos computacionais limitados: sem teclado, sem tela e com pouca memória.

Em geral os sistemas embarcados possuem uma capacidade de processamento reduzida em comparação com computadores *desktops*. Ao invés de utilizar microprocessadores, os desenvolvedores preferem utilizar microcontroladores, pois estes já possuem diversos periféricos integrados no mesmo *chip* (portas I/O,

memórias, temporizadores/contadores entre outros) (OLIVEIRA e ANDRADE, 2008).

Outra diferença é a variedade de arquiteturas disponíveis tais como ARM, MIPS, Coldfire/68k, PowerPC, x86, PIC, 8051, Atmel, Z80 e Z8. Isso contrasta com o mercado de computadores pessoais limitados a somente algumas arquiteturas e dificulta sua utilização, pois é fundamental conhecer as características específicas de cada modelo de microcontrolador para desenvolver o *software*.

2.4 *ZIGBEE* E RADIUINO

A *ZigBee Alliance*, que desenvolve o padrão ZigBee junto ao *Institute of Electrical and Eletronics Engineers* (IEEE), compõe uma rede de sensores em que a tecnologia é de baixo consumo e limitada. Entretanto, o que parece uma desvantagem a princípio, pode encontrar aplicação em várias áreas, uma vez que consiste em uma rede capaz de concentrar informação e realizar, por exemplo, medições remotas numa situação de *smart grid* com mobilidade (SMARTGRID NEWS, 2011).

Os dispositivos baseados na tecnologia *ZigBee* operam na faixa ISM (*Industrial Medical Scientific*) que não requer licença para funcionamento, incluindo as faixas de 2,4 GHz (Global), 915 MHz (América) e 868 MHz (Europa) e com taxas de transferência de dados de 250 kbps em 2,4 GHz, 40 kbps em 915 MHz e 20 kbps em 868 MHz. O padrão oferece, atualmente, interfaces com velocidades de conexão compreendidas entre 10 kbps e 115 kbps e com um alcance de transmissão entre 10 m a 100 m, dependendo diretamente da potência dos equipamentos e de características ambientais (obstáculos físicos, interferência eletromagnética, etc) (DESMONTA&CIA ZIGBEE, 2010).

Quanto ao problema de alimentação dos dispositivos, os módulos de controle dotados com esta nova tecnologia podem ser alimentados até mesmo por baterias (pilhas) comuns, sendo que sua vida útil está relacionada diretamente com a capacidade da bateria e a aplicação a que se destina. Nesse aspecto, o protocolo ZigBee foi projetado para suportar aplicações com o mínimo de consumo (DESMONTA&CIA ZIGBEE, 2010).

A plataforma Arduino é uma plataforma *open source* e permite que se construa seu próprio computador sem a necessidade de se aprender muita teoria sobre eletrônica e linguagens de programação, e mesmo sem a necessidade de um estudo avançado de microcontroladores

"**Arduino”**, por vezes traduzida ao português como *Arduíno*, é uma plataforma de *hardware* livre projetada com um microcontrolador Atmel AVR de placa única, com suporte de entrada/saída embutido e uma linguagem de programação padrão, na qual tem origem em *Wiring*, e é essencialmente C/C++.

O objetivo de sua utilização em projeto de sistemas “*wireless”* é criar ferramentas que são acessíveis, com baixo custo, flexíveis e fáceis de serem usados por profissionais e amadores. Pode ser usado para o desenvolvimento de independentes objetos interativos, ou ainda para ser conectado a um computador hospedeiro. Uma típica placa Arduino é composta por um controlador, algumas linhas de entrada e saídas digitais e analógicas, além de uma interface serial ou USB, para interligar-se ao hospedeiro, que é usado para programá-la e interagir com ela em tempo real.

A plataforma não possui qualquer recurso de rede, porém é comum combinar um ou mais Arduinos deste modo, usando extensões apropriadas chamadas de *shield*. A interface do hospedeiro é simples, podendo ser escrita em várias linguagens. A mais popular é a *Processing*, mas outras que podem comunicar-se com a conexão serial são: *Max/MSP*, *Pure Data*, *SuperCollider*, *ActionScript* e *Java*. Em 2010 foi realizado um documentário sobre a plataforma chamado *Arduino: The Documentary”.*

O Arduino abstrai a pinagem do microcontrolador, identificando os pinos pela sua função. O protocolo TCP/IP é o protocolo mais usado na *internet*. A soma desta duas tecnologias dá origem ao Radiuino.

2.4.1 PROTOCOLO 802.15.4

O protocolo 802.15.4 é um protocolo desenvolvido pelo IEEE e refere-se à comunicação sem fio. O objetivo geral deste padrão era de se ter uma padronização para uma tecnologia que apresentasse baixa transmissão de dados,

entretanto possuindo fácil comunicação e baixo consumo de energia elétrica (KARL e WILLIG, 2007).

A tabela 2.1 apresenta um comparativo de algumas tecnologias de transmissão sem fio.

Tabela 2.1.Tecnologia de transmissão sem fio (KOCHHANN, 2012)

Tecnologia	***ZigBee* e 802.15.4**	**GSM/GRPS CDMA**	**802.11**	***Bluetooth***
Aplicação principal	Monitorização de processos e controle	Transmissão de dados e voz em grandes áreas	*Internet* de alta velocidade	Conectividade entre dispositivos
Autonomia	Anos	1 semana	1 semana	Semanas
Largura de Banda	250 kbps	Até 128 kbps	11 Mbps	720 kbps
Alcance típico	Mais de 100 metros	Alguns km	De 50 a 100 metros	De 10 a 100 metros
Vantagens	Baixo consumo de energia e custo reduzido	Infraestruturas já existentes	Altas velocidades	Versatilidade na ligação entre dispositivos

2.5 SISTEMA SUPERVISÓRIO

Os sistemas supervisórios conhecidos como SCADA (*Supervisory Control and Data Aquisition*), permitem que as informações de um processo produtivo ou informações físicas do ambiente possam ser monitoradas e rastreadas. Quanto mais dados e mais conhecimento adquiridos, maior a capacidade de decidir. Este é o conceito da *Internet* das Coisas (IoT).

Os primeiros sistemas supervisórios eram basicamente telemétricos, que simplesmente permitiam informar os estados produtivos através de lâmpadas e indicadores, sem nenhuma interface homem-máquina.

Os atuais sistemas utilizam tecnologias de computação e rede de sensores para automatizar a monitoração e controle dos processos industriais, coletando dados com maior eficiência e vencendo os obstáculos geográficos. O ambiente amigável (interface homem-máquina) permite mais rapidez da visualização do processo, pois mostra todo o processo de uma maneira gráfica.

Para permitir isso, os sistemas SCADA identificam os *tags*, que são todas as variáveis numéricas ou alfanuméricas envolvidas na aplicação, podendo executar funções computacionais ou representar pontos de entrada/saída de dados do processo a ser controlado. Neste caso estes *tags* representam as grandezas físicas do ambiente monitorado (ex.: temperatura, pressão, tempo, corrente elétrica, etc.). É com base nos valores das *tags* que os dados coletados são apresentados ao usuário.

Os sistemas SCADA podem, em função dos valores das *tags* ou faixa de valores pré determinadas, verificar condições de alarmes, mudança de cores, atuação no sistemas, gravação em bancos de dados, envio de informações via *internet* ou telefone celular, dentre outras ações pré-definidas.

Os componentes físicos de um sistema de supervisão podem ser resumidos de forma simplificada em: sensores e atuadores, rede de comunicação, estações remotas (aquisição/controle) e de monitoração central (sistema computacional SCADA).

Os sensores são dispositivos conectados aos equipamentos controlados e monitorados pelos sistemas SCADA, que convertem parâmetros físicos tais como velocidade, nível de água e temperatura, para sinais analógicos e digitais legíveis pela estação remota. Os atuadores são utilizados para atuar sobre o sistema, ligando e desligando determinados equipamentos (DARGIE e POELLABAUER, 2010).

O processo de controle e aquisição de dados se inicia nas estações remotas. No caso desse projeto é usado um módulo contendo um rádio modelo BE900, de montagem nacional, um microcontrolador Atmega328 da Atmel, e o transceptor CC1101 da Texas Instruments para leitura dos valores atuais dos dispositivos a ele associados, e seu respectivo controle. A vantagem de se usar os atuadores na plataforma Radiuno é a facilidade de configuração dos mesmos e a imensa compatibilidade com o ScadaBR®.

A rede de comunicação é o meio pelo qual as informações fluem dos sensores/atuadores para o sistema SCADA. Considerando os requisitos do sistema e a distância a cobrir, pode ser implementada através de cabos Ethernet, fibras ópticas, linhas *dial-up*, linhas dedicadas, rádio modems, etc. A comunicação

é feita via protocolo TCP/IP, usado na plataforma Radiuino concomitante com antenas adequadas para vencer as distâncias elevadas da planta industrial (BRANQUINHO, 2011).

As estações de monitoração central são as unidades principais dos sistemas SCADA. São responsáveis por recolher a informação gerada pelas estações remotas e agir em conformidade com os eventos detectados, podendo ser centralizadas num único computador ou distribuídas por uma rede de computadores. A escolha do ScadaBR® se deu pelo fato de ser uma plataforma *open source* e já possuir a compatibilidade com a plataforma Radiuino.

2.6 ALGORITMO GENÉTICO

O algoritmo genético (AG) se inspira nos processos subjacentes à evolução: moldar uma população de indivíduos através da sobrevivência de seus membros mais ajustados. O poder da seleção em uma população de indivíduos diferentes tem sido demostrado pela emergência de espécies na evolução natural, bem como através dos processos sociais subjacentes às mudanças culturais (LINDEN, 2012).

Os AG’s usam modelos computacionais dos processos naturais de evolução como uma ferramenta para resolver problemas. Simulam a evolução das espécies através de seleção, mutação e reprodução, processos estes que dependem do "desempenho" dos indivíduos desta espécie dentro do "ambiente". Neste caso existe uma solução (espécie) diferente para cada problema (ambiente) específico e as soluções (espécies) se adaptam a ambientes que mudam com o tempo (LUGER, 2004).

Os AG's são técnicas de busca baseadas numa metáfora do processo biológico de evolução natural. Estes usam técnicas heurísticas de otimização global, que se opõem aos métodos que usam estimativas de gradiente, que são técnicas de otimização local.

Sua estrutura é baseada em:

- Função de Avaliação: maneira utilizada pelo AG para determinar a qualidade de um indivíduo como solução do problema em questão. Calcula

- um valor numérico que reflete quão bem os parâmetros representados nos cromossomos resolvem o problema.
- Seleção de Progenitores: progenitores mais capazes devem gerar mais descendentes que os menos capazes. Progenitores menos aptos também podem gerar descendentes para manter a diversidade genética da população.
- Cruzamento ou *Crossover*: depois de selecionados os progenitores pela função de avaliação, determina-se um ponto de corte.
- Ponto de corte: posição entre dois genes de um cromossomo. Os progenitores são seccionados no ponto de corte e trocam o material genético, gerando dois descendentes.
- Mutação: ocorre com determinada probabilidade. Para cada gene gerado pelo processo de *crossover*, sorteia-se um número entre 0 e 1; se este número for menor que a probabilidade de mutação, então o gene tem seu valor alterado de forma aleatória.

Assim como as redes neurais, os AG's são baseados em uma metáfora biológica: eles veem o aprendizado como uma competição numa população de indivíduos, candidatos para o problema. Uma função de "custo" ou "aptidão" avalia cada solução para decidir se ela contribuirá para a próxima geração de soluções. Então, através de operações análogas à transferência de genes na reprodução sexual e assexuada, o algoritmo cria uma nova população de soluções candidatas (KOZA, 1992).

Os algoritmos genéticos podem trabalhar com descrições de entrada constituídas por cadeias de *bits* com tamanho fixo ou variado, dependendo da aplicação.

Programação evolutiva é um algoritmo genético probabilístico iterativo que mantém a cada iteração *t*, uma população de indivíduos (cromossomos) *P(t)* (equação 2.1):

$$P(t) = (p_1^t, p_2^t, \dots \dots p_n^t) \qquad (2.1)$$

Matematicamente cada indivíduo p^t representa uma solução do problema associado. A cada iteração *t* existe um mecanismo que permite a renovação da

população obtendo *P(t)* a partir da população anterior, *P(t − 1).* De forma geral o algoritmo genético pode ser apresentado pelo pseudocódigo:

Procedimento Algoritmo Genético;

Início
Ajuste o tempo t:=0;
Inicialize a população P(t);
Enquanto a condição de parada não for satisfeita faça
Início
Avalie a aptidão de cada membro da população P(t);
Selecione membros da população P(t) com base na aptidão;
Produza os descendentes destes pares usando operadores genéticos;
Substitua, com base na aptidão, candidatos de P(t), por estes descendentes;
Ajuste o tempo t:=t+1
Fim
Fim.

Este algoritmo articula a estrutura básica da aprendizagem genética e algumas implementações específicas do algoritmo particularizam esta estrutura de diferentes maneiras.

Embora existam representações mais complexas, no trabalho de Costa *et al.*, (2012) utilizou-se a representação de cadeias simples de *bits* para representar soluções do problema. O AG inicializa *P(0)* com uma população de padrões candidatos. Geralmente, as populações iniciais são selecionadas aleatoriamente. A avaliação de soluções candidatas é realizada pela função custo ou função "aptidão", que retorna uma medida da aptidão do candidato no tempo *t*. Uma medida comum de aptidão de um candidato é testá-lo sobre um conjunto de amostras de treinamento e retornar a porcentagem de classificações corretas. Cada solução candidata recebe um valor. Cada indivíduo da população resultante pode então sofrer alguma mutação, que é uma alteração aleatória no cromossomo. Esta mutação acontece até o critério de parada ser atingido. O critério de parada usado por Costa *et al.*, (2012) foi o número de gerações ou iterações estipuladas.

2.6.1 REPRESENTAÇÃO DAS SOLUÇÕES VIÁVEIS

Existem várias formas de representações possíveis para os cromossomos, como por exemplo, binária, inteira e real. A essa representação se dá o nome de código

genótipo do algoritmo genético. De acordo com a classe de problemas que se deseja resolver pode-se usar uma destas formas.

Normalmente, a solução de um problema está associada a um cromossomo *p* representado na forma de um vetor com *n* posições:

$$P = (\, p_1, p_2, p_3, \ldots, p_n \,) \qquad (2.2)$$

onde cada componente p_n representa um gene, ou uma variável da solução.

2.6.2 FUNÇÃO CUSTO

A função de custo tem o papel de avaliar o nível de aptidão de cada cromossomo gerado pelo algoritmo genético. Em problemas de otimização, ela pode simplesmente representar a função objetivo do problema.

Em virtude dos requisitos de muitos problemas serem conflitantes, ou seja, na medida em que um aumenta o outro diminui, a função de custo é construída para encontrar o ponto ótimo de um sistema. No caso do problema apresentado neste trabalho, temos que encontrar o maior número de cargas ligadas. Existe, no entanto, a limitação de consumo de energia. Quanto maior o número de cargas ligadas maior o consumo, tornando tais objetivos conflitantes.

2.6.3 POPULAÇÃO INICIAL

Cada um dos indivíduos da população representa uma possível solução para o problema, isto é, um ponto no espaço de soluções.

O procedimento para gerar uma população inicial para um AG é muito simples para a maioria dos problemas. Normalmente utiliza-se desde procedimentos aleatórios até algoritmos heurísticos para este fim. Uma vez gerada, a população é avaliada pela função de custo, a fim de medir a sua qualidade.

2.6.4 OPERADORES GENÉTICOS

A função dos operadores genéticos é definir regras para uma renovação eficaz de uma população. Esses procedimentos ocorrem de forma iterativa tentando melhorar a qualidade genética de cada indivíduo (MALAQUIAS, 2006).

O desenvolvimento de operadores genéticos está muito ligado à representação de uma solução do problema original na forma de um cromossomo. Isso significa que cada solução *s* deve ser codificada na forma de um cromossomo *p* e após as

atualizações efetuadas pelo operador genético em *p*, o novo cromossomo p_{n+1} será decodificado para obter a nova solução s_{n+1} do problema associado. Dois tipos de operadores genéticos merecem destaque: cruzamento (*crossover*) e mutação.

2.6.5 SELEÇÃO

Um dos métodos de seleção natural mais comum é denominado de *Stochastic Universal Sampling* (SUS) (LUGER, 2004), que pode ser entendido da seguinte forma: considere um círculo dividido em *n* regiões (tamanho da população) onde a área de cada região é proporcional à aptidão do indivíduo. Coloca-se sobre este círculo uma roleta com *p* cursores igualmente espaçados, onde *p* representa o número de indivíduos a serem selecionados. Então, depois de girar a roleta, a posição dos cursores indica os indivíduos selecionados. Evidentemente, os indivíduos cujas regiões possuem maior área terão maior probabilidade de serem selecionados. Em consequência disto, a seleção de indivíduos pode conter várias cópias de um mesmo indivíduo enquanto outros podem desaparecer. A Figura 2.1 mostra o método SUS de seleção:

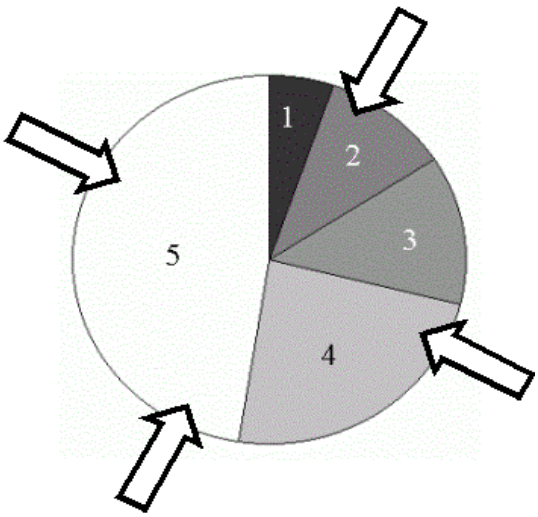

Figura 2.1: Método de Seleção SUS (LUGER, 2004).

2.6.6 CRUZAMENTO

A primeira etapa na formação de uma nova população é a geração de novos indivíduos a partir de indivíduos já existentes na população atual. Esta operação é

chamada de cruzamento. Ela é realizada pela escolha de alguns indivíduos, os progenitores, que produzirão dois ou mais indivíduos, os descendentes, que apresentarão características herdadas dos progenitores. Os descendentes produzidos formarão a nova população.

Por meio do cruzamento espera-se aumentar a qualidade média da população. Desta forma o operador de cruzamento deve ser escolhido de tal forma que o AG resulte em uma solução próxima da solução ótima em um número razoável de iterações.

2.6.6.1 Operadores de Cruzamento

Os operadores do tipo cruzamento são baseados em mecanismos determinísticos, adicionando uma decisão probabilística somente quando for gerada uma solução inviável. A ideia do operador cruzamento clássico é efetuar cruzamentos entre dois ou mais cromossomos progenitores para obter cromossomos descendentes (*offsprings*), que são adicionados à população.

A lista dos indivíduos selecionados é embaralhada aleatoriamente, criando desta forma, uma segunda lista, chamada lista de parceiros. Cada indivíduo selecionado é então cruzado com o indivíduo que ocupa a mesma posição na lista de parceiros.

2.6.7 MUTAÇÃO

O AG pode convergir muito rapidamente para uma região específica do espaço de busca, caso nenhum mecanismo seja implementado para que evite isto. Existe uma tendência de convergência rápida para uma região de mínimos locais ao invés de mínimos globais. Para evitar este problema, impõe-se uma rotina para explorar outras áreas do espaço de busca. Isto se dá por meio de alterações nos genes através da mutação. A mutação é um outro operador genético importante. A mutação toma um único candidato e troca aleatoriamente alguns de seus aspectos. A mutação pode, por exemplo, selecionar aleatoriamente um *bit* e trocá-lo, mudando de 1 para 0 ou de 0 para 1.

Para todo indivíduo recentemente criado na população resultante, existe uma probabilidade do indivíduo sofrer uma mutação, isto é, ele irá mudar suas características hereditárias de forma aleatória.

2.6.7.1 Operadores de Mutação

Os operadores de mutação introduzem uma alteração aleatória no indivíduo. No caso da representação binária é suficiente alterar aleatoriamente alguns *bits* da sequência. A Figura 2.2 mostra um exemplo de mutação em um cromossomo *p*.

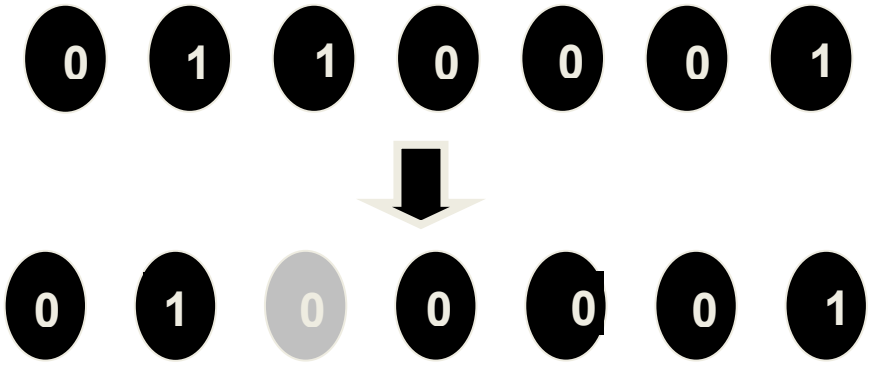

Figura 2.2: Exemplo de mutação (LUGER, 2004)

2.6.8 ELITISMO

Ao se criar uma nova população por cruzamento e mutação, tem-se uma grande chance de perder os melhores indivíduos. Elitismo é um método para preservar os melhores indivíduos de uma geração na geração seguinte, evitando que a nova população se torne pior do que a atual. O elitismo pode simplesmente substituir os piores indivíduos na nova população pelos melhores indivíduos da população atual.

2.7 CONCLUSÃO

Foram apresentados os conceitos básicos de rede de computadores, os tipos mais comuns, topologias e arquiteturas básicas das redes. O entendimento das camadas do protocolo TCP/IP e suas funções são fundamentais para montagem da rede de sensores e consequente programação da plataforma Radiuino. O desenvolvimento do *firmware* do Radiuino teve como base a pilha TCP/IP com cinco camadas e o desenvolvimento das aplicações deve respeitar esta arquitetura de pilha de protocolos.

Como a rede de sensores projetada irá atuar em um ambiente industrial, muito susceptível a ruídos e falhas é fundamental a realização de testes que atestem a

confiabilidade desta rede. Para isso, a medida dos quesitos que definem a qualidade do serviço permite a realização e análise de testes de confiabilidade.

Uma leitura sobre sistemas embarcados e as duas tecnologias mais usadas para rede de sensores justifica a escolha da plataforma Radiuino, mostrando as vantagens do uso desta plataforma.

O uso de técnicas de busca heurística é, muitas vezes, bastante eficiente na determinação de soluções para sistemas complexos multiobjetivos. Em Costa *et al.*, (2012) o algoritmo genético mostrou ser uma ferramenta muito eficiente na determinação da combinação ótima das cargas de funcionamento concomitante para o processo industrial, apresentando um desempenho superior comparado a outros processos de busca.

Com a finalidade de reduzir a quantidade de cargas a serem desligadas, técnicas de otimização podem ser aplicadas a uma função objetivo, que pode incluir, por exemplo: a dinâmica do sistema, montantes de corte disponíveis, limites operacionais, desvio da frequência nominal, dentre outros, para a determinação de uma solução para o problema da planta.

CAPÍTULO 3

REDE DE SENSORES SEM FIO - RSSF

3.1 INTRODUÇÃO

A IoT- *internet* das coisas é o caminho futuro no acesso à informação, uma vez que informações não são importantes apenas para as pessoas, mas também na forma de acionar as coisas. Segundo estudo da CISCO®, desde 2004 já existem mais dispositivos conectados à rede do que pessoas. A previsão é que em 2020, 50 bilhões de dispositivos e 7,6 bilhões de pessoas estarão conectados à *internet* (INTERNET OF THINGS, 2009).

A produção monitorada melhora a qualidade dos produtos, minimiza os custos de produção. Isto implica em uma melhoria da qualidade de vida, maior eficiência produtiva. Esta eficiência depende cada vez mais na capacidade de sensoriar, coletar, transmitir, armazenar e distribuir informações em massa. A IoT aumenta drasticamente a quantidade de dados em operação e quanto mais dados, ~~e~~ mais conhecimento e melhor será a capacidade de tomada de decisão. A IoT traz para as empresas aplicações inteligentes de negócios, análise em tempo real dos processos e consequente otimização dos custos e melhorias à população de modo geral (INTERNET OF THINGS, 2009).

A IoT é constituída essencialmente de computador, rede local, *internet*, protocolos, base de dados, comunicação e sensores. Geralmente uma rede de sensores sem fio (RSSF) (Figura 3.1) é usada para atender aplicações específicas e, portanto, vários conceitos diferentes devem ser tratados conforme esta aplicação. Trata-se então de uma rede altamente customizada e várias questões: propagação, c*ross layer* e consumo. Na essência, a IoT é uma rede de dados e a que utiliza uma pilha de protocolos.

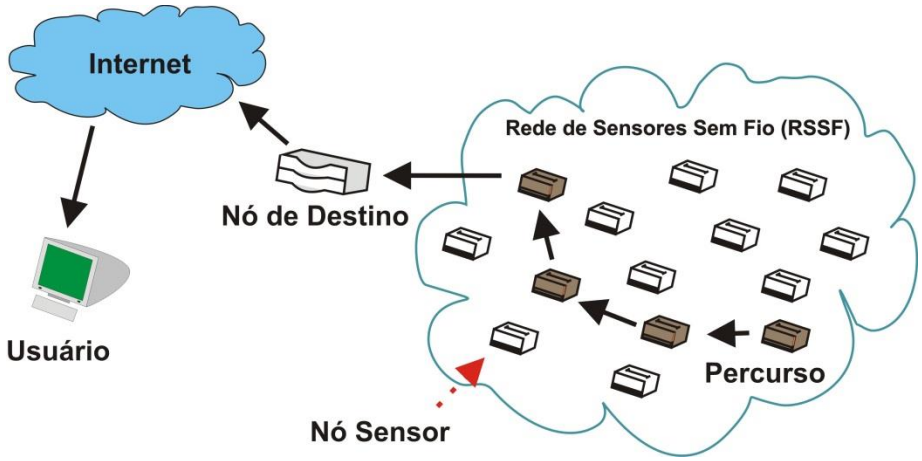

Figura 3.1: Arquitetura de uma RSSF (INTERNET OF THINGS, 2009).

Um protocolo é uma convenção que controla e possibilita uma conexão, comunicação, transferência de dados entre dois sistemas computacionais. De maneira simples, um protocolo por ser definido como “as regras que governam” a sintaxe, semântica e sincronização da comunicação. Os protocolos podem ser implementados pelo *hardware*, *software* ou por uma combinação dos dois. Na Figura 3.2 é possível verificar quais os protocolos existentes hoje para as redes sem fio.

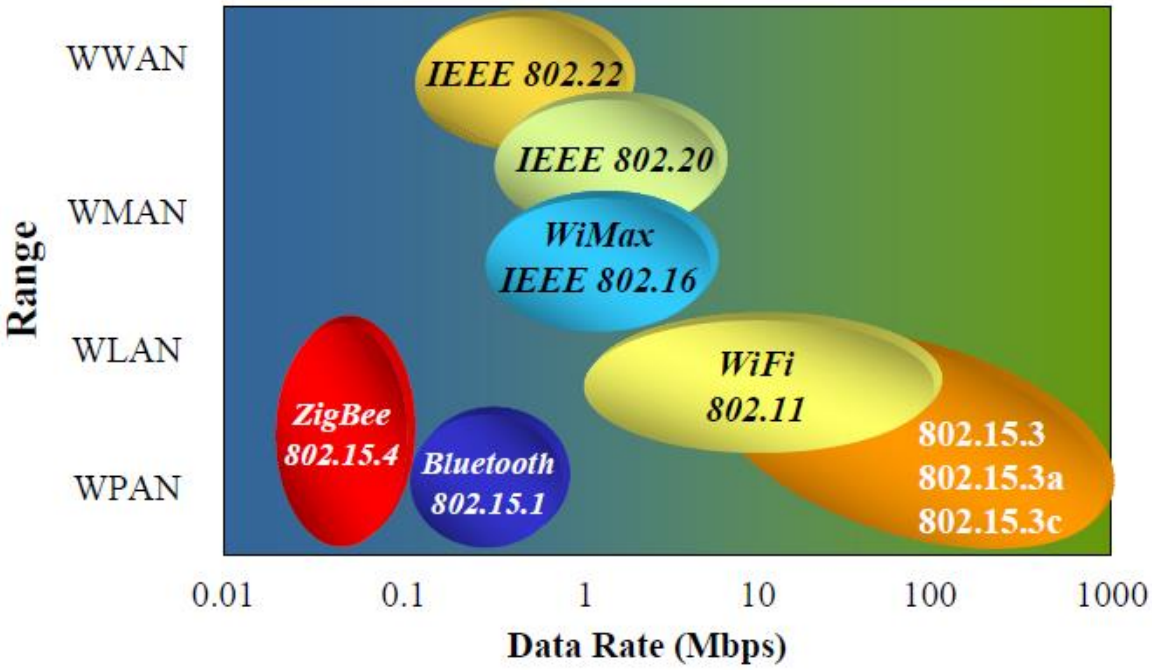

Figura 3.2: Protocolos para as redes sem fio (RAPAPPORT, 2009)

3.2 REDE DE SENSORES SEM FIO - RSSF

A RSSF está chegando no mercado com muita rapidez e se tornando uma área interessante e desafiadora. Uma rede de sensores sem fio é constituída por nós sensores que podem ser aleatoriamente e densamente distribuídos. Os sensores são pequenos componentes eletrônicos capazes de detectar vários tipos de informações do ambiente, incluindo a temperatura, luminosidade, umidade, radiação, presença ou natureza dos organismos biológicos, características geológicas, tipos específicos de dados de computador, etc. Os recentes avanços tornaram possível criar sensores pequenos, poderosos e eficientes. Pequenos, os nós sensores são capazes de coleta, processamento e comunicação da informação para outros nós e para o mundo exterior. Com base nas capacidades de manipulação de informação e tamanho compacto dos nós sensores, redes de sensores são muitas vezes referidas como “poeira inteligente” (HANDBOOK, 2005).

A restrição mais difícil no projeto de uma RSSF é o consumo mínimo de energia necessário para alimentar os circuitos e dispositivos nos sensores. Este problema é agravado se existirem atuadores nos nós sensores, que demandam substancialmente mais energia. Uma solução para este problema está na capacidade dos nós sensores de hibernarem, ou seja, alguns sensores possuem a capacidade de serem programados para ligar somente nos instantes desejados, permanecendo em estado de hibernação quando não solicitados, o que promove uma grande economia de bateria.

A escolha de uma RSSF está diretamente ligada ao protocolo de comunicação usado na rede. O primeiro passo é definir a faixa de frequência a ser utilizada pela RSSF. A Figura 3.3 mostra as faixas de frequências não licenciadas pela ANATEL (RAPAPPORT, 2009). As atenuações, confiabilidade, alcance e qualidade da RSSF está diretamente ligada à faixa de frequência utilizada na comunicação. A faixa de frequência de 2,4 GHz é muito usada nas conexões *WiFi* e *Bluetooth*. Como existe atualmente uma quantidade de equipamentos que utilizam esta faixa de frequência (*smartphones*, computadores, dentre outros), esta faixa pode ser

considerada mais susceptível à interferências. Outro fator importante é a atenuação do sinal que está ligado à frequência do mesmo.

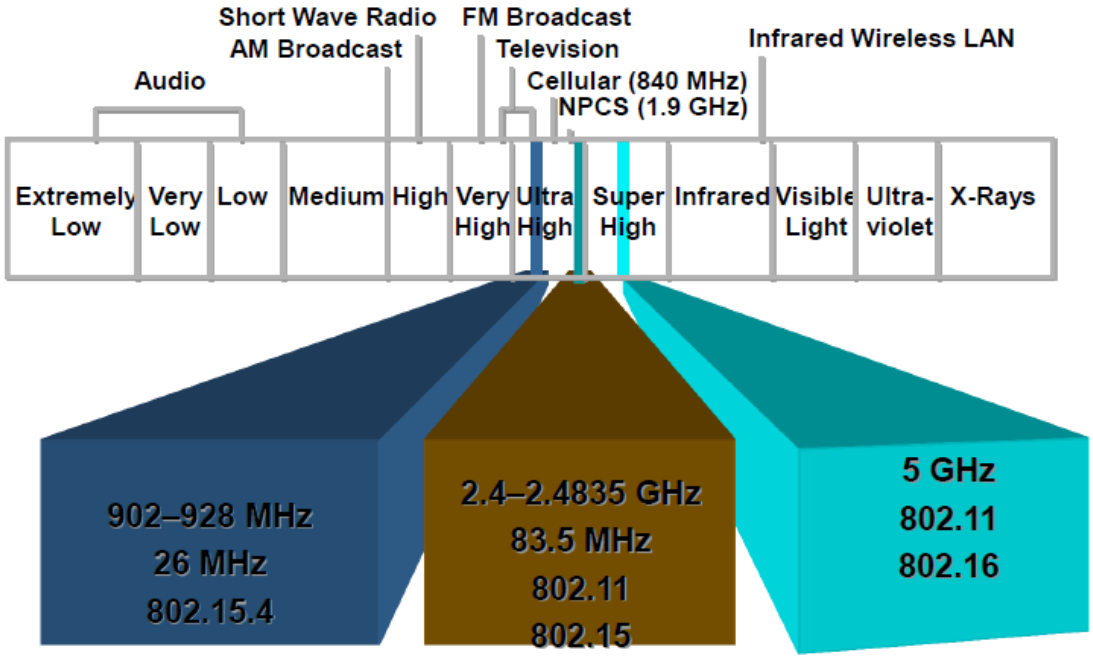

Figura 3.3: Faixas de frequências não licenciadas (RAPPAPORT, 2009)

Pela equação 3.1, usada para definir a atenuação de um sinal de rádio em função da frequência, e a distância, percebe-se que o uso de uma RSSF na faixa de 915 MHz torna-se mais adequado. Quanto menor a frequência utilizada, maior o comprimento de onda (λ) e consequentemente uma atenuação menor.

$$L_{EL}[dB] = 10 \times log\left(\frac{4\pi d}{\lambda}\right)^2 , \qquad (3.1)$$

onde λ é o comprimento de onda, d é a distância do enlace de comunicação e L_{EL} é a atenuação no espaço livre em dB.

3.3 PLATAFORMA RADIUINO

A pouca flexibilidade e complexidade dos protocolos de comunicação deixam as redes de sensores engessadas. Não é permitido alterar características de nenhuma camada da pilha de protocolos, obrigando o uso de programadores específicos para cada plataforma.

Em setembro de 1999, as RSSF's foram identificadas pela *Business Week* como uma das tecnologias mais impactantes para o século XXI. Além disso, em janeiro de 2003 o *MIT's Technology Review* (TECHNOLOGY REVIEW, 2003) afirmou que as RSSF's são uma das dez principais tecnologias emergentes. Entretanto, as espectativas projetadas pela CISCO® não foram concretizadas devido ao engessamento das redes de sensores. As RSSF's tiveram um crescimento de US$ 0.45 bilhões em 2011, e espera-se um crescimento de mais de US$ 2 bilhões em 2021.

O Padrão 802.15.4 usado pelas RSSF's obriga o desenvolvimento de *firmware* para atender às necessidades das aplicações. Várias soluções no mercado utilizam programadores próprios. A plataforma conhecida por Radiuino tem como proposta resolver este problema de flexibilidade. Radiuino é uma plataforma livre para criação de rede de sensores sem fio (ZHENG e JAMALIPOUR, 2009). A comunidade científica envolvida no desenvolvimento de *hardware, firmware* e *software* tem por objetivo criar aplicações de fácil utilização para construção de rede de sensores sem fio de forma amigável.

A plataforma Arduino quebra os paradigmas para uso de microcontroladores, devido a simplicidade, segundo a revista *IEEE Spectrum* de outubro de 2011 (IEEE SPECTRUM, 2011). É uma plataforma *open source* com *hardware* barato e *software* baseado na linguagem *Wiring* e IDE *Processing*. O sucesso do Arduino se deve ao fato de que o mesmo apresenta em seu *hardware* uma pinagem própria que abstrai a utilização da pinagem do microcontrolador. Os pinos são definidos pela sua função e não pelo seu número, criando uma compatibilidade entre os diversos microcontroladores (Figura 3.4). O *firmware* é limitado à placa do microcontrolador, e a comunicação entre os microcontroladores torna-se padrão.

Esta simplicidade resolve o problema de "engessamento" gerado pelo protocolo 802.15.4 e permite a criação de RSSF's dedicadas, e sem a necessidade de um programador exclusivo (MCROBERTS, 2010).

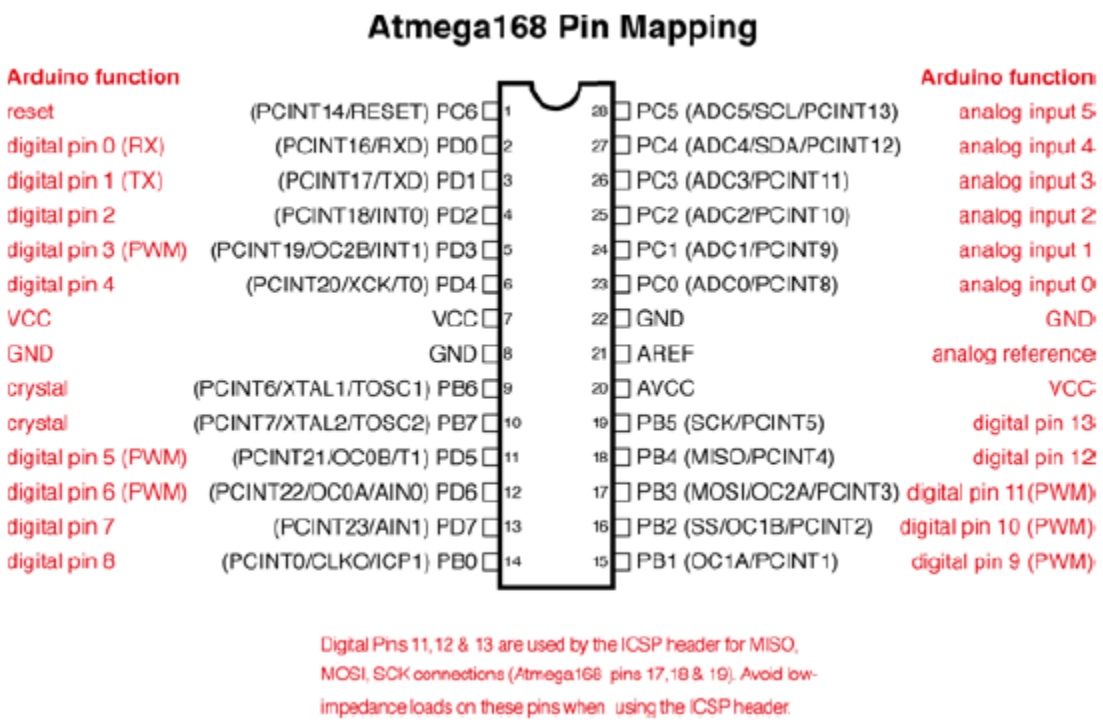

Figura 3.4: Pinagem do Arduino que abstrai o microcontrolador (OXER e BLEMINGS, 2009).

A plataforma de comunicação Radiuino é mostrada na Figura 3.5.

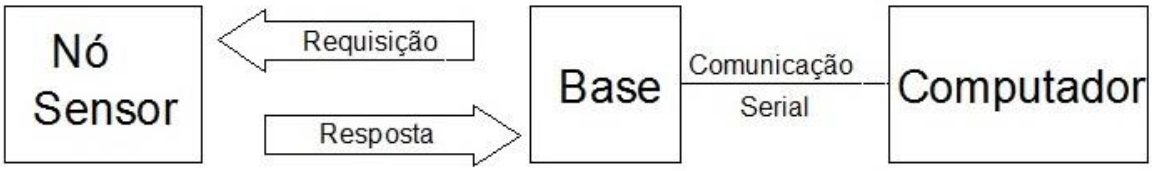

Figura 3.5: Plataforma de comunicação Radiuino.

No computador é instalado um *software* para estabelecer a comunicação com os sensores. O computador comunica, através de uma comunicação serial, com a base, que comunica com o sensor sem fio.

O desenvolvimento do *firmware* teve como base a pilha de protocolo TCP/IP com cinco camadas, conforme Figura 3.6.

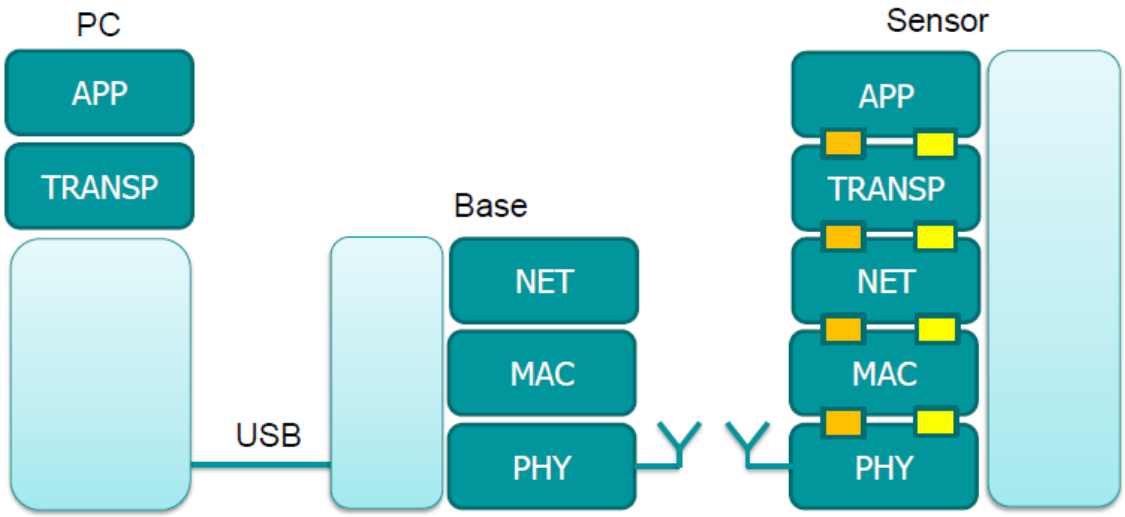

Figura 3.6: Pilhas de Protocolo TCP/IP com 5 camadas (BRANQUINHO, 2011).

A plataforma Radiuino faz uso do *Frame* (“quadro”) com 52 bytes (Figura 3.7), sendo assim distribuídos:

- 4 *bytes* da camada Phy;

- 4 *bytes* na camada MAC;

- 4 *bytes* na camada Net;

- 4 *bytes* na camada transporte;

- Seis AD com 3 *bytes* cada um;

- Seis I/O com 3 *bytes* cada um;

Phy				MAC				Net				Transp					
RSSI_DLINK	LQI_DLINK	RSSI_ULINK	LQI_UPLINK	TBD	TBD	TBD	TBD	DST_ID	DST_NID	SRC_ID	SRC_NID	COUNT	TBD	TBD	TBD		
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15		
AD0				AD1			AD2			AD3			AD4			AD5	
AD0_W	AD0_H	AD0_L	AD1_W	AD1_H	AD1_L	AD2_W	AD2_H	AD2_L	AD3_W	AD3_H	AD3_L	AD4_W	AD4_H	AD4_L	AD5_W	AD5_H	AD5_L
16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33
IO0				IO1			IO2			IO3			IO4			IO5	
IO0_W	IO0_H	IO0_L	IO1_W	IO1_H	IO1_L	IO2_W	IO2_H	IO2_L	IO3_W	IO3_H	IO3_L	IO4_W	IO4_H	IO4_L	IO5_W	IO5_H	IO5_L
34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51

Figura 3.7: *Frame* da plataforma Radiuino

Além da plataforma de comunicação utilizada em uma rede de sensores sem fio o projeto desta rede precisa considerar o tipo de ambiente e as características do sistema. A Figura 3.8 ilustra os elementos de comunicação rádio.

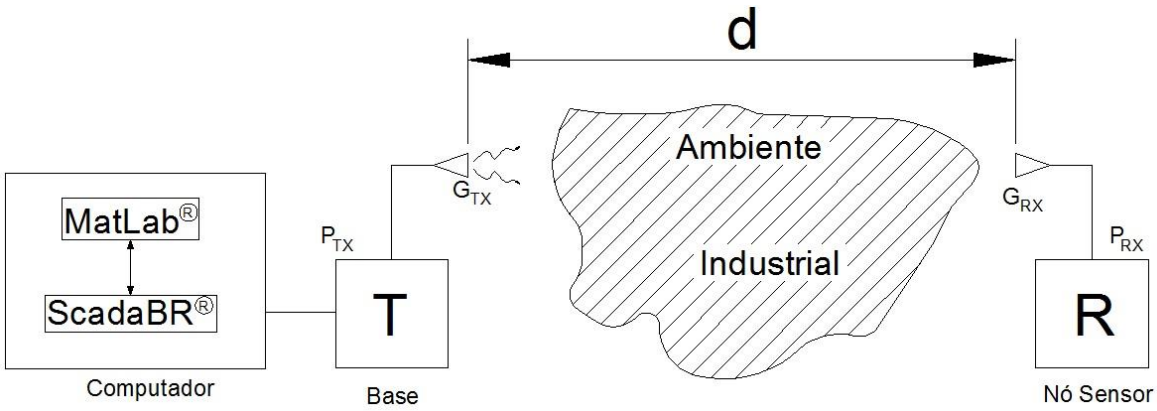

Figura 3.8: Sistema de Comunicação Sem Fio

O ambiente onde a RSSF irá atuar é a premissa para se definir qual a potência necessária na transmissão (P_{TX}). Como visto na equação 3.1 a distância já é um fator causador de atenuação. Além deste elemento, é necessário considerar as atenuações dos obstáculos e as possíveis interferências do sinal que causam perdas de informação e consequente aumento na taxa de falhas (CHRISTIN *et al*., 2010; PAAVOLA e LEIVISKÃ, 2010).

Uma dúvida comum na implementação de um sistema de rádio controle inserido em ambientes industriais é se a taxa de falha existente na comunicação dos nós sensores pode impedir a rápida atuação do sistema, comprometendo o desempenho (DA SILVA, 2012). Neste estudo a RSSF está atuando dentro de subestações de energia, em painéis de comando de motores de grande porte e ambientes hostis. Existe um questionamento sobre o desempenho do sistema de rádio quando submetido a radiação de baixa frequência proveniente de subestações de energia de 13,8 kV. Motivado por esta dúvida, foi realizado um teste para verificar o desempenho de uma RSSF de 915 MHz, operando com uma subestação entre os pontos de comunicação, comparado com o mesmo sistema, sem a subestação entre os pontos.

3.4 MODELOS DE PROPAGAÇÃO

Existem inúmeros modelos de propagação para os mais diversos tipos de ambientes, sendo ainda hoje este um tema de pesquisa (NASCIMENTO, 1999). Neste item serão apresentados os básicos.

3.4.1 MODELO DO ESPAÇO LIVRE – FÓRMULA DE FRIIS

O modelo do espaço livre é o mais básico e também o mais importante, pois determina a menor atenuação que normalmente se obtém em um enlace rádio. O modelo de espaço livre desenvolvido por Friis (RAPPAPORT, 2009) é a referência para todos os métodos de predição de intensidade de sinal utilizados atualmente. Sempre parte-se da atenuação do espaço livre para a determinação da intensidade de sinal recebida a uma dada distância. Adicionalmente são colocados outros fatores que aumentam a atenuação do sinal em função, por exemplo, do meio em que a comunicação está acontecendo.

Este modelo foi proposto por Harald T. Friis do *Bell Telephone Laboratory* em 1946. A dedução da fórmula de Friis considera primeiramente uma antena isotrópica na transmissão. Segundo proposta de Friis toda a potência de transmissão (P_{TX}) que é injetada na antena será totalmente convertida em ondas eletromagnéticas no espaço, ou seja, a antena tem 100% de eficiência. Devido a sua natureza isotrópica vai irradiar igualmente em todas as direções. Forma-se, então, uma frente de onda na forma de uma esfera no espaço, conforme ilustra a Figura 3.9.

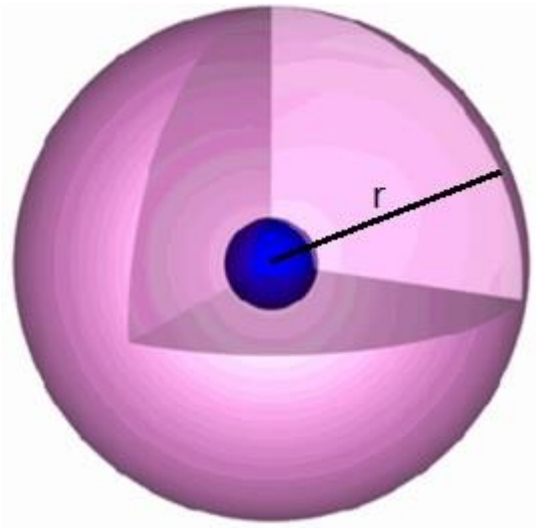

Figura 3.9: Frente de onda de uma fonte isotrópica a uma distância r (RAPPAPORT, 2009).

Um fato a se notar é que se dobrarmos a distância a área vai aumentar de quatro vezes. Como efeito, a densidade de potência cai quatro vezes. Esta informação é chave para entender a dedução da fórmula de Friis.

Naturalmente a potência P_{TX} transmitida pela isotrópica vai se espalhar uniformemente pela superfície da esfera e a potência por unidade de área a uma distância r é mostrada na equação 3.2:

$$S_r = \frac{P_{TX}}{4\pi r^2} \ , \qquad (3.2)$$

onde $4\ \pi\ r^2$ é a área da esfera com raio r.

Ou seja, a potência de transmissão se distribui na casca da esfera de raio *r*. Com isto, a potência por unidade de área será a potência de transmissão dividida pela área da esfera.

Substituindo a antena isotrópica por uma antena com ganho G_{TX} aumenta-se a densidade de potência na direção principal do diagrama de radiação, como ilustrado na Figura 3.10.

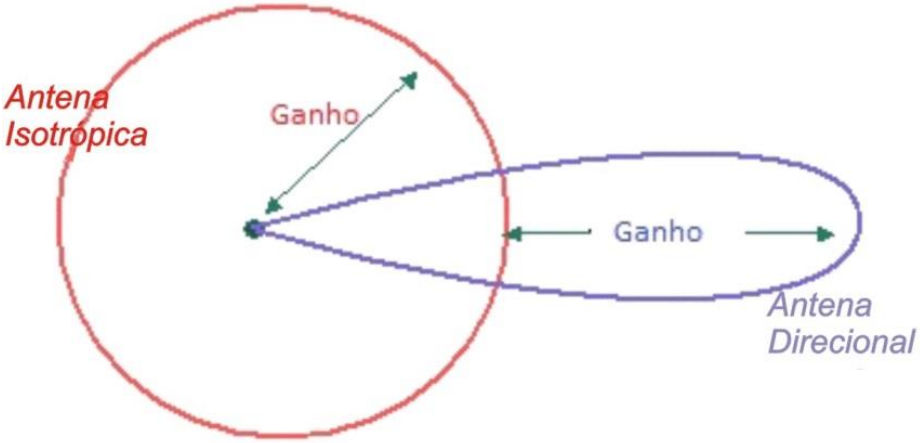

Figura 3.10: Diagrama de radiação das antenas isotrópicas e direcionais (RAPPAPORT, 2009).

Muito importante notar que o diagrama de irradiação não indica distância, mas o ganho em relação à isotrópica. Portanto, a potência por unidade de área na direção principal a uma distância *d* (*d* é igual ao raio *r* da esfera), na direção de máxima radiação é mostrada na equação 3.3 (RAPPAPORT, 2009):

$$S_d = \left(\frac{P_{TX} x G_{TX}}{4\pi d^2}\right) \ , \qquad (3.3)$$

Isto faz sentido uma vez que o ganho de uma antena é o aumento da potência por unidade de área em relação à isotrópica.

Na recepção a densidade de potência S_d será recebida por uma antena. Para converter a densidade de potência (W/m^2) em potência (W), será utilizada uma antena de recepção que tem um ganho G_{RX} e uma abertura efetiva correspondente. Esta abertura efetiva representa uma área no espaço em que a antena de recepção vai capturar parte da energia da onda plana que chega, vinda da antena de transmissão. Considerando os ganhos das antenas de transmissão e recepção, e a abertura da antena de recepção define-se a fórmula de Friss, ou modelo do espaço livre (equação 3.4) (RAPPAPORT, 2009):

$$P_{RX} = \frac{P_{TX} * G_{TX} * G_{RX}}{L_{EL}} \qquad (3.4)$$

onde L_{EL} é a atenuação no espaço livre. Pela equação 3.4 pode-se calcular a potência recebida, considerando a potência de transmissão, ganho das antenas, frequência de operação e distância entre as antenas.

3.4.2 MODELO DE LOG-*DISTANCE*

O modelo de *Log-Distance* é largamente utilizado para caracterizar o tipo de ambiente. Este modelo parte do princípio que a potência recebida a uma distância *d* pode ser calculada considerando um fator denominado *path loss* (β) e uma potência de referência recebida a uma distância d_0 próxima do transmissor. A equação 3.5 mostra o modelo *Log-Distance* (RAPPAPORT, 2009):

$$P_{RX}(d) = P_{RX}(d_0) - 10\beta\log\left(\frac{d}{d_0}\right) \qquad (3.5)$$

onde $P_{RX}(d_0)$ é a potência recebida a uma distância d_0 conhecida e usando o modelo do espaço livre. O valor de β é comumente encontrado para ambientes internos e mesmo em especificação de redes sem fio (WLAN –*Wireless Local Area Network*). Em última análise quanto maior o valor de β maior será a atenuação em função da distância. Na especificação de redes WLAN algumas vezes são mencionados ambientes abertos ou fechados. Nestes casos, o que está sendo considerado é o valor de β para calcular qual a distância de cobertura

da rede sem fio. Alguns valores típicos do β em função do ambiente são mostrados na tabela 3.1 (RAPPAPORT, 2009):

Tabela 3.1: O valor de β em função do ambiente.

Ambiente		β
Área ao ar livre	Espaço Livre	2
	Área urbana	2,7 a 5
Área construída	Linha de visão	1,6 a 1,8
	obstruído	4 a 6

3.4.3 MODELO COM OBSTÁCULOS

O modelo *log-distance* pode ser mais completo com a inclusão do fator de atenuação entre andares (FAF) e o fator de atenuação entre os obstáculos (principalmente paredes), encontradas na linha reta entre as estações que estão se comunicando. A equação 3.6 (Rappaport, 2009) mostra a potência recebida usando o modelo *log-distance* considerando a atenuação entre os obstáculos.

$$P_{RX}(d) = P_{RX}(d_0) - 10\beta \log\left(\frac{d}{d_0}\right) - FAF(n) \qquad (3.6)$$

onde FAF(n) é o valor da atenuação em função do número de obstáculo (paredes) existente entre a base e o sensor.

3.5 CONCLUSÃO

Na implementação de um sistema de telecontrole, a análise prévia do ambiente e a escolha da plataforma de comunicação são fatores diretamente relacionados com a eficiência do sistema. O estudo preliminar do ambiente promove a correta escolha das antenas a serem utilizadas e a definição das potências dos rádios. Em uma rede de sensores o consumo de energia dos nós sensores está

vinculado à potência do rádio. Como estes sensores normalmente utilizam baterias, é importante que a potência de rádio seja a mínima possível, porém capaz de manter a comunicação estável.

Toda rede de sensores sem fio deve ser criada para uma aplicação específica. A flexibilidade e facilidade de operação da rede de sensores é fundamental para o sucesso de um sistema de telecontrole.

CAPÍTULO 4

A PLANTA INDUSTRIAL UTILIZADA COMO MODELO DE CARGA PARA O PROJETO DO CONTROLE DE DEMANDA DE ENERGIA POR REDE DE SENSORES SEM FIO

4.1 INTRODUÇÃO

A planta industrial utilizada como modelo de carga neste trabalho para o projeto do controle de demanda de energia por rede de sensores sem fio consiste de um frigorífico que possui grande quantidade de máquinas para o abate avícola. A Figura 4.1 mostra uma foto panorâmica da empresa na época do levantamento de seus dados do sistema elétrico e produtivo. Esta empresa possui demanda contratada e um sistema de cogeração cuja capacidade está abaixo da demanda de potência necessária para manter todo o processo produtivo.

Costa *et al., (*2012) utilizou de um algoritmo genético para definir a melhor combinação de cargas que devem permanecer ligadas no horário de ponta. Esta proposta se mostrou muito eficiente. Porém, o corte de carga é feito de forma manual, não isentando o sistema de um colapso de energia em casos de falha do fornecimento, ou até mesmo um colapso devido às alterações do ambiente e do processo produtivo. Estas razões tornam a combinação de cargas fornecida pelo AG não mais adequada.

Neste trabalho, é proposto um sistema supervisório que faz a interface entre o algoritmo genético proposto em Costa *et al., (*2012) e uma rede de sensores sem fio. Esta tem como função proporcionar a telemetria, o telecomando e a telesupervisão para o controle da demanda de energia desta planta industrial.

Dados do sistema elétrico e produtivo obtidos desta planta foram usados para testar a montagem e implementação deste sistema de telecontrole.

Figura 4.1: Vista panorâmica da empresa (Google Earth)

Para a implementação de uma rede de sensores é fundamental uma análise do espaço físico da empresa e da estrutura a ser monitorada. A Figura 4.2 mostra o *layout* da empresa.

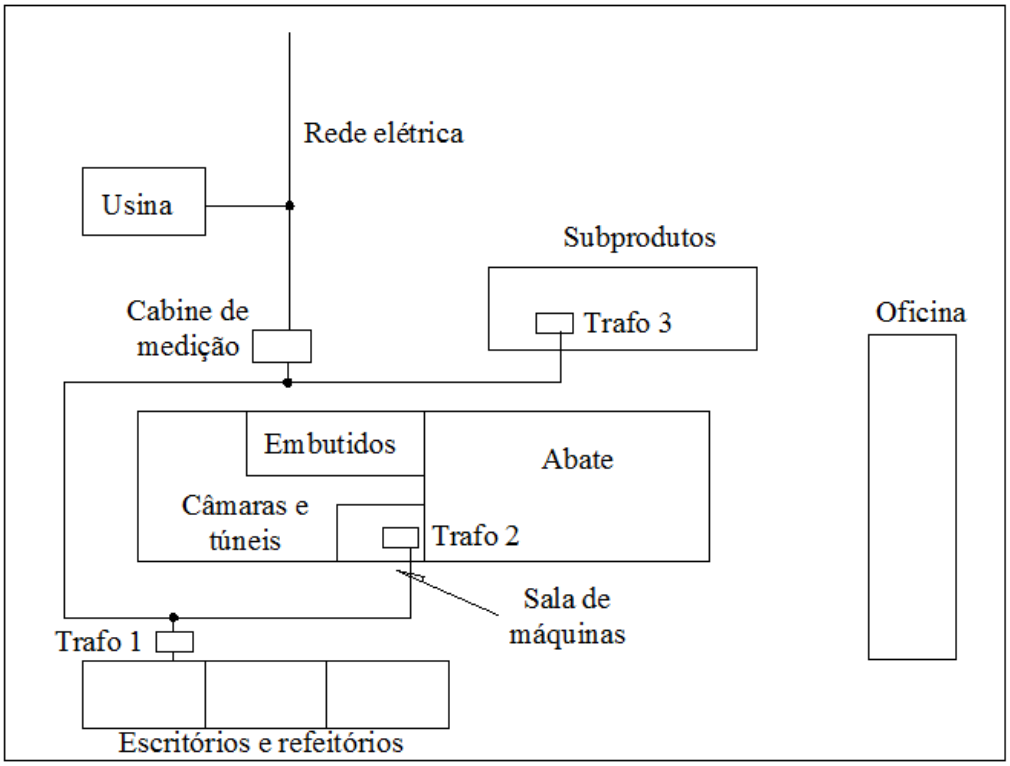

Figura 4.2: *Layout* da planta industrial (COSTA, 2012)

Esta rede de sensores deve atuar em 4 pontos da empresa: usina; cabine de medição; câmaras e túneis, e sala de máquinas. As áreas destacadas na Figura 4.2 como subprodutos, escritórios e oficina não entram no controle automático, pois em caso de falha do fornecimento de energia, estes setores da empresa não comprometem a produção, caso ocorram paralizações.

4.2 A PLANTA INDUSTRIAL

A indústria possui uma demanda média de 3.500 kW. O setor de maior consumo é a casa das máquinas, onde se encontram os compressores de amônia de elevada potência.

O fornecimento de energia elétrica da empresa é feito em 13,8 kV, por uma rede trifásica única, com 30 km de comprimento, pela concessionária de energia elétrica que atende a região.

A empresa possui uma usina de cogeração que é utilizada no horário de ponta e/ou em caso de falhas no fornecimento de energia. A retirada de cargas se faz necessária porque a usina não possui capacidade de suprir toda a demanda de

energia que a empresa necessita no processo produtivo. Desta forma, a produção deve ser diminuída no horário de ponta ou em caso de falhas, reduzindo assim o consumo de energia a valores que evitem o colapso das instalações elétricas da empresa, evitando a paralização total das operações.

O setor de abate é considerado prioritário no processo industrial. Este setor demanda em média 800kW. Este setor contém motores de potências menores usados em esteiras, linhas, *chillers* e depenadeiras. Estes motores devem, permanecer ligados e não entram no processo de corte de cargas.

Na sala de máquinas, encontram-se os painéis com os dispositivos de comando e proteção dos motores pertencentes ao sistema: doze compressores de potências variadas, dez forçadores (ventiladores) dos túneis de congelamento e três forçadores das câmaras de resfriamento.

A planta possui três transformadores: 75kVA, 1.500 kVA e 2.500 kVA, que alimentam setores diferentes da planta industrial (Figura 4.2).

A co-geração é feita por uma usina térmica com capacidade de geração de 2.160 kVA, que possui seis geradores de 360 kVA. Cada unidade geradora possui um sistema de controle mostrando os limites de geração e as propriedades construtivas do equipamento. Na usina há também um sistema de proteção e monitoramento da potência gerada pelo conjunto de geradores, assim como o sincronismo entre usina e a rede elétrica no momento da transição entre os dois sistemas de fornecimento de energia elétrica.

Além da co-geração, existem dois geradores de 360 kVA ligados diretamente ao barramento de 380 V, localizado na saída do transformador de 2.500 kVA. Estes geradores alimentam cargas essenciais do setor de abate.

Como a planta apresenta um sistema eficaz e automático de controle de reativo, não foram consideradas as potências reativas demandadas da alimentação. A Figura 4.3 mostra o diagrama unifilar com as principais cargas existentes na planta.

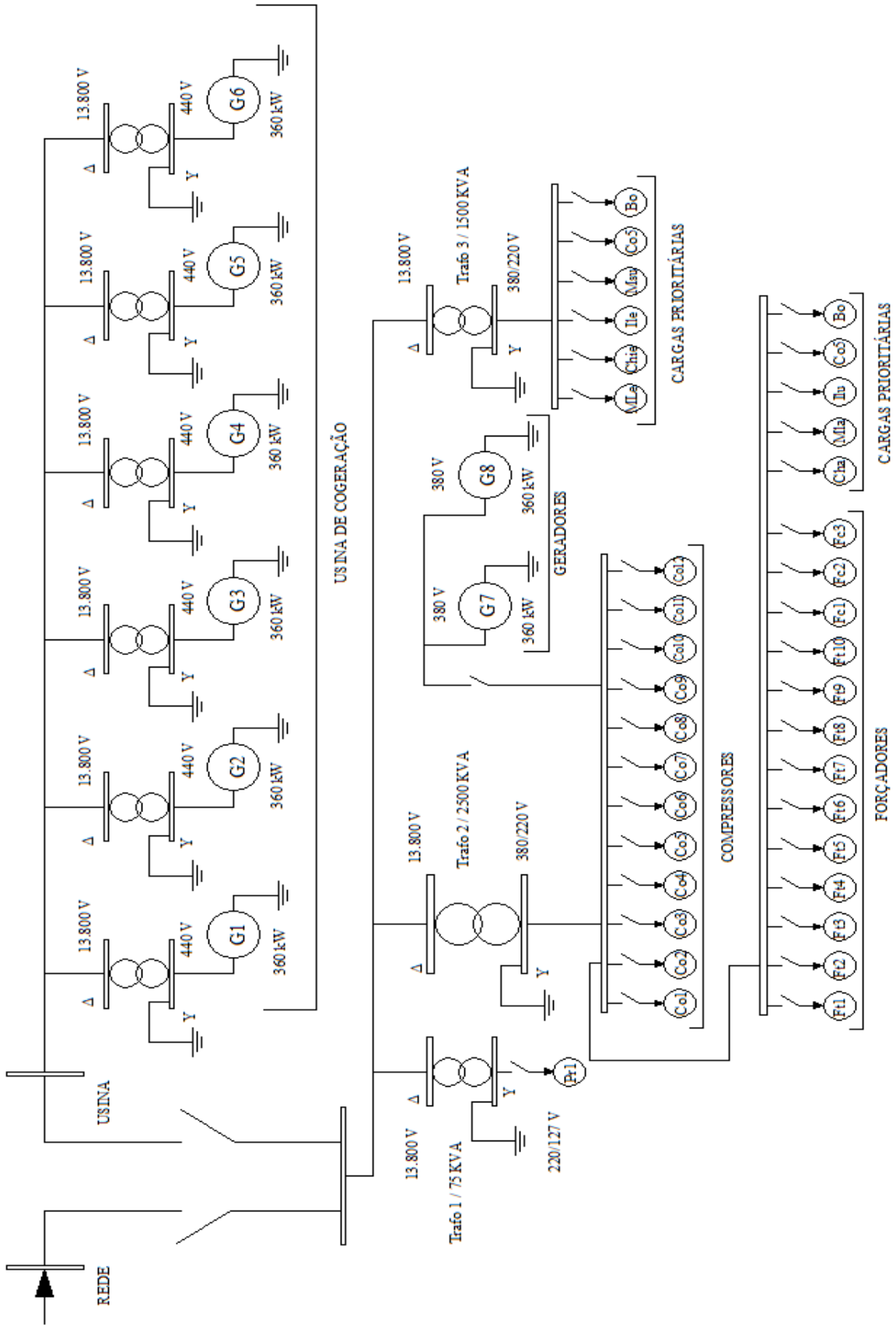

Figura 4.3: Diagrama unifilar com as principais cargas da planta (COSTA, 2012)

A tabela 4.1 mostra as potências ativas medidas das cargas que podem ser desligadas do processo produtivo quando necessário, Costa *et al.,* (2012).

Tabela 4.1: Valores das potências ativas das cargas que o sistema de controle poderá atuar

Cargas	Compressores e Forçadores	Potência elétrica medida (kW)
1	Co_1	619,41
2	Co_2	474,56
3	Co_3	323,30
4	Co_4	323,30
5	Co_5	323,30
6	Co_6	323,30
7	Co_7	104,50
8	Co_8	55,20
9	Co_9	55,20
10	Co_{10}	55,20
11	Co_{11}	55,20
12	Co_{12}	33,40
13	Ft_1	42,40
14	Ft_2	54,52
15	Ft_3	54,52
16	Ft_4	54,52
17	Ft_5	36,30
18	Ft_6	36,30
19	Ft_7	36,30
20	Ft_8	36,30
21	Ft_9	36,30
22	Ft_{10}	24,22
23	Fc_1	40,00
24	Fc_2	40,00
25	Fc_3	32,00

As cargas C_{O1} a C_{O12} representam os motores dos compressores de amônia, Ft_1 a Ft_{10} representam os motores dos forçadores dos túneis de congelamento e F_{C1} a F_{C3} representam os motores dos forçadores das câmaras de resfriamento.

4.3 ESTUDO DE CASO: CORTE INTELIGENTE E AUTOMÁTICO DE CARGAS E AJUSTE ATRAVÉS DE UM SISTEMA SUPERVISÓRIO

A empresa possui uma demanda máxima de 3.500 kVA. Quando o sistema de cogeração assume o fornecimento de energia a empresa, por motivo de segurança, adota a demanda máxima no setor de máquinas de 1.800 kW. A usina possui uma capacidade de fornecimento de 2.160 kVA, porém um sistema de proteção impede que a mesma trabalhe em sobrecarga. Então, o consumo deve ser abaixo do valor nominal, para evitar um possível desligamento da usina, de co-geração.

O corte de cargas é realizado de maneira manual e calçado pela experiência dos funcionários, pois são eles que definem quais cargas devem ser desligadas. Este procedimento de corte manual de cargas acontece regularmente minutos antes do horário de ponta. No caso de uma falha do fornecimento de energia, a co-geração assume o sistema em 15 segundos. Neste instante, o sistema de proteção da usina atua e toda a planta fica sem energia. Em situações como estas, os funcionários realizam o acionamento manual das cargas prioritárias, permitindo a religação do sistema, porém com um consumo inferior a 1.800 kW.

A proposta de Costa *et al.,* (2012) solucionou o problema de definição das cargas que devem ser cortadas ou religadas quando a usina assume o fornecimento da energia. O AG desenvolvido se mostrou muito eficiente na escolha das cargas prioritárias para o processo produtivo nas condições do processo produtivo naquele instante. Entretanto, o processo de corte continua sendo manual e em caso de falhas, continua sendo necessário o religamento gradativo das cargas prioritárias.

Outro problema que deve ser levado em consideração é que, os valores de temperatura e pressão usados para definir a melhor combinação de cargas, sofrem alterações devido ao próprio processo produtivo. Também não se consegue realizar um ajuste fino da combinação das cargas para se ter um melhor aproveitamento da energia gerada pela usina, isto é, alterar a combinação de cargas acrescentando ou retirando cargas de potências menores. A temperatura ambiente, também é um fator que influencia este sistema de controle de cargas. Os compressores de amônia de grande porte são acionados através

de inversores de frequência. Em dias frios, por exemplo, estes compressores podem estar operando com uma potência inferior à potência nominal. Neste caso pode existir energia necessária para acionar mais equipamentos, alterando assim, a relação de cargas inicialmente proposta pelo AG e o consequente aumento da produção. Portanto, a necessidade do corte inteligente, automático e supervisionado, através do 3T: telemetria, telecomando e telesupervisão é justificado.

4.4 CONCLUSÃO

Um sistema de co-geração traz para os sistemas industriais mais autonomia e robustez. Entretanto, se o sistema de cogeração não conseguir suprir toda a energia necessária para o funcionamento normal da indústria, o mesmo torna-se ineficiente.

Com a competitividade entre os fabricantes e a exigência da qualidade dos produtos alimentícios nos dias de hoje, é fundamental o controle dos custos de produção e o controle da qualidade dos produtos. Qualidade, redução dos custos operacionais, maior desempenho de produção, base para outros sistemas, ou seja, vantagem competitiva.

Através do monitoramento das variáveis do processo produtivo, pressão de amônia nos tubos e temperatura das câmaras de resfriamento, é possível determinar seus níveis ótimos de trabalho. Caso estes níveis saiam da faixa aceitável o Sistema Supervisório de Controle (SSC) alerta o operador do processo, permitindo a atuação corretiva mais eficiente do mesmo. Isso garante rápidos ajustes no processo produtivo e garante a qualidade do produto final.

A exigência de funcionários especializados e o tempo dispensado para atuar no sistema de forma manual, aumenta os custos operacionais. O uso de um SSC associado a uma tecnologia de telecontrole, cria a necessidade de apenas um funcionário especializado, que através de gráficos consiga visualizar todo o processo produtivo da indústria e tomar decisões em tempos reduzidos.

As intervenções rápidas no processo produtivo e o ágil acionamento das máquinas aumentam o desempenho de produção.

Os SSC's podem coletar os dados do processo produtivo e armazená-los em um conjunto de dados. Estes dados podem ser utilizados para gerar informações importantes, sendo integrados com sistemas de execução de processos. Podem também fornecer dados em tempo real, para sistemas que realizam cálculos importantes para a tomada de decisão. Este conjunto de ferramentas geram o melhor desempenho de qualquer processo produtivo.

CAPÍTULO 5

CONFIABILIDADE DE REDE DE SENSORES SEM FIO OPERANDO EM SUBESTAÇÃO DE POTÊNCIA ELÉTRICA INDUSTRIAL

5.1 INTRODUÇÃO

O controle via rádio ainda cria insegurança devido a sua confiabilidade atuando em meio atmosférico. Uma falha na informação transmitida inviabilizaria qualquer sistema de controle. Nas transmissões analógicas, qualquer controle via rádio próximo de sistemas elétricos ou equipamentos de alta potência, era inviável devido às influências da radiação de baixa frequência proveniente das subestações de energia. Como o sistema supervisório objeto deste estudo irá atuar em motores de elevada potência e monitorar a subestação de energia da indústria, é fundamental avaliar o comportamento da rede de sensores de 915 MHz, com modulação digital, operando sob o efeito da radiação de baixa frequência (PAULO, 2010).

Em função da planta da empresa (Figura 4.1) e dos equipamentos a serem monitorados e/ou controlados, tem-se a dimensão da área de cobertura e do ambiente de atuação da rede de sensores sem fio. Desta forma, são necessárias algumas informações fundamentais para a definição da RSSF: a escolha e o dimensionamento do sistema de comunicação (frequência de operação, ganho das antenas, etc.); a confiabilidade do sistema; compatibilidade do Sistema Supervisório com a RSSF, e a plataforma de comunicação a ser utilizada (LUQUETA, BRANQUINHO e BIANCHINI, 2012).

5.2 TESTE DE CONFIABILIDADE

Foram utilizados dois rádios BEE 900, uma base para conexão ao microcomputador, um nó sensor, uma antena direcional modelo ARC-PAC9113B01 – 902-928 MHz de 12,5 dBi e uma antena *fiberglass* omni-direcional – 800-900 MHz de 8 dBi. A base é conectada à entrada USB do microcomputador, e o programa ScadaBR é preparado para registrar o RSSI. Os testes foram realizados na subestação de energia da UNICAMP em Campinas.

Em um computador com o *software* ScadaBR®, instala-se o *driver* de comunicação radiuino, compatibilizando a comunicação do ScadaBR® com a rede de sensores na plataforma Radiuino. O computador se comunica através de uma saída USB, com o rádio BE 900, chamado de base. O sistema envia um sinal e o sensor executa os comandos enviados pelo programa e lê os dados a partir dos transdutores. O sensor envia de volta para a base uma resposta à requisição. As informações recebidas pela base é o RSSI (*Radio Signal Strength Indicator*) com a potência do sinal recebido do sinal de subida (sinal entre o sensor e a base - *up link*) e o sinal de descida (sinal entre a base e a sensor - *down link*). O computador processa esses dados para deixá-los disponíveis para a manipulação. As Figuras 5.1 e 5.2 mostram fotos dos testes realizados na subestação de energia da UNICAMP em Campinas.

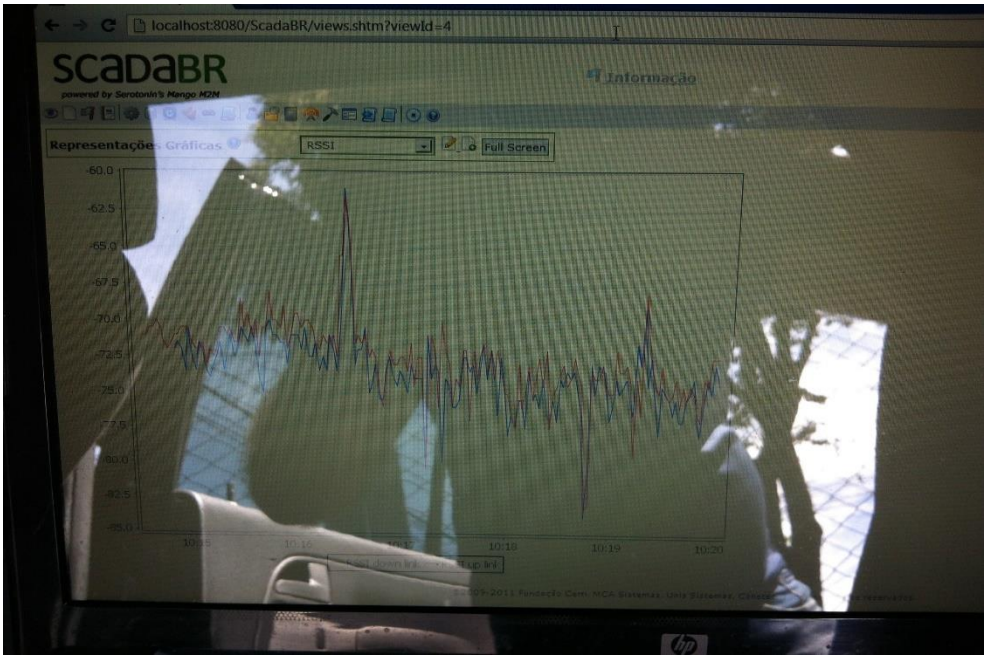

Figura 5.1: Testes realizados na subestação

Figura 5.2: Subestação utilizada no experimento

Tanto o pacote de requisição quanto o pacote de resposta tem o mesmo tamanho (52 *bytes*) e o mesmo formato. A composição do pacote é:

• 4 *bytes* para as camadas: física, MAC, rede e transporte;

• 36 *bytes* para a carga útil.

O módulo com o rádio e o microcontrolador usado para a experiência é o BE900 feito no Brasil. Contém um microcontrolador Atmega328 da Atmel e o transceptor CC1101 da *Texas Instruments* (Figura 5.3).

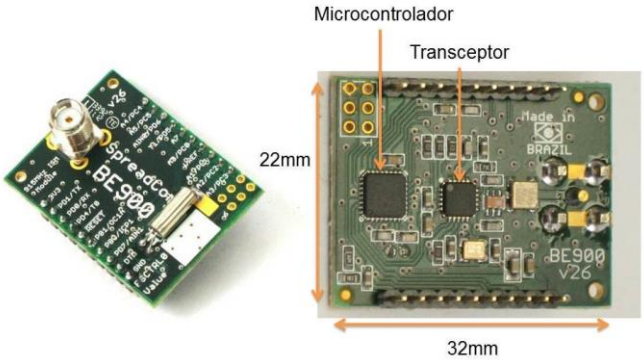

Figura 5.3: Rádio BE 900

A conexão com a antena utiliza um conector SMA que proporciona uma ligação confiável entre o rádio e a antena.

Parâmetros do Sistema:

• P_{TX} – potência de transmissão = 10 dBm;

• G_{TX} - ganho da antena setorial de base = 12 dBi;

• G_{RX} - ganho da antena do sensor omnidirecional = 8 dBi;

• Sensibilidade – a menor potência de recepção necessária para obter uma BER (*bit erase rate)* = -97 dBm;

• Formato de modulação = 2-FSK;

• Desvio = 177.734375 kHz;

• Frequência da base = 915.999725 MHz;

• Frequência da portadora = 915.999725 MHz;

• Modo de qualificação palavra de sincronização = 30/32 *bits* da palavra de sincronização detectadas;

• contagem Preâmbulo = 4;

• Espaçamento entre canais = 405.456543 kHz;

• Taxa de dados = 4,79794 bps;

• Rx filtro BW = 541.666667 kHz.

A Figura 5.4 mostra o local dos testes e destaca as duas situações que foram comparadas.

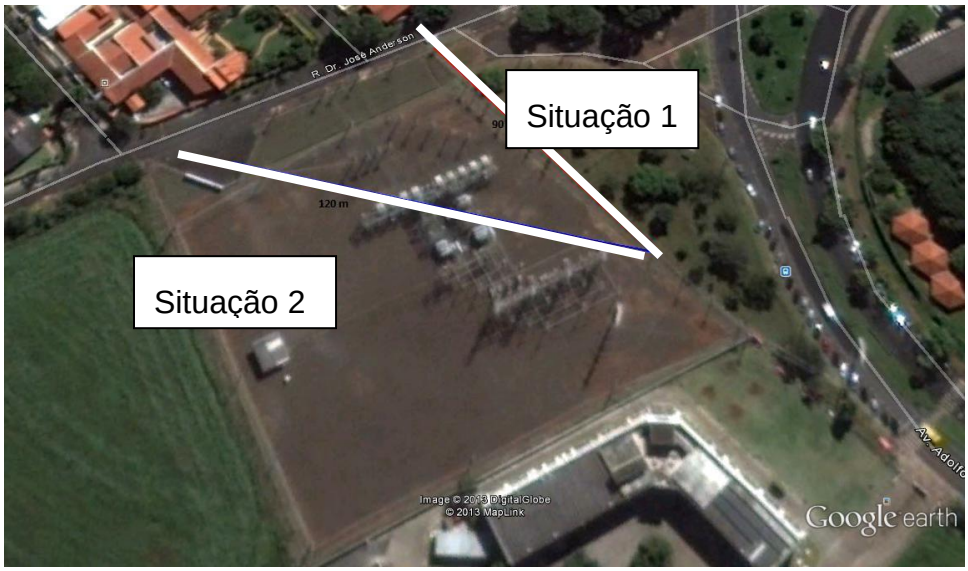

Figura 5.4: As duas situações analisadas.

A antena do sensor utilizada foi uma omnidirecional e a da base foi uma antena Painel Standalone 900-928 GHz, 12 dBi, cujo o diagrama de radiação pode ser visto na Figura 5.5.

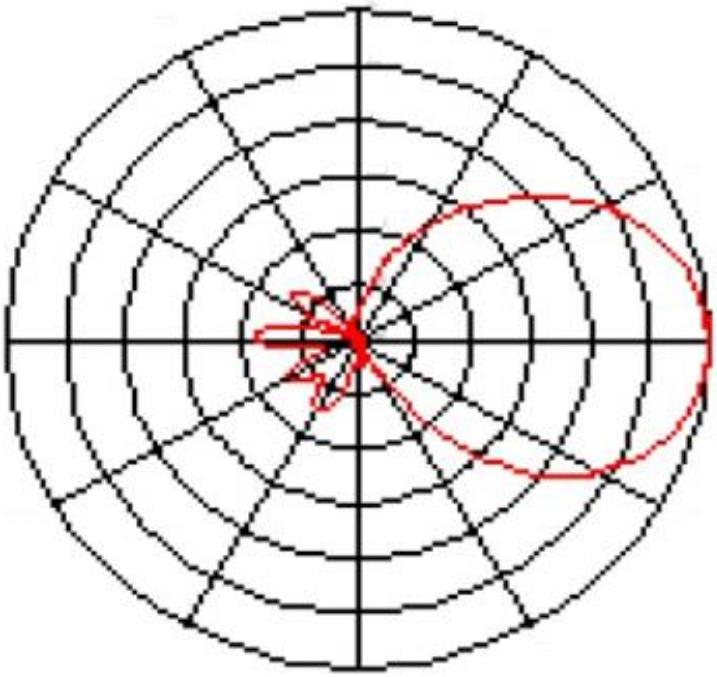

Figura 5.5: Diagrama de irradiação da antena da base com 60 graus de ângulo de abertura.

5.3 RESULTADOS E ANÁLISES

5.3.1 CARACTERIZAÇÃO DO TESTE

Dois conjuntos de dados foram coletados, considerando as duas situações representadas na Figura 5.6:

1. sem a subestação entre a base e o nó sensor;

2. subestação entre a base e o nó sensor.

O experimento tem como objetivo calcular a perda por caminho (β) e o desvio padrão (σ) nas duas situações. O sinal é registrado em dBm, em um intervalo de 2 segundos. Na Situação 1, foram feitas 424 medições e na situação 2, foram feitas 824 medições. O número de amostras foi suficiente para reconhecer uma regularidade dos dados, como mostrado na Figura 5.6. O RSSI *up link* e *down link*, foram medidos para verificar uma possível assimetria nos dois caminhos. Na Figura 5.6 a grande variação que separa a situação 1 da situação 2 representa a mudança de local da antena transmissora, que foi deslocada para dentro da subestação de energia.

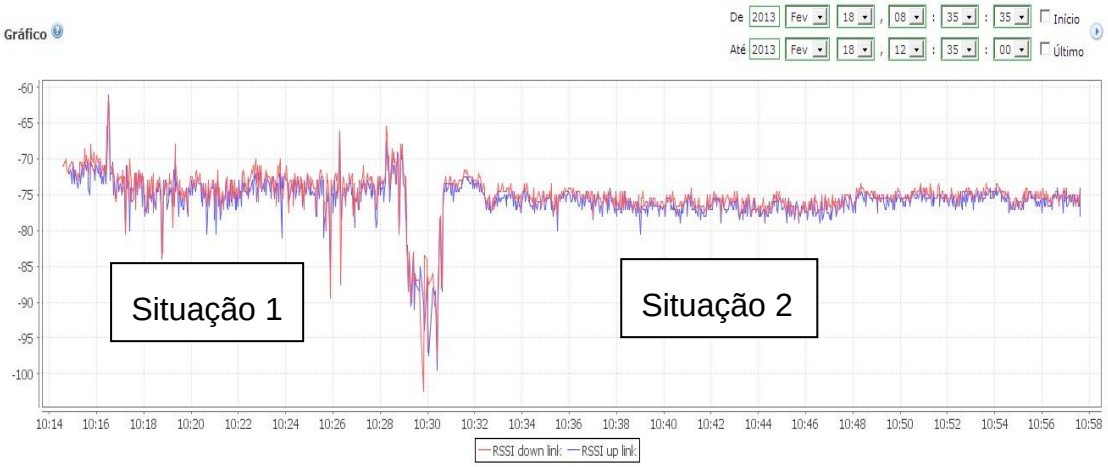

Figura 5.6: Tela do ScadaBR® com os resultados

Inicialmente, os dados são convertidos de dBm para Watt para o cálculo da média do sinal. Em seguida, os resultados são convertidos em dBm novamente para determinar a perda por caminho β.

Para determinar o desvio padrão σ, o conjunto de dados foi manipulado diretamente em dB [referencia]. Primeiro calcula-se a média, que é subtraída de

cada ponto de dados. O resultado é uma variável aleatória com média zero em que é determinada a distribuição de probabilidade e o desvio padrão *σ.*

5.3.2 *PATH LOSS*

A perda do sistema (LS) é de 10 dB medidos em laboratório e a distância de 1 metro é considerada como referência para comparação entre as duas situações.

Considerando os valores dos parâmetros do sistema, e usando a Equação 2.4, é calculada a P_{RX} (d_0) = -11,68 dBm. Considerando a potência média de cada situação são determinados os valores de *β*, usando a Equação 2.5. A Tabela 5.1 mostra a perda de percurso.

Tabela 5.1: O valor de *β* nas duas situações

	Down Link		Up Link	
	β	$\overline{P_{RX}(d)}$ [dBm]	*β*	$\overline{P_{RX}(d)}$ [dBm]
Situação 1	3.143	-73,1	3.189	-74,0
Situação 2	3.065	-75,4	3.094	-76,0

5.3.3 ANÁLISE ESTATÍSTICA

A distribuição normal pode ser traçada com os valores da Tabela 5.1. As Figuras 5.7 e 5.8 mostram as curvas de distribuição para cada situação (DANTAS, 2000; BUSSAB, 2003).

Figure 5.7: Distribuição normal para a situação 1.

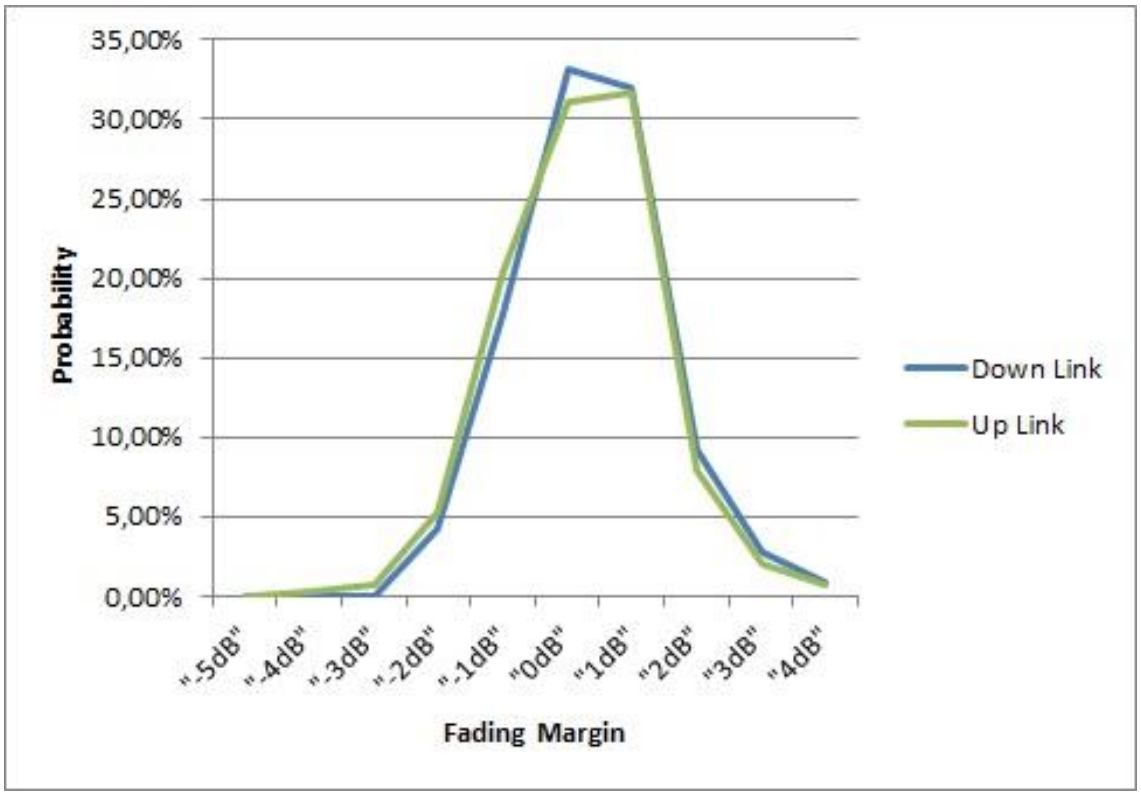

Figure 5.8: Distribuição normal para a situação 2.

As duas curvas apresentam um comportamento simétrico, o que demonstra que a forma da função de Gauss pode ser considerada. Porém, o desvio padrão médio têm diferenças como mostrado na Tabela 5.2.

Tabela 5.2: O valor de σ para as duas situações.

Situação	σ [dB]	
	Down Link	*Up Link*
1 (sem subestação)	2,62	2,39
2 (com subestação)	1,10	1,15

As Figuras 5.9 e 5.10 mostram a função de distribuição cumulativa para as duas situações.

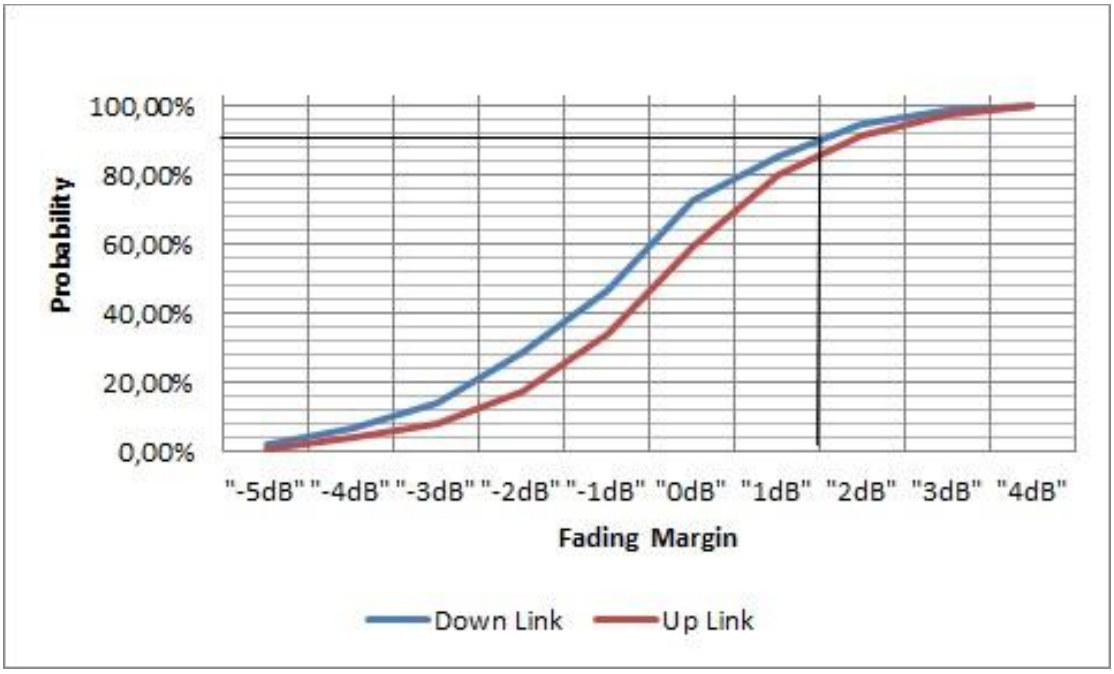

Figura 5.9: Função distribuição Gaussiana cumulativa da situação 1.

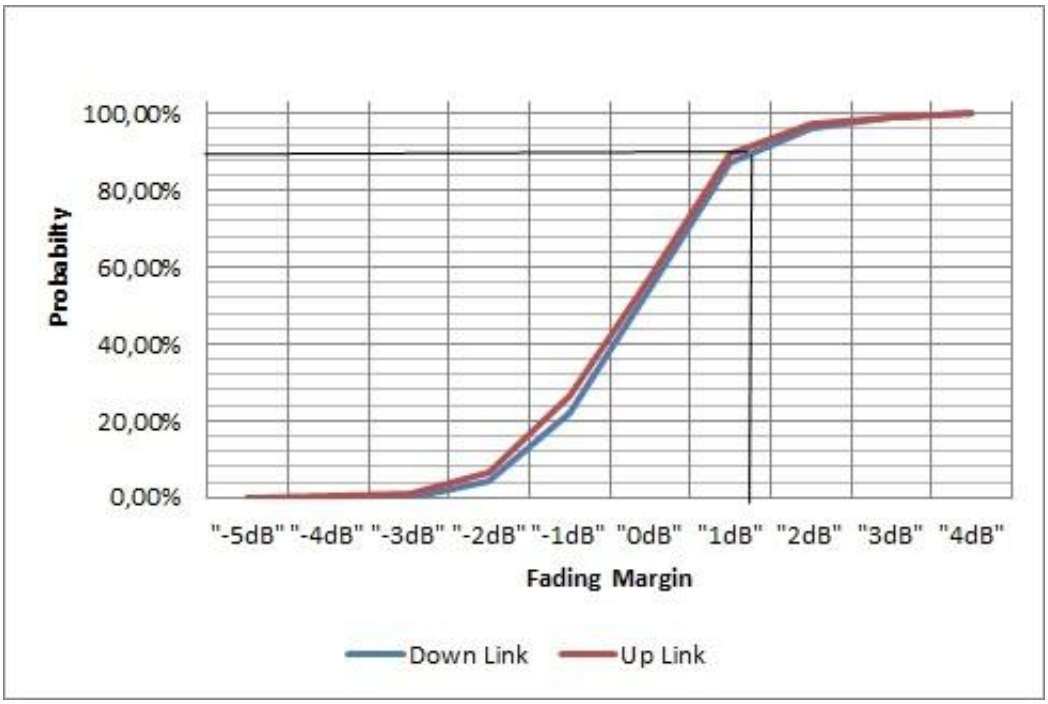

Figura 5.10: Função distribuição Gaussiana cumulativa da situação 2.

Comparando os dois casos analisados, é possível ver pelas Figuras 5.9 e 5.10, que, nos dois casos testados, mesmo para um desvanecimento (*fading margin*) do sinal de 2 dB é possível manter uma confiabilidade de 90% do sinal.

Um desvio padrão menor para o segundo caso, deveu-se ao fato das medições terem sido feitas no interior da subestação, não sofrendo os efeitos do trânsito de veículos nas proximidades das antenas como mostrado na Figura 5.4. Para a situação 1, o trânsito dos carros e ônibus pode ter elevado o desvio padrão. Portanto, pode-se perceber através desta experiência que, a operação de transformadores de potência em 60 Hz não causou qualquer perda de confiabilidade ou danos no *link* de rádio.

5.4 CONCLUSÃO

O ambiente industrial muitas vezes é um ambiente hostil para alguns equipamentos de baixa tensão e sistemas de telecomunicações. Radiações de baixa frequência, harmônicos gerados em chaveamentos de equipamentos de alta potência, entre outros sinais indesejados podem comprometer a confiabilidade destes sistema, e portanto do processo industrial como um todo. A

escolha da rede de sensores deve ser feita com o objetivo maior que é a confiabilidade do sistema de comunicação.

As duas situações analisadas mostraram que o β (*Path Loss*) foi praticamente o mesmo e em ambos casos ficou dentro da faixa de valores apresentados na tabela 3.1 para áreas urbanas.

O teste mostra que um sistema de monitoramento e/ou controle de equipamentos elétricos, usando redes de sensores a 915 MHz, operando próximos a equipamentos elétricos de potência elevadas, com tensões de 13,8 KV, não sofrem nenhum tipo de influência. Sua confiabilidade dependerá apenas do correto projeto em função do ambiente em que se encontra a rede de sensores.

CAPÍTULO 6

RETIRADA INTELIGENTE DE CARGAS INDUSTRIAIS POR REDE DE SENSORES EM COMUNICAÇÃO VIA RÁDIO EM 915 MHz.

6.1 INTRODUÇÃO

No trabalho de Costa *et al.,* (2012) ficou comprovada a eficiência do AG na definição da melhor combinação de cargas para uma situação onde a potência da usina é o fator que limita a energia gasta na produção da empresa. No mesmo trabalho, as temperaturas das câmaras de resfriamento e o tempo em que o produto está nos túneis de congelamento são as informações de entrada para o AG. Neste caso, temperaturas baixas das câmaras de resfriamento resultam em menores pesos na função penalidade. A faixa de variação das temperaturas é de -10º C a +10º C. Em relação aos túneis, um elevado tempo do produto dentro dos túneis define também um peso pequeno na função penalidade. Cada tipo de produto necessita de um tempo diferenciado dentro dos túneis para atingir o ponto ideal de congelamento, sendo que o tempo máximo que o produto pode ficar nos túneis é de 15 horas. Estes valores de tempo e temperatura é que serão usados no AG como fatores determinantes para a definição da combinação de cargas.

Entretanto, três pontos merecem destaque: o primeiro é que existem combinações adequadas capazes de manter a pressão de amônia nos tubos dentro da faixa ideal (7,5 a 8,3 Kgf/m^2). Esta combinação foi definida *in loco* através de medições, pois não foi disponibilizada de um sistema supervisório, ou disponibilizavam de sensores de pressão. O segundo ponto é que a combinação das cargas prioritárias é definida pela sua potência de operação (Tabela 3.1). Não foi considerado o fato dos motores dos compressores não estarem fazendo uso de sua potência máxima em determinados instantes; alguns motores, os maiores,

são acionados por inversores de frequência e podem operar com potências inferiores às potências nominais. Isto pode acontecer devido à temperatura ambiente ou outros fatores ambientais. Por último, as condições iniciais para o AG (temperatura das câmaras e tempo do produto nos túneis) sofrem alterações durante o processo produtivo. Logo a combinação ideal de cargas definidas no início do horário de ponta, por exemplo, pode não ser a melhor combinação uma hora depois, pois o processo produtivo com certeza irá alterar algumas destas informações essenciais para os resultados do AG.

O objetivo deste trabalho é associar um sistema supervisório (ScadaBR®) com uma rede de sensores sem fio. Desta forma tem-se um enorme volume de dados disponibilizado na tela de um sistema supervisório, em tempo real e o poder de alterar, via rádio, o elemento inicialmente proposto pelo AG com o objetivo de maximizar o uso da energia disponível e consequente aumento da produção.

6.2 IMPLEMENTAÇÃO DA RSSF E DO SCADABR®

Uma vez comprovada a confiabilidade da RSSF de 915 MHz o sistema de controle pode ser implementado. O sistema de tele controle possui a estrutura mostrada na Figura 6.1.

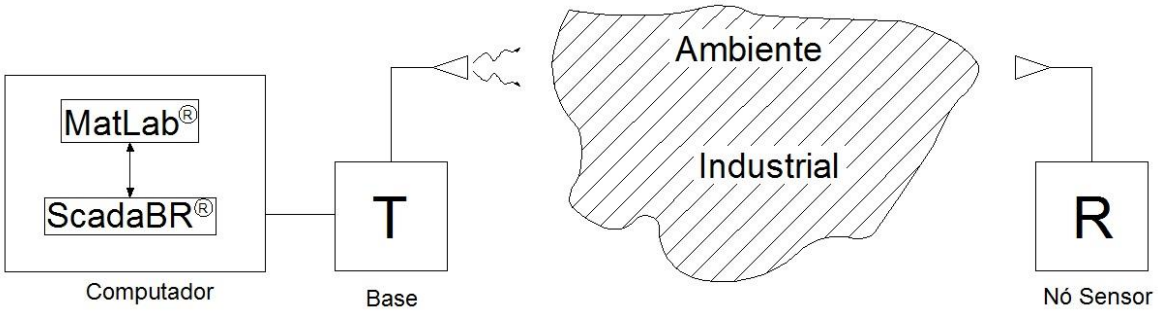

Figura 6.1: Estrutura do sistema de tele controle.

Em função do ambiente industrial onde será inserido o sistema de rádio, o primeiro passo é a configuração dos parâmetros ou o *firmware* dos sensores e base. O desenvolvimento do *firmware* teve como base a pilha de protocolo TCP/IP com cinco camadas e o desenvolvimento das aplicações devem respeitar esta arquitetura de pilha de protocolos (Figura 2.6). A Figura 6.2 mostra como

acontece a comunicação entre um sensor e a base e quais parâmetros devem ser configurados (BERGONSO, 2012).

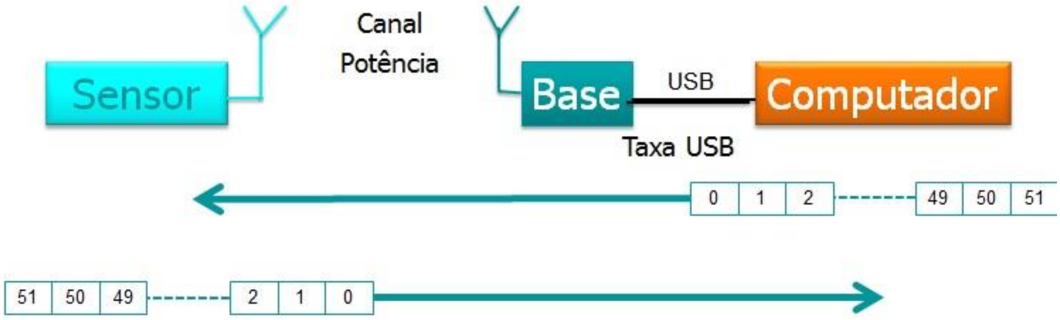

Figura 6.2: Estrutura dos *bytes* de comunicação entre base e sensor.

Percebe-se na Figura 6.2 a importância da definição do canal de operação e da potência de transmissão. Na plataforma Radiuino cada 3 *bytes* são reservados para cada sensor, portanto um outro parâmetro fundamental é definir um endereço para cada sensor. A Figura 6.3 mostra as definições dos parâmetros de comunicação.

```
//+=+=+=+=+=+=+=+=+=+=+=+=+=+=+=+=+=+=+=+=+=+=+=+=+=+=+=+=+=+=+=+=+=+=+=+=+=+=+=+=+=+=
// Endereço ou ID do nó sensor, que pode ser escolhido de 0 a 255. Só pode existir
my_addr = 1;                /* Endereço */

//+=+=+=+=+=+=+=+=+=+=+=+=+=+=+=+=+=+=+=+=+=+=+=+=+=+=+=+=+=+=+=+=+=+=+=+=+=+=+=+=+=+=
//                    AJUSTE DE POTÊNCIA
//+=+=+=+=+=+=+=+=+=+=+=+=+=+=+=+=+=+=+=+=+=+=+=+=+=+=+=+=+=+=+=+=+=+=+=+=+=+=+=+=+=+=
// A potência de transmissão pode ser escolhida entre 8 valores possíveis (0 a 7).
// Em geral a potência é ajustada para o máximo de 7 (10 dBm). Este valor só muda
// -30  -20   -15  -10    0    5    7   10    - Potência em dBm
//   0    1     2    3    4    5    6    7    - Número que deve ser colocado na po
power = 7;                  /* Potência */

//+=+=+=+=+=+=+=+=+=+=+=+=+=+=+=+=+=+=+=+=+=+=+=+=+=+=+=+=+=+=+=+=+=+=+=+=+=+=+=+=+=+=
//                    ESCOLHA DO CANAL DE COMUNICAÇÃO
//+=+=+=+=+=+=+=+=+=+=+=+=+=+=+=+=+=+=+=+=+=+=+=+=+=+=+=+=+=+=+=+=+=+=+=+=+=+=+=+=+=+=
// Pode ser escolhido de 0 a 65. Os canais estão espaçados de 200kHz na faixa de 9
channel = 33;                /* Canal */

//+=+=+=+=+=+=+=+=+=+=+=+=+=+=+=+=+=+=+=+=+=+=+=+=+=+=+=+=+=+=+=+=+=+=+=+=+=+=+=+=+=+=
//                    AJUSTE DE OFFSET
//+=+=+=+=+=+=+=+=+=+=+=+=+=+=+=+=+=+=+=+=+=+=+=+=+=+=+=+=+=+=+=+=+=+=+=+=+=+=+=+=+=+=
// O rádio usa um cristal que pode apresentar uma diferença de frequência que deve
freq_offset = 0x00;         /* Offset de frequencia */
```

Figura 6.3: Tela de configuração dos parâmetros de comunicação da plataforma Radiuino.

Todos os módulos de rádio (BE900) usados nas placas dos sensores devem ser conectados à base para *upload* do *firmware*. Cada módulo deverá receber o seu *bit* de endereço, potência de operação, definição do canal e o *offset* de frequência. A Figura 6.4 mostra o rádio conectado à base.

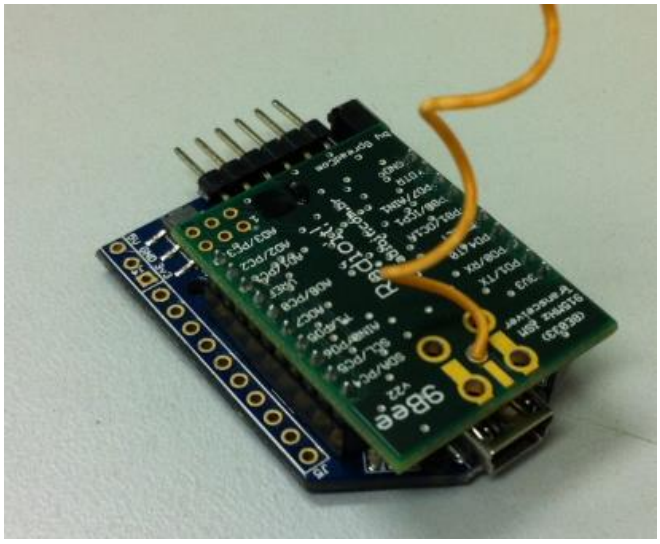

Figura 6.4: Rádio BE900 fazendo *upload* do *firmware*

Um algoritmo genético foi implementado utilizando o AG Toolbox do MatLab®, para determinar a combinação ótima de cargas que devem permanecer ligadas no sistema, quando apenas a usina de cogeração está fornecendo energia. Os indivíduos que não atendem às especificações de desempenho, definidas pelas restrições do problema são penalizados pela função de custo (Costa *et al*., 2012).

As restrições do problema são:

Limite máximo de geração da usina de cogeração de 1800 kW,

- o corte mínimo de carga possível,

- o equilíbrio entre compressores e forçadores que devem permanecer ligados,

- o tempo que o produto está dentro de cada túnel de congelamento, e

- as temperaturas das câmaras de resfriamento.

6.3 IMPLEMENTAÇÃO DO ALGORITMO GENÉTICO

O algoritmo genético fornece em cada geração uma população de indivíduos com configuração e tamanho mostrados na Figura 6.5, sendo que os alelos possuem a informação do estado de cada carga da planta e são relacionados com os dados de entrada do sistema para avaliação feita na função de custo. Os dados de entrada são as potências ativas das cargas, os pesos calculados para o equilíbrio entre os compressores e os forçadores, o tempo que o produto está em cada túnel e a temperatura das câmaras de resfriamento.

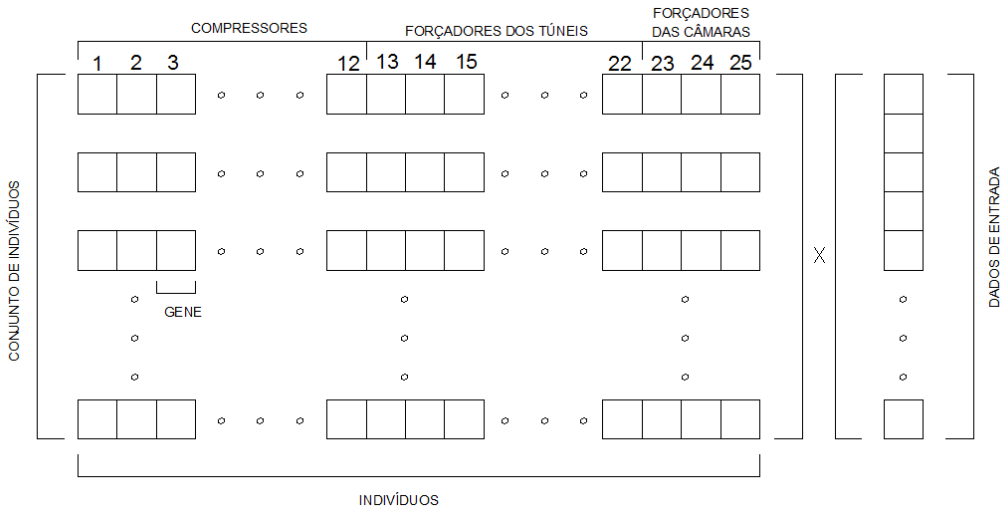

Figura 6.5: Estrutura dos Indivíduos do AG implementado

A Tabela 6.1 fornece os parâmetros do AG desenvolvido para a otimização do corte de carga da planta. Análises dos limites físicos, das condições de operação da planta e das especificações de desempenho definiram os objetivos e restrições a serem impostos ao problema.

Tabela 6.1: Parâmetros do AG desenvolvido

Parâmetros do AG	
Número de *bits*	25
Número de Indivíduos	1000
Número de gerações	50
Método de seleção	SUS
Taxa de recombinação	50%
Taxa de mutação	1%

A equação 6.1 mostra a função de custo utilizada no algoritmo genético.

$$FC = P_{en} + (P_{emax} - P_{edem}) + \left(\sum PFt_n - \sum PCo_n\right) + \sum TPc_n + \sum TCr_n \quad (6.1)$$

Onde

Pen: penalidade aplicada somente no caso da potência demandada pelas cargas ultrapassar o limite máximo de geração,

Pe_{max}: limite máximo de geração,

Pe_{dem}: potência elétrica demandada pela combinação de cargas em análise,

PFt_n: peso dos forçadores do n-ésimo túnel,

PCo_n: peso do n-ésimo compressor,

TPc_n: tempo em que o produto está dentro do n-ésimo túnel,

TCr_n: temperatura da n-ésima câmara de resfriamento

A otimização usa na função de custo uma função de agregação simples com penalidade para as restrições, como segue:

***Minimizar**:*

- *Corte de carga.*
- *Fator de equilíbrio entre compressores e forçadores.*
- *Fator do tempo de permanência do produto no túnel de congelamento.*
- *Fator de temperatura das câmaras de congelamento.*

Sujeito a:

Penalidade para sobrecarga

- *Se **Potência demandada pelas cargas estiver** acima do valor máximo determinado:*

  penalidade = 30.000
- *Caso contrário:*

  penalidade = 0

Para guiar o processo de otimização, a potência nominal máxima demandada pelas cargas é utilizada como uma restrição e os indivíduos sofrem uma penalização elevada se não atenderem esta restrição (COSTA *et al*., 2012).

O conceito de integração no ScadaBR se divide em *Datasource* e em *Datapoint*. O primeiro refere-se à origem dos dados, isto é, cada barramento, CLP ou no caso deste projeto, cada grupo de equipamentos é um *Datasource*. Desta forma, dividiu-se nos seguintes *Datasources:* compressores, forçadores, câmaras e sensores. Os *Datapoints* por sua vez são as temperaturas, tensões, correntes e pressão medidas ou relés acionados, isto é, são os dados coletados ou enviados. Cada grupo de equipamento possui um conjunto de informações associada. Uma das vantagens do ScadaBR é que os *Datapoints* podem ser tratados individualmente, ou seja, cada *Datapoint* possui um *script* individual capaz de manipular a informação de maneira exclusiva, sem afetar os outros *Datapoints* do grupo. A tabela 6.2 mostra as informações tratadas pelo supervisório.

As informações de temperatura das câmaras e o tempo de permanência do produto nos túneis são utilizados pelo AG para definir a melhor combinação de cargas. Estes valores são gravados pelo sistema supervisório no formato txt e disponibilizado no diretório do Matlab® com a estrutura indicada pela Figura 6.6.

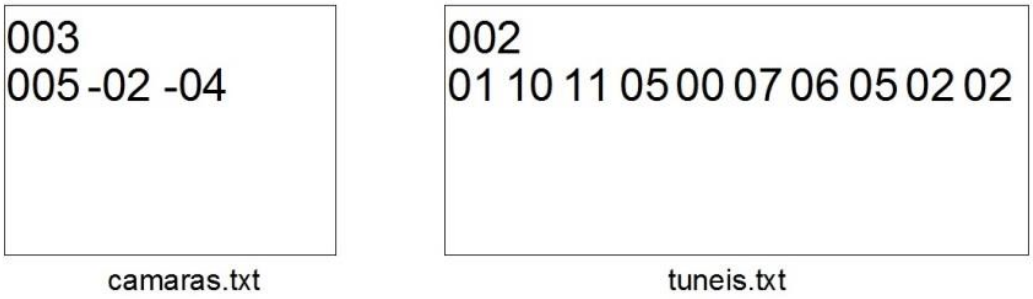

Figura 6.6: Estrutura dos arquivos de entrada do AG.

Para que o AG possa ler o arquivo txt e identificar as informações ali contidas é fundamental que seja indicado o tamanho de cada informação. No caso das temperaturas são informados um tamanho de três *bits* e no caso do tempo dos túneis as informações são de dois *bits.* O ScadaBR® grava no início do arquivo *txt* o número de *bits* que identifica o tamanho da informação.

Tabela 6.2: *Datapoints* e *Datasouces* tratados no supervisório

Datasource	*Datapoint*	
	Atuador/Sensor	*Bit*
Compressores	Relé	*bit* 0 = Desligado
		bit 1 = Ligado
Forçadores	Relé	*bit* 0 = Desligado
		bit 1 = Ligado
	Sensor	*bit* 0 = Porta aberta = *Script* zera a contagem do tempo
		bit 1 = Porta fechada = *Script* inicia contagem de tempo
Câmaras	Relé	*bit* 0 = Ventilador desligado
		bit 1 = Ventilador ligado
	Sensor	*value* = Valor numérico = *Script* multiplica pela constante do sensor de temperatura
Sensores	Sensor de corrente	*bit* 0 = Situação elétrica ok – CEMIG
		bit 1 = Situação elétrica falha – USINA
	Sensor de pressão	*value* = Valor numérico = as informações das pressões nos túneis são mostradas na tela

As temperaturas das câmaras são coletadas por sensores de temperatura e enviadas ao sistema supervisório. Esta informação é processada pelo *script* dos *datapoints* destes sensores. Como a temperatura é enviada em valores de tensão, basta multiplicar este valor por uma constante fornecida pelo fabricante do sensor para obter o valor da temperatura. O tempo que o produto fica dentro dos túneis é registrado como uma grandeza natural, isto é, os *datapoints* de tempo dos túneis são simplesmente números inteiros que se incrementam automaticamente a cada hora. Toda vez que a porta se abre, o que indica retirada ou colocação de produto nos túneis esta grandeza é zerada pelo supervisório. Estes valores são coletados pelos sensores e disponibilizados em um arquivo TXT onde serão utilizados pelo AG.

O AG gera um novo indivíduo a cada 30 minutos, mesmo tempo em que as informações do ambiente são gravadas. Isso permite que um indivíduo seja sempre indicado para o momento produtivo. Pela Tabela 3.1 percebe-se que são

25 elementos a serem controlados. O AG fornece um indivíduo binário com 25 *bits*, seguindo a ordem dos equipamentos existentes na Tabela 3.1, isto é, o *bit* mais significativo representa o motor do compressor 1 e assim sucessivamente. O sistema supervisório deve ser capaz de identificar o indivíduo, após converte-lo de binário para um valor decimal.

O sistema supervisório monitora todos os equipamentos, temperatura das câmaras e pressão dos tubos de amônia. O acionamento automático, retirada das cargas não prioritárias acontece nos instantes de falha no fornecimento de energia ou agendado para o horário de ponta. Entretanto, o sistema permite intervenção do operador, controlando os equipamentos remotamente. O fluxograma mostrado na Figura 6.7 apresenta o *script* principal do ScadaBR®.

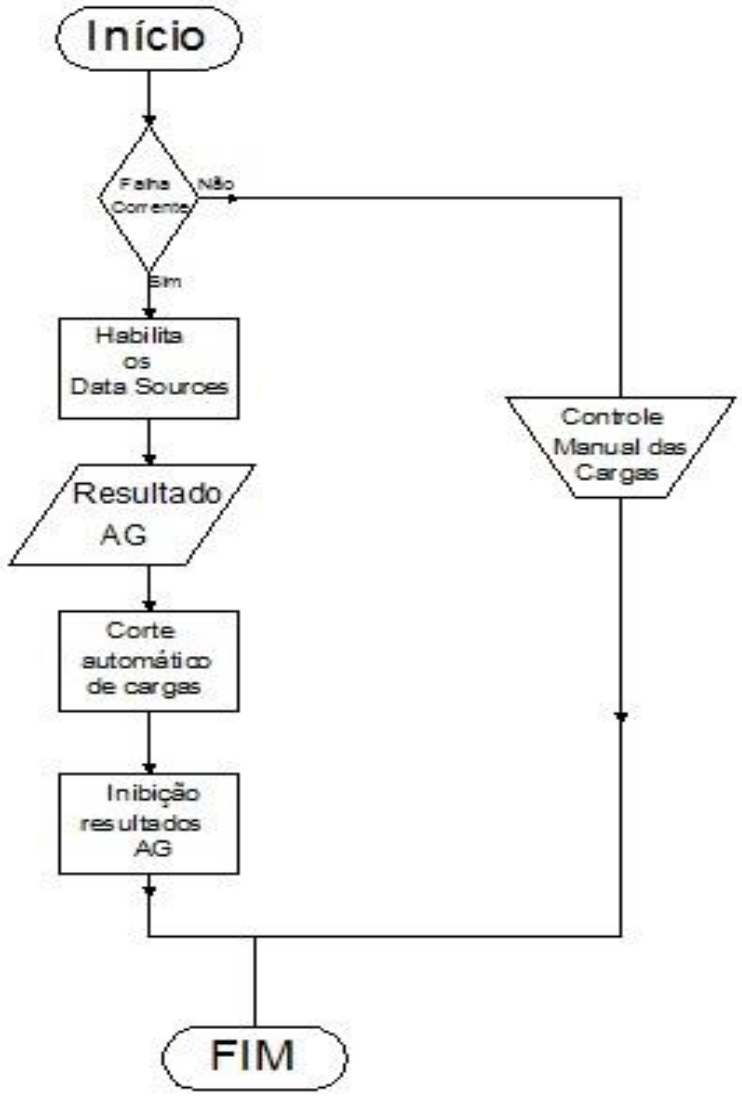

Figura 6.7: Fluxograma do *script* principal do sistema supervisório.

Para cada equipamento a ser controlado, deve-se criar um *Datapoint*, definindo que se trata de um equipamento conectado na plataforma Radiuino, e definir quais os *bits* correspondentes a este equipamento. A comunicação na plataforma Radiuino se dá nos padrões do protocolo TCP/IP com 52 *bits*. Cada três *bits* equivale a um determinado equipamento. Desta forma, é necessário apenas vincular o *datapoint* criado aos *bits* que os representam, *bits* gravados no *firmware* de cada rádio configurado anteriormente. Também na criação deste *datapoint* é fundamental não inibir o acesso manual ao controle do equipamento, ou seja, o operador do sistema poderá controlar o equipamento remotamente mesmo quando o sistema não for ativado automaticamente.

Os sensores enviam os valores de temperatura e tempo do produto nos túneis periodicamente a cada 30 minutos. Estes valores são lidos pelo ScadaBR® e gravados no formato txt, conforme mostrado na Figura 6.6. O AG lê estes arquivos txt e calcula o melhor individuo para aquele momento específico; tem-se, então um indivíduo diferente no período de 30 minutos. Este indivíduo calculado pelo AG é representado por um número decimal e gravado no formato txt.

O *software* ScadaBR®, recebe o indivíduo definido pelo AG e armazena no seu banco de dados. Na ocorrência de falha no fornecimento de energia ou no período de ponta, o sistema supervisório assume o indivíduo fornecido pelo AG e envia um sinal binário aos controladores instalados em cada equipamento do sistema produtivo. Este sinal binário define qual equipamento será desligado: 1 mantêm ligado e 0, desligado. A verificação de falhas no fornecimento de energia é realizada por um sensor de corrente instalado na entrada de energia da empresa, conectado, também via rádio à base instalada no computador principal. O *software* supervisório é ativado pelo sensor de corrente ou pelo temporizador.

Durante todo o processo é possível acompanhar o funcionamento de todos os equipamentos na tela do sistema supervisório, verificando quais foram desligados e quais foram mantidos ligados. É possível ainda acompanhar os valores medidos de temperatura e pressão de todos os pontos da fábrica.

O AG fornece um indivíduo de 25 *bits*, sendo que cada *bit* representa um equipamento do sistema produtivo. A Tabela 6.3 mostra a relação de cada *bit* do

indivíduo com o equipamento a ser controlado e o peso numérico de cada indivíduo.

Tabela 6.3: Correspondência entre o *bit* do indivíduo, com o equipamento e o seu peso em decimal

Bit	Equipamento	Peso numérico
24	Compressor Co_1	2^{24} = 16777216
23	Compressor Co_2	2^{23} = 8388608
22	Compressor Co_3	2^{22} = 4194304
21	Compressor Co_4	2^{21} = 2097252
20	Compressor Co_5	2^{20} = 1048576
19	Compressor Co_6	2^{19} = 524288
18	Compressor Co_7	2^{18} = 262144
17	Compressor Co_8	2^{17} = 131072
16	Compressor Co_9	2^{16} = 65536
15	Compressor Co_{10}	2^{15} = 32768
14	Compressor Co_{11}	2^{14} = 16384
13	Compressor Co_{12}	2^{13} = 8192
12	Forçador Túnel Ft_1	2^{12} = 4096
11	Forçador Túnel Ft_2	2^{11} = 2048
10	Forçador Túnel Ft_3	2^{10} = 1024
09	Forçador Túnel Ft_4	2^{9} = 512
08	Forçador Túnel Ft_5	2^{8} = 256
07	Forçador Túnel Ft_6	2^{7} = 128
06	Forçador Túnel Ft_7	2^{6} = 64
05	Forçador Túnel Ft_8	2^{5} = 32
04	Forçador Túnel Ft_9	2^{4} = 16
03	Forçador Túnel Ft_{10}	2^{3} = 8
02	Forçador Câmara Fc_1	2^{2} = 4
01	Forçador Câmara Fc_2	2^{1} = 2
00	Forçador Câmara Fc_3	2^{0} = 1

O número decimal fornecido pelo AG é formado pela soma dos números mostrados na Tabela 6.3. Cada *bit* do resultado corresponde a um peso numérico, estes, por sua vez, estão contidos no resultado final. Cada relé responsável pelo

acionamento dos equipamentos controlados está atrelado a um *datapoint* do supervisório e ao *script* 1.

Script 1: rotina simulada para cada equipamento.

Se (*MatLab.value* “and” “peso numérico“)

retorna verdadeiro;

caso contrário

retorna falso;

sendo *MatLab.value* o valor do indivíduo decimal lido pelo *software*, e “peso numérico” o valor mostrado na Tabela 6.3 associado a cada equipamento a ser controlado.

Entretanto, o sistema supervisório não processa a rotina anterior, enquanto o *script* 2 não autorizar o processamento do *script* 1.

Script 2: Status do sensor de corrente:

se (*status* == verdadeiro)

DS.*disableDataSource*('DS_936483');

caso contrário

DS.*enableDataSource*('DS_936483');

O sensor de corrente ou a programação do temporizador ativa este *bit* de *status*, ativando então os *Datasources*. Toda vez que o *status* for igual a 1, as cargas desnecessárias serão desligadas (*bit* 0), e na entrada da co-geração as cargas fundamentais continuarão em funcionamento (*bit* 1).

O AG escolhe o melhor indivíduo em função das temperaturas das câmaras, do tempo do produto dentro dos túneis e realiza os cálculos baseado nas potências máximas de cada carga. Um sistema de refrigeração é diretamente influenciado pela temperatura ambiente e muitas vezes os compressores não atuam com sua potência máxima. O *designer* gráfico do *software* ScadaBR® somado aos valores instantâneos das temperaturas, pressão e energia consumida facilita ao operador o acompanhamento detalhado da produção, e permite que o mesmo insira cargas

menores no sistema, quando verificar que o consumo de energia está abaixo do máximo gerado pela usina própria da empresa.

A simulação do processo de controle foi realizada no galpão da empresa Spreadcom, situado à Rua Lauro Vannucci 1020, Jardim Santa Cândida, Campinas. (Radiuit, empresa fabricante do rádio BEE900). Foi montado uma rede de sensores sem fio com 27 nó sensores, um microcomputador conectado a uma base do rádio BEE900 ligado a uma antena direcional. A Figura 6.8 mostra os componentes das placas dos nós sensores utilizado na simulação.

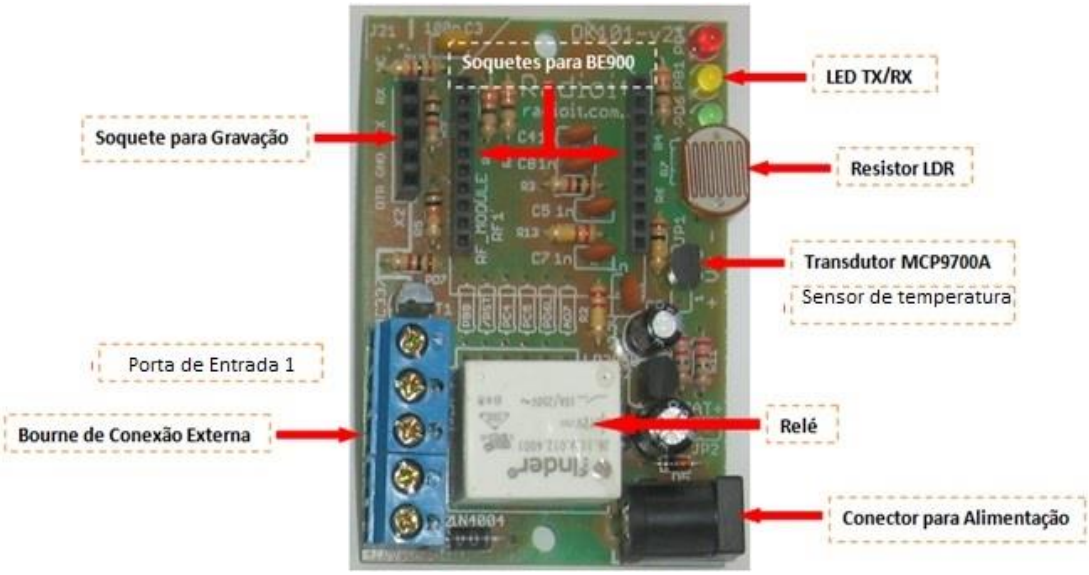

Figura 6.8: Placa do nó sensor

A rede de sensores ficou configurada conforme Tabela 6.4. As grandezas a serem medidas, temperaturas e tempo de fechamento dos túneis, foram geradas da seguinte maneira: o transdutor MCP9700A envia um valor de tensão que deve ser multiplicado por um fator de ajuste fornecido pelo fabricante. Desta forma a temperatura é informada ao sistema. Este fator de ajuste foi alterado a fim de definir a temperatura ambiente como -10 °C. A simulação do aquecimento das câmaras era realizado através do aquecimento do transdutor. A abertura das portas dos túneis foi simulada através de chaves ligadas na porta de entrada 1. A abertura da porta envia um sinal ao ScadaBR®, e neste instante o *datapoint* relacionado ao sensor mostrava um valor elevado de tempo (15 horas). De forma análoga, no fechamento da porta, o sinal deixava de ser enviado e o *datapoint* iniciava uma contagem de tempo, iniciando em zero. Para fins de simulação os

tempos utilizados foram de minutos, sendo que cada minuto representava uma hora.

Tabela 6.4: Configuração da rede de sensores utilizada na simulação

Sensor	Equipamento	Componente da placa
01	Compressor Co_1	Relé
02	Compressor Co_2	Relé
03	Compressor Co_3	Relé
04	Compressor Co_4	Relé
05	Compressor Co_5	Relé
06	Compressor Co_6	Relé
07	Compressor Co_7	Relé
08	Compressor Co_8	Relé
09	Compressor Co_9	Relé
10	Compressor Co_{10}	Relé
11	Compressor Co_{11}	Relé
12	Compressor Co_{12}	Relé
13	Forçador Túnel Ft_1	Relé
	Sensor de porta t_1	Porta de entrada 1
14	Forçador Túnel Ft_2	Relé
	Sensor de porta t_2	Porta de entrada 1
15	Forçador Túnel Ft_3	Relé
	Sensor de porta t_3	Porta de entrada 1
16	Forçador Túnel Ft_4	Relé
	Sensor de porta t_4	Porta de entrada 1

Sensor	Equipamento	Componente da placa
17	Forçador Túnel Ft_5	Relé
	Sensor de porta t_5	Porta de entrada 1
18	Forçador Túnel Ft_6	Relé
	Sensor de porta t_6	Porta de entrada 1
19	Forçador Túnel Ft_7	Relé
	Sensor de porta t_7	Porta de entrada 1
20	Forçador Túnel Ft_8	Relé
	Sensor de porta t_8	Porta de entrada 1
21	Forçador Túnel Ft_9	Relé
	Sensor de porta t_9	Porta de entrada 1
22	Forçador Túnel Ft_{10}	Relé
	Sensor de porta t_{10}	Porta de entrada 1
23	Forçador Câmara Fc_1	Relé
	Sensor de temperatura tc_1	Sensor de temperatura
24	Forçador Câmara Fc_2	Relé
	Sensor de temperatura tc_2	Sensor de temperatura
25	Forçador Câmara Fc_3	Relé
	Sensor de temperatura tc_3	Sensor de temperatura
26	Sensor de Corrente	Porta de entrada 1
27	Sensor de Pressão	Porta de entrada 1

A abertura das portas dos túneis foi simulada através de chaves ligadas na porta de entrada 1. A abertura da porta envia um sinal ao ScadaBR®, e neste instante o *datapoint* relacionado ao sensor mostrava um valor elevado de tempo (15 horas). De forma análoga, no fechamento da porta, o sinal deixava de ser enviado e o *datapoint* iniciava uma contagem de tempo, iniciando em zero. Para fins de simulação os tempos utilizados foram de minutos, sendo que cada minuto representava uma hora.

Para o sensor de corrente, o procedimento foi semelhante ao dos sensores de porta; uma chave simulava a existência ou não de corrente na entrada de energia.

Os compressores, forçadores de túneis e forçadores de câmaras foram simulados com lâmpadas conectadas aos relés. Vale destacar que, como os oito compressores maiores permitem ajuste de potência, foi criado uma variável aleatória de valor entre 0,6 a 1,0. Esta variável multiplica a potência máxima dos compressores afim de simular momentos que os mesmos estejam trabalhando com uma potência inferior a potência máxima.

Um computador com processador Intel i3 com 4 GBytes de memória RAM foi utilizado. Os *softwares* utilizados foram: ScadaBR 1.0, Radiuino (plataforma *open source* Scada BR adaptado para funcionamento direto com Radiuino) e MatLab®; 7, 64 *bits*.

Os valores das temperaturas e da pressão nos túneis foram alterados aleatoriamente dentro da faixa definida na Tabela 6.5. Após vários testes, 90% dos indivíduos gerados pelo AG apresentaram consumo inferior ao máximo limitado pela geração própria, existindo, uma sobra de energia, isso porque em muitos momentos os compressores (cargas mais significativas) apresentavam consumo inferior ao valor máximo. As mudanças das temperaturas e pressão durante o uso da geração própria faz com que o AG apresente indivíduos diferentes do escolhido.

A fim de evitar que cargas de grande porte (compressores de 800 cv) sejam desativadas ou ativadas com frequência elevada, devido a uma mudança de indivíduo, o sistema supervisório bloqueia a leitura do arquivo txt, no momento em

que o *script* 2 atua. Neste instante toda alteração acontece de maneira remota mais somente através dos comandos do operador, evitando, assim que estes motores de grande porte sejam danificados, e piore a qualidade do fornecimento de energia. Contudo os valores de consumo instantâneos, fornecidos pelo sensor de corrente, permitem ao operador modificar o *status* das cargas pequenas ajustando o sistema produtivo à nova situação de pressão e temperatura, aumentando assim a eficiência do sistema.

Tabela 6.5: Faixas das temperaturas e pressão utilizadas.

Faixa de Temperatura (°C)	Faixa de Pressão (Kgf/cm^2)
-10 a 10	7,0 a 8,3

6.4 RESULTADOS DO CORTE DE CARGAS VIA RSSF

A tela de controle do ScadaBR é mostrada na Figura 6.9, indicando o controle da temperatura, *status* dos ventiladores e o comparativo de demanda máxima, calculada e a medida.

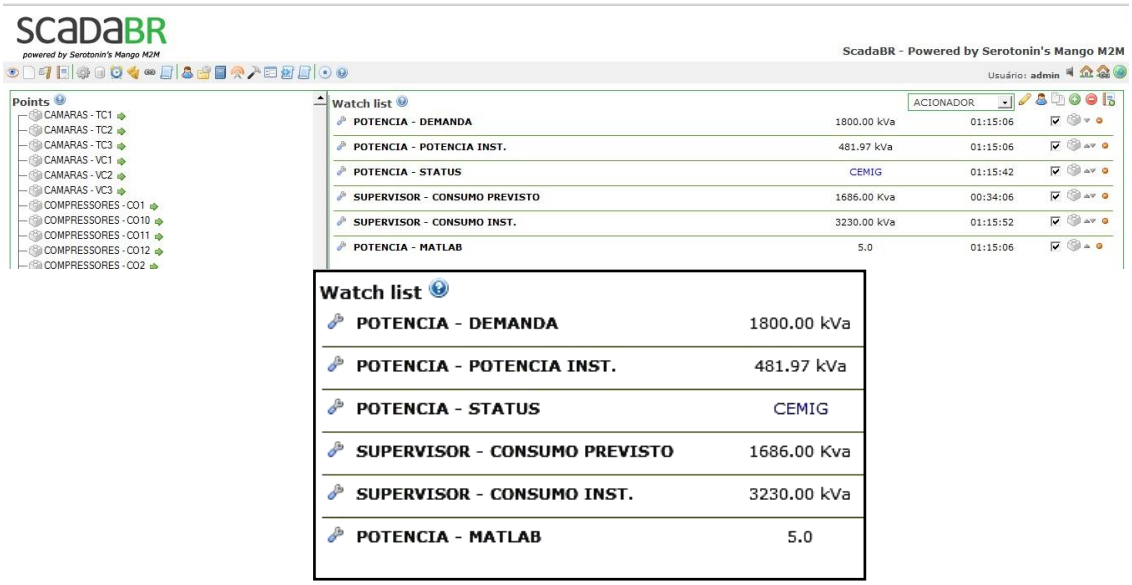

Figura 6.9: Tela de controle quando a energia é fornecida pela concessionária

Nesta aplicação verifica-se que o consumo instantâneo é superior a 1800 kVA, uma vez que o *status* do fornecimento está indicado como concessionária, ou seja a energia não está sendo gerada pela usina própria.

Quando ocorre uma falha, ou no horário de ponta, o sensor de corrente indica a falha e o sistema assume o indivíduo proposto pelo AG. Neste caso, imediatamente a demanda máxima passa a ser de 1800 kVA (Figura 6.10).

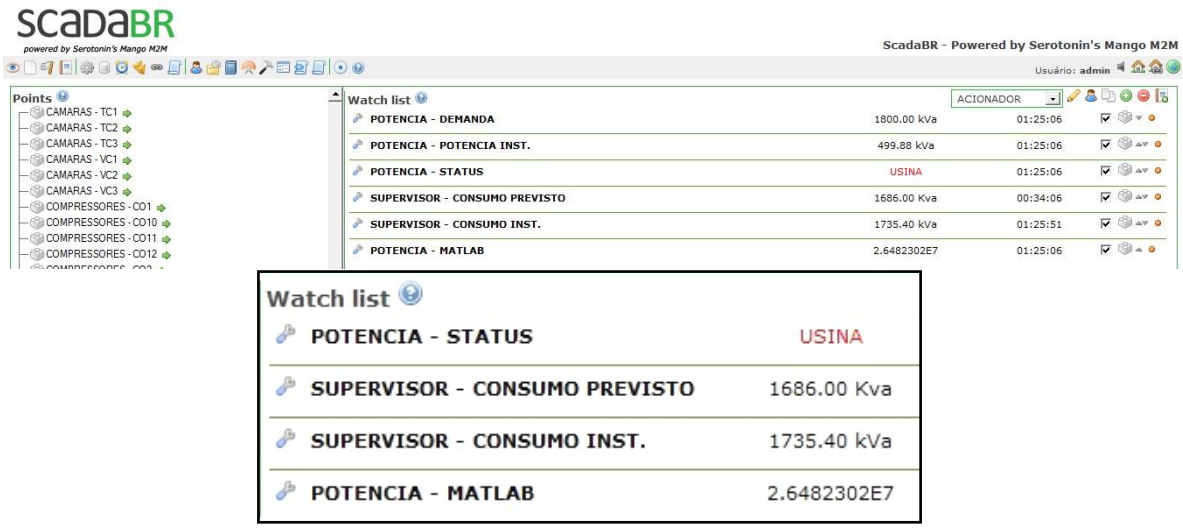

Figura 6.10: Tela de controle quando a energia é fornecida pela cogeração

Percebe-se que a demanda de potência prevista utilizando o indivíduo gerado pelo AG é de 1686 kVA. Porém, devido aos muitos motores não estarem operando com a potência máxima, o consumo inicial é de aproximadamente 1250 kVA. O medidor de corrente indica um consumo bem abaixo da configuração proposta pelo indivíduo selecionado pelo AG. Portanto, para o indivíduo gerado pelo AG, a planta poderá consumir até 1686 kVA, uma vez que os valores usados na função peso do AG foram as potências máximas de cada máquina, não levando em consideração a possibilidade de algumas máquinas estarem operando com potência inferior a máxima.

Neste caso, o operador do sistema pode acionar outras máquinas menores, que inicialmente foram descartadas pelo AG, otimizando assim a produção. Como o sistema inibe a solução apresentada pelo AG no momento que o *status* está como “usina”, o operador deve assumir todo o controle das máquinas, via controle remoto. A tela do ScadaBR permite acompanhar o consumo instantâneo. Com a atuação do operador, através do ScadaBR, a inserção de máquinas menores fazem o consumo aumentar para 1735,4 kVA, que continua inferior ao máximo permitido, porém aumenta o consumo e consequentemente a produção naquele momento. Um ponto importante neste sistema é que as operações produtivas da

empresa irão alterar os valores das temperaturas das câmaras e a pressão de amônia nos túneis. Estas alterações são facilmente percebidas pelo operador na tela do ScadaBR e o mesmo pode desligar ou ligar máquinas menores para equilibrar todo o processo produtivo sem permitir a extrapolação do consumo. O comportamento da demanda medida na empresa é mostrado na Figura 6.11.

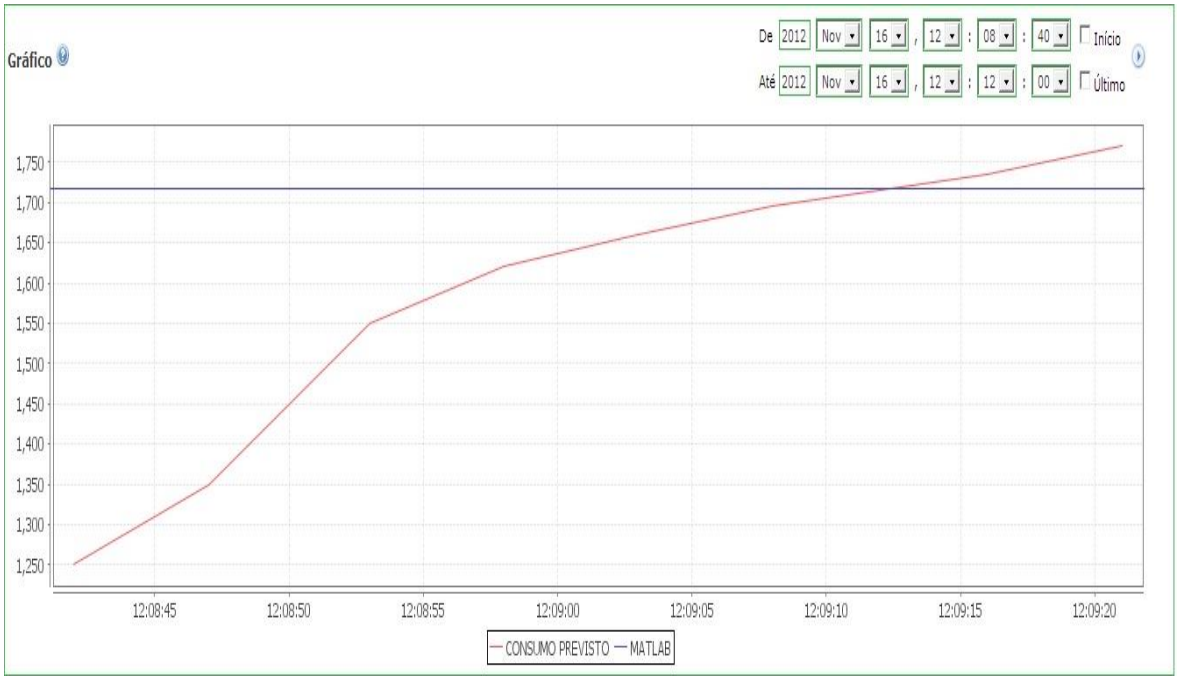

Figura 6.11: Valores de consumo medidos e propostos pelo indivíduo gerado pelo AG.

O aumento da temperatura das câmaras e o consequente acionamento dos ventiladores das câmaras para o resfriamento provoca uma queda de pressão nos túneis. O procedimento contrário, isto é, a retirada dos ventiladores das câmaras provoca o consequente aumento da pressão nos túneis. Como o valor da pressão deve ficar entre 7,0 a 8,3 Kgf/cm^2 e o consumo, quando a energia está sendo fornecida pela usina, está limitado em valores inferiores ao necessário para manter a produtividade da empresa, somente com um sistema supervisório é possível manter a pressão dentro da faixa indicada sem a preocupação de extrapolar o valor máximo de demanda. O operador pode atuar nos forçadores dos túneis e visualizar os valores da pressão e consumo de energia deixando-os dentro dos limites aceitáveis.

O sistema supervisório utiliza o indivíduo calculado pelo AG para assumir um valor inicial de um conjunto de cargas. Porém, nada impede de alterar esta combinação de cargas inicial, aumentando a produtividade sem levar a empresa a um colapso de energia. A associação do sistema supervisório ScadaBR com uma RSSF permite a atuação rápida e eficiente do controle das cargas.

6.5 CONCLUSÃO

Em caso de falhas, o sistema de cogeração entra em funcionamento em 15 segundos. Uma rede de sensores sem fio, que capta e modela o sistema produtivo em tempo real, sendo capaz de fornecer o perfil instantâneo de consumo, associada ao sistema supervisório consegue atuar nas cargas em um tempo médio inferior a 1 segundo. Essa rapidez da rede de sensores impede que o sistema de proteção da usina atue, levando o sistema ao colapso e consequente paralisação total.

Associado a esta combinação, o algoritmo genético define a melhor combinação inicial de cargas em funcionamento. Porém, variações na produção industrial poderão passar por pequenos ajustes definidos pelo sistema supervisório, evitando mudanças desnecessárias das condições de trabalho de cargas maiores.

Esta plataforma mostrou ser uma ferramenta eficiente no corte inteligente de cargas industriais em momentos de contingência.

CAPÍTULO 7

CONCLUSÃO

7.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho, é proposto um sistema supervisório que faz a interface entre o algoritmo genético proposto em Costa *et al., (*2012) e uma rede de sensores sem fio. Esta tem como função proporcionar a telemetria, o telecomando e a telesupervisão para o controle da demanda de energia de uma planta industrial do ramo de alimentos Dados do sistema elétrico e produtivo obtidos desta planta foram usados para testar a montagem e implementação deste sistema de telecontrole.

A motivação para o desenvolvimento deste trabalho veio pela observação e estudo da proposta apresentada por Costa *et al*., (2012). No trabalho percebe-se que a eficiência do algoritmo genético na determinação da combinação de cargas que devem permanecer ativas fica um pouco ofuscada pelo fato de que ~~a~~ os acionamentos das cargas devem acontecer manualmente.

A ferramenta proposta em Costa *et al*., (2012) é eficiente no horário de ponta, mas não mantém a qualidade da energia elétrica em casos de falhas do fornecimento. Nestas situações de falhas, a rede elétrica da concessionária interrompe o fornecimento de energia, e como consequência, a produção da empresa fica comprometida por um determinado momento, até que algumas cargas sejam reativadas.

O algoritmo genético utiliza os valores de temperatura das câmaras e tempo do produto dentro dos túneis como dados de entrada. Estas informações são fundamentais para a definição da melhor combinação de cargas. O processo produtivo é um processo dinâmico; portanto tais variáveis sofrem variações**.** O

indivíduo inicialmente proposto pelo AG pode, depois de uma hora, não ser o mais adequado.

O AG associado com um sistema supervisório e a dispositivos que permitam coletar, com eficiência e rapidez, as informações do ambiente e concomitantemente atuar nesses equipamentos de forma a garantir a qualidade da energia, preservando o processo produtivo, compõem uma ferramenta poderosa no monitoramento, controle e supervisão certificando o conceito da *Internet* das Coisas.

No Capítulo 2 foram apresentados os conceitos básicos de rede de computadores e características básicas das redes. O protocolo TCP/IP muito comum nas redes de computadores e também utilizado na rede de sensores sem fio também foi mostrado. A justificativa da escolha da plataforma Radiuino também foi apresentada no capítulo 2.

Antes da implementação do projeto é fundamental um estudo do ambiente industrial onde será instalada a RSSF. Através deste estudo define-se principalmente as potências dos nós sensores, tipos de antenas a ser utilizado, dentre outras variáveis. Este passo é importante para garantir a confiabilidade do sistema de rádio.

Como o dimensionamento da arquitetura da rede foi embasada na Equação 3.6 e na escolha da plataforma Radiuino, surgiu a dúvida se esta rede de sensores teria a eficiência e confiabilidade para atuar em um ambiente industrial, submetido a radiação de baixa frequência, a transitórios provenientes de chaveamento e à proximidade da rede elétrica de 13,8 KV. Apesar de existirem vários meios de avaliar a qualidade de um sinal de comunicação, realizou-se um teste para avaliar o índice indicador da potência do sinal recebido (RSSI). A verificação do *path loss* para situações distintas, mostrou que a RSSF a 915 MHz não sofreu influência da radiação de baixa frequência. Isto posto, os testes com a RSSF e o sistema supervisório foram realizados e avaliado o tempo de ação dos controladores.

Nos testes realizados verificou-se que os nós sensores atuaram no sistema em média com um tempo inferior a 1 segundo. Como o sistema de proteção da usina atua em 15 segundos, este sistema de controle permite uma ação rápida o suficiente para garantir a qualidade da energia e, consequentemente, inibir a

queda do fornecimento de energia e paralização da produção.

A utilização do AG como instrumento eficaz no processo decisório, associada a instrumentos que permitam alimentar o AG com as informações do ambiente a ser controlado e, concomitantemente, atuar no ambiente em tempo real, é uma ferramenta eficaz no controle e monitoramento de cargas nas indústrias.

Estes recursos podem ser utilizados para monitorar transformadores de rede de distribuição, gerenciamento do sistema elétrico de uma determinada indústria, dentre outras situações. Vale destacar a versatilidade da RSSF quanto ao seu uso e a eficiência de sua associação com outras ferramenta tornar um controle elétrico mais eficiente.

7.2 SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS

Com base nos estudos que foram realizados nesta dissertação é possível apontar as seguintes sugestões para trabalhos futuros:

- estabelecer regras *fuzzy* para o problema, para deixar o sistema totalmente automático, não necessitando a intervenção do ser humano. Baseado nas duas variáveis fundamentais do processo produtivo: pressão da tubulação de amônia e sobra de energia, é possível criar meios para que o sistema supervisório otimize o consumo de energia e até mesmo ajuste o indivíduo gerado pelo algoritmo genético quando necessário;
- a rede de sensores permite controlar 255 nós sensores para cada base de rádio conectada ao microcomputador, o aumento do número de situações (pontos de operação) do sistema a serem simuladas permitiram um melhor controle de toda a empresa e não tão somente de um setor,
- modificar o tipo de controle dos oito primeiros compressores utilizando inversores de frequência para um ajuste fino e mais suave no consumo de energia.
- testar esta proposta de controle de demanda na planta real.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ALLEN, W.; LEE, T. **Esquema de rejeição de cargas flexível e de alta velocidade utilizando crosspoint switchs**. Artigo técnico da Schweitzer Engineering Laboratories, Comercial Ltda, 2005.
2. BERGONSO, Carlos Alberto Terçariol. **Método para Avaliação de aspectos de camada física e MAC de redes 802.11**. Dissertação (Mestrado em Gestão de Redes de Telecomunicações) – Pontifícia Universidade Católica de Campinas. Centro de Ciências Exatas, Ambientais e de Tecnologias, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Campinas, 2012 .
3. BRANQUINHO, O. **Radiuino**. Disponivel em: <http://www.radiuino.cc> Acesso em: 10 set. 2011.
4. BROLIN, L. C. **Análise de planos de corte de carga através de métodos diretos.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 2010.
5. BUSSAB, Wilton O.; MORETTIN, P. A. **Estatística Básica**. 5ª Edição. São Paulo: Saraiva, 2010, p. 103-140.
6. CHRISTIN, Delphine; MOGRE, Parag S.; HOLLICK, Matthias. **Survey on wireless sensor network technologies for industrial automation: the security and quality of service perspectives.** Future *Internet*, v. 2, n. 2, p. 96-125, 2010.
7. CIRED WORKING GROUP 04.Dispersed generation.**CIRED Preliminary Report for Discussion at CIRED Nice 1999**.1999. 42 p. Disponível em <http://www.cired.be>. Acesso em: 20 dez. 2011.
8. COMPANHIA PAULISTA DE FORÇA E LUZ (São Paulo, SP). **Ligação de autoprodutores em paralelo com o sistema de distribuição da CPFL,** Versão 1.2. São Paulo, 2005.

9. COSTA, Eduard Montgomery Meira. **Introdução aos Sistemas a Eventos Discretos e à Teoria de Controle Supervisório**. 1ª Edição. São Paulo: Alta Books, 2005.

10. COSTA, M. H., SILVA, V. V. R., RESENDE L. C.; **Otimização do corte de carga em um sistema industrial utilizando algoritmo genético**. 10th IEEE/IAS International Conference on Industry Applications, X INDUSCON, Fortaleza, Ceará, 2012.

11. COSTA, M. H., SILVA, V. V. R., RESENDE, L. C. **Controle de demanda por corte ideal de cargas em tempo real de um processo produtivo via algoritmo genético**. In: SIMPOSIO IBERO-AMERICANO DE APLICACIONES Y TECNOLOGÍAS DE INFORMACIÓN Y COMUNICACIONES, 2012, Orlando. **Anais**, Orlando: ATIC, 2012.

12. DA SILVA, Huederson Aparecido Botura. **Utilização da frequência de 915 Mhz para monitoramento e supervisão de isoladores poliméricos classe de tensão de 500 kV**. 273 f. Dissertação (Mestrado em Gestão de Redes de Telecomunicações) – Pontificia Universidade Católica de Campinas. Centro de Ciências Exatas, Ambientais e de Tecnologias, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Campinas, 2012.

13. DANEELS, Axel, SALTER, Wayne (autores). **What is scada?**. CERN 2000 -- European Organization for Nuclear Research. Disponível em: <http://ref.web.cern.ch/ref/CERN/CNL/2000/003/scada/>. Acesso em 15 de agosto de 2011.

14. DANTAS, Carlos Alberto Barbosa. **Probabilidade:** Um Curso Introdutório. 2ª Edição. São Paulo: Edusp, 2000. P. 183-220.

15. DANTAS, Mario. **Tecnologias de redes de comunicação e computadores**. 1ª Edição. Axcel Books, 2002.

16. DARGIE, Waltenegus; POELLABAUER, Christian. **Fundamentals of wireless sensor networks:** theory and practice: Wireless Communications and Mobile Computing. 1ª Edição. Wiley. com, 2010.

17. DESMONTA&CIA. **ZigBee ou IEEE 802.15.4**: Conheça a tecnologia a fundo. Desmonta&CIA. 2010. Disponível em:

18. <http://desmontacia.wordpress.com/2011/02/22/zigbee-ou-ieee-802-15-4-conhea-a-tecnologia-a-fundo/> . Acesso em: 12 fevereiro 2013.

19. DUGAN, R. C., BEATY, W., MCGRANAGHAN, M. F. **Electric power systems quality**. McGraw-Hill, 2002.

20. FOROUZAN, Behrouz A. **Comunicação de dados e redes de computadores**. Porto Alegre: Bookman, 2006.

21. HOLLAND, John H. **Adaptation in natural and artificial systems:** An introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence. MIT Press Cambridge, MA, USA, 1992.

22. IEEE POWER ENGINEERING SOCIETY. **IEEE Guide for the application of protective relays used for abnormal frequency load shedding and restoration**, 2007. IEEE Std C37.117-2007 pp. c1–43.

23. IEEE SPECTRUM. 2011. Disponível em: <http://online.qmags.com/IEEESM0111> Acesso em: 18 ago. 2012.

24. ILYAS, Mohammad; MAHGOUB, Imad. **Handbook of sensor networks:** compact wireless and wired sensing systems. CRC press, 2004.

25. INTEGRATING an Industrial Wireless Sensor Network with Your Plant's Switched Ethernet and IP Network. Disponivel em <http://www.cisco.com/web/strategy/docs/manufacturing/swpIIWS_Emerson_wp.pdf> Acesso em: 10 de setembro de 2011

26. INTERNET OF THING, Cisco. 2009. Disponivel em: http://www.cisco.com/web/solutions/trends/iot/overview.html>. Acesso em: 10 out. 2012.

27. JENKINS, N; CROSSLEY, P; KIRSCHEN, D; STRBAC, G. **Embedded generation**. Londres: The Institute of Electrical Engineers (IEE), 2002, p. 292.

28. KARL, Holger; WILLIG, Andreas. **Protocols and architectures for wireless sensor networks**. 1ª Edição. Wiley-Interscience, 2007.

29. KOCHHANN**,** Roscéli. **Rádio e tecnologias**: A produção de radiojornalismo da Guaíba, em ambiente de convergência. 169 f. Dissertação (Mestrado em Comunicação) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2012.

30. KOZA, John R. **Genetic Programming: On the programming of computers by means of natural selection:** complex adaptive systems. MIT press, 1992. Hardcover. ISBN 0262111705.

31. KUNDUR, P., MORISON, G. K. **A review of de.nitions and classification of stability problems in today´s power systems**. New York: IEEE PES Meeting, 2010.

32. KUROSE, J.; ROSS, K. **Computer networks**: A top down approach featuring the internet. 2ª Edição. Addison Wesley, 2002.

33. LATHI, Bhagwandas Pannalal. **Signal processing and linear systems**. Berkeley Cambridge Press, 1998.

34. LINDEN, Ricardo. **Algoritmos Genéticos.** 3ª Edição. Ciência Moderna, 2012.

35. LUGER, George F. **Inteligência artificial:** estruturas e estratégias para a solução de problemas complexos. 4ª Edição. Bookman, 2004.

36. LUQUETA, G. R.; BRANQUINHO, O. C; BIANCHINI, D. Caracterização da propagação de redes de sensores sem fio em ambientes industriais utilizando a RSSI como parâmetro de avaliação. In: Simpósio Brasileiro de Micro-ondas e Optoeletrônica 10, João Pessoa, 2012.

37. MALAQUIAS, N. G. L. **Uso dos algoritmos genéticos para a otimização de rotas de distribuição**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Uberlândia, Minas Gerais, 2006.

38. MCROBERTS, Michael. **Beginning Arduino**. New York: Publisher Apress, 2010.

39. MELLO, Alexandre JTS; LÜDERS, Ricardo; NEVES JR, Flávio. **Uma rede de sensores para monitoração da proteção catódica em dutos**. 4o PDPETRO, ABPG, Campinas, 2007. SP 3.1.0192-1 – 1.

40. NASCIMENTO, Juarez. **Telecomunicações**. 2ª Edição. Makron Books, 1999, p. 07-19.

41. NORDMAN, Mikael. **An architecture for wireless sensors in distributed management of electrical distribution systems**. Helsinki: Helsinki University of Technology, 2004.

42. OLIVEIRA, André Schneider; ANDRADE, Fernando Souza. **Sistemas embarcados: hardware e firmware na prática**. São Paulo: Editora Érica Ltda, 2008.

43. OXER, Jonathan; BLEMINGS, Hugh. **Practical Arduino: cool projects for open source hardware**. Apress, 2009.

44. PAAVOLA, Marko; LEIVISKA, Kauko. **Wireless sensor networks in industrial automation**. Finland: University of Oulu, Control Engineering Laboratory, 2010.

45. PARNIANI, M.; NASRI, A. **SCADA based under frequency load shedding integrated with rate of frequency decline**. Em: Power Engineering Society General Meeting, 2006. IEEE, 2006. p. 6 pp.

46. PAULO, A. R. **Controlo Preditivo sobre Redes de Sensores e Actuadores Sem Fios com Tolerância a Falhas de Comunicação.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores) – Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2010.

47. RAPPAPORT, Theodore S. **Wireless communications:** principles and practice. 2ª Edição. Dorling Kindersley, 2009.

48. SALLES, N. J. **Modelagem e análise dinâmica de sistemas de proteção de redes de distribuição de energia elétrica na presença de geradores síncronos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Faculdade de Engenharia Elétrica e Computação, Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2007.

49. SHOKOOH, F., Dai, J., SHOKOOH, S., TASTER, J., CASTRO, H., KHANDELWAL, T; DONNER, G. **An intelligent load shedding (ils) system application in a large industrial facility**. In: Industry Applications Conference 4, 2005.IAS 1: 417–425 Vol. 1. 2005

50. STALLINGS, William. **Wireless Communications & Networks.** 2ª Edição. Prentice Hall, 2004.

51. TANENBAUM, Andrew. S. **Redes de Computadores**. 4ª Edição . Rio de Janeiro: Editora Campus 2003.

52. TECHNOLOGY REVIEW, Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology. 2003. Disponível em: < http://www2.technologyreview.com/pt/ > .Acesso em: 16 jul. 2012.

53. TERUSZKIN, R. **Sistema orientado a objeto para reconhecimento de voz e aplicação em controle de robô.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2002.

54. TEXAS INSTRUMENTS. **Introduction to SimpliciTI**, 2005. Disponivel em: <http://www.ti.com/lit/ml/swru130b/swru130b.pdf> Acesso em: 3 jan. 2010.

55. TRINDADE, F. C. L. **Análise dos sistemas de proteção e controle de instalações industriais com geradores síncronos durante operação ilhada**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2009.

56. VAN MEGGELEN, Jim; SMITH, Jared; MADSEN, Leif. **Asterisk: The Future of Telephony: The Future of Telephony**. 1ª Edição. O'Reilly Media, 2009.

57. VASCONCELOS, A. **Esquema de proteção para ilhamento preventivo de indústrias cogeradoras**. Campinas: Figener S/A Engenheiros Associados, 2006.

58. WALLING, R. A., MILLER, N. W. **Distributed generation islanding implications on power system dynamic performance**. Power Engineering Society Summer Meeting, IEEE, v.1, n^{o}., p.92-96 v.1, 2002.

59. YAMAJI, M.; ISHII, Y.; SHIMAMURA, T.; YAMAMOTO, S. **Wireless Sensor Network for Industrial Automation**. Tokyo: Ubiquitous Field Computing Research Center. Yokogawa Electric Corporation, 2008.

60. YIFENG**,** Yang**. Microchip MiWi™ P2P Wireless Protocol.** Microchip Technology Inc.Disponível em: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/appnotes/01204a.pdf>. Acesso em 10 de setembro de 2011

61. ZHENG, J.; JAMALIPOUR, A. **Wireless Sensor Networks**: A Networking Perspective. 1ª Edição. Wiley-IEEE, 2009.