**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
FACULDADE DE ZOOTECNIA E ENGENHARIA DE ALIMENTOS**

LUIZ ARTHUR MALTA PEREIRA

**Desenvolvimento de uma linha experimental de escala reduzida
para produção de biscoitos utilizando uma rede de multi sensores
com protocolo “ZIG-BEE”**

LUIZ ARTHUR MALTA PEREIRA

Desenvolvimento de uma linha experimental de escala reduzida para produção de biscoitos utilizando uma rede de multi sensores com protocolo “ZIG-BEE”.

Tese apresentada à Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do Título de Doutor em Engenharia de Alimentos.

Área de Concentração: Ciências da Engenharia de Alimentos

Orientador: Prof. Dr. Ernane José Xavier Costa

Pirassununga
2012

À minha família e meu orientador que em todas as minhas dificuldades sempre estiveram ao meu lado, apoiando e aconselhando.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Ernane José Xavier Costa, por ter acreditado em meu trabalho e ter proporcionado um enorme avanço em minha vida profissional.

Ao meu pai, Luiz de Mattos Pereira, que me apoiou e colaborou em todas as fases do projeto.

A minha mãe, Marinalva Malta Pereira, que em todos os momentos difíceis sempre me deu força para continuar lutando.

A minha Irmã, Talita Malta Pereira, que não faltou com empenho e dedicação para me ajudar nos momentos mais difíceis.

Aos Professores da Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos da Universidade de São Paulo que dispensaram seu tempo para minha formação, em especial à Professora Dra. Ana Carolina de Sousa Silva que me ajudou na dissertação desse trabalho.

Aos técnicos de laboratório Aldo Ivan Céspedes Arce e Gustavo Artizingen que ajudaram na execução do projeto.

A toda equipe do LAFAC que ajudou e apoiou na conclusão do projeto.

Ao meu amigo Leandro Maruci que ensinou com paciência a criação de peças que foram fundamentais para a conclusão do projeto.

A todos que direta ou indiretamente ajudaram na conclusão desse projeto.

"Tentar e falhar é, pelo menos, aprender. Não chegar a tentar é sofrer a inestimável perda do que poderia ter sido."

Albino Teixeira

RESUMO

Pereira, L. A. M. **Desenvolvimento de uma linha experimental de escala reduzida para produção de biscoitos utilizando uma rede de multi sensores com protocolo “ZIG-BEE”**. 2012. 118 f. Tese (Doutorado) - Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos da Universidade de São Paulo, Pirassununga, 2012.

Aproximadamente 15% do faturamento das indústrias brasileiras são provenientes da indústria alimentícia, responsáveis por empregar mais de um milhão de pessoas. Para produção em larga escala é necessário que estas indústrias estejam preparadas tecnologicamente, no entanto grande parte da instrumentação eletrônica e controle ainda requer tecnologia estrangeira. Para acompanhar o crescimento e as tendências mundiais nesta área, faz-se necessário fomento para as pesquisas e inovações tecnológicas. Essas inovações podem trazer a este setor maior faturamento, principalmente nos setores de alimentos saudáveis e de preparo rápido. Ao contrário disso, muitas dessas empresas sequer possuem departamentos de pesquisa e desenvolvimento, principalmente no que se refere ao uso da tecnologia da informação agregada à instrumentação eletrônica, com foco na produção de alimentos. Que é justamente onde se insere este projeto que tem como objetivo o desenvolvimento de uma mini linha experimental de produção de biscoitos com monitoramento eletrônico e computacional, que possa estimar o ponto ideal da massa e controlar a produção de biscoitos automaticamente. Para provar a viabilidade da aplicação das tecnologias desenvolvidas na indústria alimentícia, uma linha de produção de biscoitos foi projetada e construída em escala laboratorial, sensores e atuadores que utilizam tecnologia sem fio com protocolo *zigbee* foram instalados ao longo da linha. Para que se pudesse analisar a temperatura interna do biscoito durante seu assamento, um encapsulamento a base de cimento refratário foi desenvolvido para proteger o nó sensor, permitindo que esse possa acompanhar o biscoito dentro do forno e coletar a temperatura interna do biscoito. Desenvolveu-se também um sensor capaz de captar, em tempo real, dados referente à massa, através da leitura da corrente utilizada pelo motor do misturador, pois esta corrente está relacionada com o torque aplicado à massa. A metodologia proposta comprovou a viabilidade da utilização de sensores sem fio com protocolo *zigbee*, e mostrou ser possível estimar o ponto ideal da massa através do sistema desenvolvido, iniciar o processo de fabricação automaticamente e controlar todos os processos envolvidos.

Palavras-chave: automação; forno elétrico; eletrônico; móvel; farinógrafo; alimentos; rede de sensores sem fio.

ABSTRACT

Pereira, L.A.M. **Development of a line of experimental scale production of biscuits using a network of sensors with multi protocol "zig-BEE"**. 2012. 118 f. Thesis (Doctorate) - Faculty of Animal Science and Food Engineering, University of São Paulo, Pirassununga, 2012.

Approximately 15% of the revenues of Brazilian industries from the food industry is responsible for employing over a million people. For large scale production is necessary for these industries are technologically prepared, however much of the electronic instrumentation and control equipment still requires foreign technology. To keep up with growth and global trends in this area, it is necessary to promote research and technological innovation. These innovations can improve sales to this sector, mainly in health food and fast preparation. By contrast, many of these companies even have departments of research and development, especially regarding the use of information technology to aggregate electronic instrumentation, focusing on food production. That is precisely where it belongs this project aims to develop an experimental production line mini biscuits with electronic monitoring and computing, which can estimate the ideal point of the mass and control the production of biscuits automatically. To prove the feasibility of applying the technologies developed in the food industry, a biscuit production line was designed and built at the laboratory scale, using sensors and actuators with wireless zigbee protocol were installed along the line. In order to examine the internal temperature of the cookie during its baking, a tunnel-based refractory cement is designed to protect the sensor node, allowing it to follow the cookie into the oven and the temperature inside the collecting biscuit. It was also developed a sensor capable of capturing real time data regarding the mass, by reading the current used by the motor of the mixer, since this current is related to the torque applied to the mass. The proposed methodology proved the feasibility of using wireless sensor zigbee-protocol, and shown to be possible to estimate the ideal point of the mass through the system developed, start the manufacturing process and automatically control all processes involved.

Keywords: automation; electric oven; electronic; mobile, farinograph; food; wireless sensor network.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Diagrama típico de um nó de uma rede de sensores wireless.....	22
Figura 2 – Arquiteturas de rede de sensores sem fio usando o protocolo Zigbee.....	23
Figura 3- Diagrama de blocos de um sistema de instrumentação com Zigbee.	25
Figura 4 – Representação esquemática da mini linha de produção de biscoitos, mostrando a disposição dos nós sensores.....	30
Figura 5 – Vista frontal da ilustração do forno elétrico projetado.....	31
Figura 6 – Detalhes da estrutura de sustentação do tambor.....	32
Figura 7– Ilustração das zonas e setores.....	33
Figura 8 – Circuito elétrico de ligação das resistências.....	33
Figura 9 – Projeto da esteira transportadora.....	35
Figura 10 – Diagrama de blocos da central de controle do forno.....	37
Figura 11– Diagrama de blocos da central de controle do forno.....	38
Figura 12– Misturador braesi modelo AELI-715	39
Figura 13 – Diagrama do sistema de corte da massa.	42
Figura 14 – Projeto da esteira separadora e da extrusora.	43
Figura 15 – Projeto para a sustentação do misturador, extrusora e esteira separadora.	44
Figura 16 – Estrutura desenhada para a sustentação do misturador, extrusora e esteira separadora.	45
Figura 17 - Circuito eletro-pneumático para acionamento da extrusora.....	48
Figura 18 – Diagrama esquemático do primeiro módulo, estação rádio base.....	49
Figura 19 – Diagrama de blocos dos sensores que utilizarão a tecnologia <i>Zigbee</i> para envio de dados.....	50
Figura 20 – Ambiente de desenvolvimento do <i>firmware</i>	51
Figura 21 – Diagrama de blocos do sensor móvel.	52
Figura 22 – Fluxograma do software do sensor móvel.....	52
Figura 23 – diagrama de blocos do controlador e sensor do farinógrafo.	55
Figura 24 – Fluxograma do software do controlador e sensor do farinógrafo.	56
Figura 25 – Fluxograma programação do software de controle, para botão processo automatizado.....	59

Figura 26 – Forno elétrico tipo túnel, etapa da realização do primeiro teste de aquecimento.....	65
Figura 27 – Imagem interna do forno.	66
Figura 28 – Detalhes da esteira transportadora do forno elétrico.....	67
Figura 29 – Detalhes da estrutura de sustentação dos tambores da esteira transportadora do forno elétrico.	68
Figura 30 – Perfil de temperatura do forno elétrico obtido pelo sensor móvel.....	69
Figura 31 – Perfil de temperatura no alimento.	70
Figura 32 – Imagem do forno elétrico (entrada do forno).	71
Figura 33 – Imagem do forno elétrico (saída do forno).....	71
Figura 34 – Diagrama dos circuitos eletrônicos utilizados na central de controle do forno elétrico.....	72
Figura 35 – Layout de pci do controlador do forno.	73
Figura 36 – Imagem da placa de controle do forno elétrico.....	73
Figura 37 – Painel de controle do forno elétrico.	74
Figura 38 – Adaptação de um motor contínuo ao misturador, para despejo da massa na extrusora.	75
Figura 39 – Imagem do misturador, mostrando os sensores finais de curso, cuba e motor de despejo da massa.	75
Figura 40 – Diagrama da placa eletrônica da central e comandos da esteira separadora, misturador e extrusora.	76
Figura 41 – Central e comandos.	77
Figura 42 – Sistema de preparo do biscoito.....	78
Figura 43 – Sistema de preparo do biscoito.....	79
Figura 44 – Sistema de preparo do biscoito, destacando os componentes de acionamento.....	81
Figura 45 – Primeiro invólucro testado construído de cimento refratário.	81
Figura 46 – Variação da temperatura interna do encapsulamento submetida a 180° c.	82
Figura 47 – Segundo encapsulamento desenvolvido, visão frontal e superior.....	82
Figura 48 – Esquema elétrico do nó sensor móvel	83
Figura 49 – Layout de pcb para o nó sensor móvel.	83
Figura 50 – Imagens do protótipo do nó sensor móvel.	84
Figura 51 - Curva de calibração do sensor 1.....	85

Figura 52 - Curva de calibração do sensor 2.....	85
Figura 53 - Curva de calibração do sensor 3.....	86
Figura 54 – Esquema elétrico do sensor e controlador do farinógrafo.....	87
Figura 55 – Layout pci da placa eletrônica desenvolvida.	87
Figura 56 – Imagens do protótipo do sensor e controlador do farinógrafo.	88
Figura 57 – Farinógrafo formado por um sistema de medição de torque integrado ao misturador.	88
Figura 58 – Variação do sinal elétrico do sistema de medição de torque. Experimento com farinha e água.....	89
Figura 59 – Variação do sinal elétrico do sistema de medição do torque. Experimento com farinha, água e óleo.....	90
Figura 60 – Variação do sinal elétrico do sistema de medição do torque . Experimento sem carga.....	90
Figura 61 – Tela do software de controle.	91
Figura 62 - Gráfico da aquisição dos dados do farinógrafo sem carga no misturador.	92
Figura 63 - Gráfico do sinal do misturador para a primeira mistura entre de farinha e água.	93
Figura 64 - Gráfico do sinal do misturador para a segunda mistura entre farinha e água.	94
Figura 65 - Gráfico do sinal do misturador para a terceira mistura entre de farinha e água.	95
Figura 66 - Desvio padrão a partir da primeira medição da mistura entre farinha e água.	96
Figura 67 - Gráfico do desvio padrão a partir da segunda medição da mistura entre farinha e água.	97
Figura 68 - Desvio padrão a partir da terceira medição da mistura entre farinha e água.	98
Figura 69 - Comparação entre o desvio padrão calculado e a derivada da primeira medição da mistura entre farinha e água.	99
Figura 70 - Comparação entre o desvio padrão calculado e a derivada da segunda medição da mistura entre farinha e água.	100
Figura 71 - Comparação entre o desvio padrão calculado e a derivada da segunda medição da mistura entre farinha e água.	101

Figura 72 - Gráfico do sinal do misturador para o primeiro teste para a receita de biscoito	102
Figura 73 - Gráfico do sinal do misturador para o segundo teste para a receita de biscoito.	103
Figura 74 - Gráfico do sinal do misturador para o terceiro teste para a receita de biscoito.	104
Figura 75 - Gráfico do desvio padrão para a primeira mistura testada da receita de biscoito.	105
Figura 76 - Gráfico do desvio padrão para a segunda mistura testada da receita de biscoito.	106
Figura 77 - Gráfico do desvio padrão para a terceira mistura testada da receita de biscoito.	107
Figura 78 – Tela do software de controle, calculando o desvio padrão e a derivada do desvio padrão.	108
Figura 79 – Sinal elétrico do farinógrafo para uma mistura de farinha e água.	111
Figura 80 – Tela do software de controle, que mostra os gráficos em tempo real do sistema de detecção do ponto ideal da massa.	112
Figura 81 – Linha de produção de biscoitos desenvolvia em escala reduzida.	113

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Especificações técnicas do módulo RF UBEE	24
Tabela 2 – Capacidade de corrente máxima suportada de cabos elétricos, retirado da NBR 5410/2004 – B1.....	34

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

FAPESP	Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo
LAFAC	Laboratório de Física Aplicada e Computacional
PAN	Personal Area Network (área pessoal de rede)
QSM	Quantidade sendo medida
WSN	Wireless Sensor Network (rede de sensores sem fio)

LISTA DE SÍMBOLOS

AC	Alternating current ou corrente alternada
DC	Direct current ou corrente contínua
W	Watts
P	Potência elétrica
I	Corrente elétrica
R	Resistência elétrica
Hz	Hertz.
V	Tensão Elétrica (Volts).
A	Ampere
RPM	Rotações por minuto
°C	Graus Celsius
CC	Corrente contínua
CV	Cavalo-vapor
Psi	Pound force per square inch ou libra força por polegada quadrada
Bar	Unidade de pressão
ISM	Industrial Scientific Medical ou Industrial, Científica e Médica
PVC	Polyvinyl chloride ou policloreto de vinil

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	18
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
2.1 Microcontrolador PIC	20
2.2 Rede de sensores wireless	20
2.3 Protocolo zigbee	22
2.4 Módulo RF UBEE	23
2.5 Instrumentação eletrônica	24
2.6 Forno tipo túnel	26
3 OBJETIVO	27
4 MATERIAIS E MÉTODOS	28
4.1 Projeto de uma linha de produção de biscoitos com escala reduzida	28
4.1.1 Projeto e desenvolvimento de um forno elétrico com escala reduzida	31
4.1.1.1 Resistências elétricas	32
4.1.1.2 Esteira transportadora	35
4.1.1.3 Central de controle do forno elétrico	36
4.1.1.4 Misturador	39
4.1.1.5 Extrusão, corte e separação do biscoito	39
4.1.1.5.1 Extrusão do biscoito	40
4.1.1.5.2 Corte do biscoito	42
4.1.1.5.3 Esteira separadora	43
4.1.1.5.4 Suporte misturador, extrusora e esteira separadora	44
4.1.1.6 Painel de controle da esteira separadora, misturador e extrusora	45
4.1.1.6.1 Placa controladora da esteira separadora, misturador e extrusora	46
4.1.1.6.2 Sistema pneumático de acionamento da extrusora	47
4.1.1.7 Projeto e desenvolvimento dos sensores	48
4.1.1.7.1 Estação rádio base (ERB)	49
4.1.1.7.2 Sensores e formatos dos nós	49
4.1.1.7.3 Desenvolvimento dos dispositivos	50
4.1.1.8 Nó sensor móvel de temperatura para monitoramento do biscoito em processamento	51
4.1.1.8.1 Primeiro encapsulamento do sensor móvel	53

4.1.8.2 Segundo encapsulamento do sensor móvel.....	53
4.1.8.3 Calibração do sensor de temperatura móvel.....	54
4.1.9 Sensor de medição de torque - farinógrafo	55
4.1.10 Software de controle.....	56
4.1.11 Implantação de algoritmo no software de controle para controle automatizado do processo.....	59
4.2 Verificação da viabilidade da detecção automática da estimativa ponto ideal da massa.....	61
4.2.1 Aquisição e análise do sinal do farinógrafo sem carga no misturador.....	62
4.2.2 Aquisição e análise do sinal do farinógrafo em uma mistura de farinha e água.....	62
4.2.3 Aquisição e análise do sinal do farinógrafo para uma receita de massa de biscoito.....	63
4.2.4 Relação entre desvio padrão e a estimativa do ponto ideal da massa.....	63
4.3 Teste final do projeto	64
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	65
5.1 Testes de funcionamento do forno elétrico	65
5.2 Central de controle do forno elétrico.....	72
5.3 Automação do processo de despejo da massa.....	74
5.4 Painel de controle da esteira separadora, misturador e extrusora.....	76
5.5 Testes de funcionamento do misturador, extrusora e esteira separadora ..	77
5.6 Nó sensor móvel de temperatura.....	81
5.7 Nó sensor de medição de torque - farinógrafo.....	86
5.8 Software de controle.....	91
5.9 Verificação da viabilidade da detecção automática da estimativa ponto ideal da massa.....	91
5.9.1 Aquisição e análise do sinal do farinógrafo sem carga no misturador.....	92
5.9.2 Aquisição e análise do sinal do farinógrafo em uma mistura de farinha e água.....	93
5.9.3 Relação entre desvio padrão e a estimativa do ponto ideal da massa.....	96
5.9.4 Relação entre o cálculo da derivada e ponto ideal da massa	98
5.9.5 Aquisição e análise do sinal do farinógrafo para uma receita de massa de biscoito.....	101

5.9.6 Relação entre desvio padrão e a estimativa do ponto ideal da massa, para uma receita de biscoito.....	104
5.10 Software de controle, estimativa do ponto ideal da massa	108
5.11 Teste final do projeto	108
6 CONCLUSÃO	114
REFERÊNCIAS.....	116

1 INTRODUÇÃO

No Brasil a demanda pela produção de alimentos cresce todo ano, impulsionada pelas necessidades crescentes dos mercados interno e externo. Para que a indústria alimentícia brasileira possa crescer e acompanhar as necessidades impostas, a melhor saída é o aumento de pesquisas para o desenvolvimento de máquinas e equipamentos voltados para a produção e industrialização de alimentos, uma vez que as indústrias brasileiras dependem diretamente de equipamentos e projetos estrangeiros, o que dificulta a modernização e a expansão das empresas nacionais, acarretando em um maior custo de produção e dificuldades para a criação de novas empresas. Para a reversão desse problema é necessário um maior investimento em pesquisas científicas interdisciplinares para o desenvolvimento de tecnologias e equipamentos, além da necessidade contínua de especialização de profissionais. Com estes investimentos além do aumento da produção, cria-se a possibilidade de se agregar valor ao produto exportado e aumenta a capacidade dos produtos brasileiros de competirem frente a outros produtos disponíveis no mercado externo, além de proporcionar melhoria da qualidade do produto a ser consumido pelo mercado nacional.

No mercado interno a qualidade do produto recebe destaque, já que as regras da vigilância sanitária e do IPEM (Instituto de Pesos e Medidas) são rígidas. Para atender as exigências normativas e aumentar a qualidade dos alimentos, a melhor saída é utilizar equipamentos eletrônicos para a inspeção, por se tratar de uma tecnologia de rápido escoamento e de muita precisão.

Uma das maiores dificuldades das empresas de automação é o desenvolvimento de sensores capazes de realizar as medidas necessárias no alimento em processamento ou terminado. Captar essas variáveis para a criação de um processo automatizado é uma tarefa complexa (NING, 2006).

Os objetivos das indústrias alimentícias que processam biscoitos, no que diz respeito ao controle da qualidade, envolvem análise e quantificação em tempo real em todas as etapas do processo de produção. O passo inicial do processo é a mistura de todas as variáveis envolvidas, onde a energia mecânica é aplicada à massa, esta energia depende diretamente do tipo de misturador e da farinha, onde a ação mecânica fornece a energia que permite o estabelecimento de numerosas

interações entre os ingredientes da massa. Neste processo acontece um arranjo conformacional dos biopolímeros (especialmente glúten) e, consequentemente as propriedades reológicas da massa (MAACHE-REZZOUG *et al.*, 1998).

A farinha de trigo tem a capacidade de formar uma massa viscoelástica que retém o gás produzido durante a fermentação, as proteínas formadoras do glúten, gliadinas e gluteninas são as principais responsáveis por esta característica própria do trigo. A gliadina apresenta peso molecular médio de 40.000 u, cadeia simples e é extremamente gomosa quando hidratada, apresenta pouca ou nenhuma resistência à extensão, sendo portanto responsável pela coesividade da massa. A glutenina é formada por várias cadeias ligadas entre si, apresentando peso molecular médio de 1000.000 u a vários milhões, é elástica, mas não coesiva e fornece à massa a propriedade de resistência à extensão (TEDRUS *et al.*, 2001).

Como há uma grande diversidade de origem das farinhas de trigo, os métodos para a detecção dessas diferenças são vários, os mais empregados medem as características físicas da massa a partir de sistemas simples como água e farinha. Atualmente, existe uma série de instrumentos desenvolvidos para mensurar as propriedades reológicas da massa, como exemplos se apresentam o farinógrafo, o extensógrafo e o alveógrafo. O farinógrafo tem sido o instrumento mais utilizado para a medida da qualidade e força da farinha, esse instrumento mede a força da massa quando exposta a um determinado trabalho, já que esta possui características viscoelásticas. Para isso o torque utilizado pela amassadeira é medido por um dinamômetro que está conectado a um sistema de escala que registra as variações, gerando um gráfico denominado curva farinográfica. Essa curva farinográfica reflete basicamente três processos: absorção de água, desenvolvimento da massa e quebra da massa, intrinsecamente relacionados à qualidade da farinha (CALDEIRA *et al.*, 2011).

É neste contexto que se insere este trabalho que objetiva aplicar os conceitos de instrumentação eletrônica, engenharia de software e engenharia de alimentos no desenvolvimento, teste e análise de uma linha de produção de biscoitos de escala reduzida, que proporcione maior eficiência ao controle dos processos envolvidos. Espera-se que o sistema seja capaz de estimar o ponto ideal da massa e acionar a produção automaticamente, além de monitorar as variáveis durante o processo de fabricação para garantir a qualidade do produto final.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 *Microcontrolador PIC*

O Peripheral Interface Controller (PIC), Periférico Controlador de Interface é um microcontrolador fabricado pela empresa Microchip que foi criado para utilizações que não necessitam de processamentos de alta velocidade. A vantagem de se utilizar um microcontrolador é que este agrega em sua arquitetura bancos de memória, dispositivos de entrada e saída (I/O), processador e memória fixa, enquanto os microprocessadores possuem uma grande capacidade de processamento, mas necessitam de vários outros dispositivos para seu funcionamento.

A velocidade de processamento do microcontrolador é baixa quando comparada aos microprocessadores, porém para as aplicações que não necessitam de um processamento grandioso o microcontrolador é o equipamento eletrônico mais indicado, por ser compacto e incorporar praticamente todos os dispositivos necessários. Os microcontroladores PIC possuem uma arquitetura interna Harvard além de utilizar tecnologia Reduced Instruction Set Computer (RISC) ou Computador de “Set” de Instruções Reduzidas, utiliza cerca de 35 instruções para sua programação, podendo variar de acordo com cada modelo, esse número reduzido de instruções inicialmente dificulta a programação, porém faz com que seu processamento seja mais rápido e dinâmico. Este microcontrolador possui baixo custo e não é suscetível a interferências causadas por ruídos ou ondas magnéticas (ORDONEZ *et al.*, 2005).

2.2 *Rede de sensores wireless*

A maioria dos sistemas utilizados para monitoramento e controle na indústria de alimentos ainda utiliza cabos lógicos a fim de garantir a confiabilidade e segurança da transmissão de dados. Como neste tipo de ambiente há a

necessidade de monitoramento e controle de muitas variáveis, que estão relacionadas diretamente com a qualidade e características desejáveis do produto alimentício, a utilização de cabos se torna dispendiosa. Segundo Leonardo Tavares do Nascimento (2008) os sistemas industriais que utilizam fios são caros, além de encarecer futuras modificações de layout de uma instalação, o que não ocorre nos sistemas sem fio.

Uma rede de sensores wireless, Wireless Sensor Network (WSN) é um conjunto de sensores e dispositivos de transmissão telemétricos chamados de nós (MIN, 2002). A vantagem do emprego do protocolo *zigbee* é sua alta escalabilidade, pois possui alta aceitabilidade de nós e necessita de pouca energia para seu funcionamento, por isso, o emprego desta tecnologia se torna cada vez mais atrativo para aplicações industriais.

Roberto Luiz Cunha (2008) também cita a utilização da tecnologia de barramento *wireless* em ambientes industriais como uma opção bastante interessante, pois não necessita de obras de infra-estrutura, possui facilidade de alteração de layout, dispensa a preocupação de cabeamento e possui alta taxa de transferência de dados.

Assim, as redes de sensores sem fio além de serem alternativas menos dispendiosas, possibilitam o monitoramento e controle de diversos tipos de ambientes (Silva, 2005), onde seu emprego já foi largamente estudado para várias áreas de aplicação. Sua viabilidade em ambientes de industrialização se justifica pela característica de processamento ubíquo e mobilidade dos nós deste tipo de rede, com isso a coleta de dados efetuada por vários sensores simultaneamente garante a precisão da informação.

A estrutura de uma WSN é composta de um microcontrolador, um sistema de transmissão e recepção que utiliza para isto tecnologia de radio frequência, uma fonte de energia e um ou mais sensores (ASADA *et al.*, 2000). O diagrama de uma estrutura WSN é apresentado na figura 1.

Figura 1 – Diagrama típico de um nó de uma rede de sensores wireless.

2.3 Protocolo zigbee

Protocolo de comunicação é um conjunto de procedimentos, regras ou especificações que determinam um comportamento ou uma linguagem específica. Em uma rede de dados esse protocolo determina como os nós devem se comportar ou comunicar-se um com os outros. Entre outras coisas o protocolo é responsável por formatar, garantir a integridade e a transmissão dos dados (GALLO, 2003).

O protocolo *zigbee* permite que a rede sem fio seja capaz de transmitir os dados de forma que cada um dos nós da rede possa retransmitir informações provenientes de outros nós até que essa informação chegue ao destino. Por não haver a necessidade de atingir grandes distâncias na transmissão de dados, o sistema não necessita de alta potência de transmissão, permitindo que o equipamento tenha tamanho reduzido e um menor consumo de energia. Neste equipamento o alcance mínimo de cada nó é de aproximadamente 10 metros.

No protocolo *zigbee* o controle de fluxo dos dados e a coexistência dos nós neste tipo de rede são gerenciados de acordo com o padrão IEEE 802.15.4 (IEEE STANDARD, 2012). Este possibilita a aplicação das redes de sensores sem fio para estabelecer comunicação de dados segura a baixo custo e em diversos tipos de

ambientes, entre os que podem ser inclusos, aparecem os da indústria de alimentos e os de criação animal. Este protocolo também confere uma alta escalabilidade à rede de sensores já que possibilita a inclusão de novos nós sensores sem necessidade de configurações adicionais (KINNEY, 2003).

O protocolo *zigbee* compreende três tipos de dispositivos: O dispositivo coordenador que é normalmente acoplado a uma unidade de controle, os nós roteadores que, além de serem dotados de sensores, auxiliam no fluxo de dados entre os demais nós; e os nós simples cujo único papel é o de transmitir os dados coletados pelos sensores ou acionar atuadores a eles acoplados. As redes zigbee podem operar nas topologias estrela, árvore e malha, essas disposições são mostradas na figura 2 .

Figura 2 – Arquiteturas de rede de sensores sem fio usando o protocolo ZigBee.

2.4 Módulo RF UBEE

O módulo de rádio frequência *U-Bee* trabalha com a especificação IEE 802.15.4 e foi desenvolvido para possuir baixo custo e consumo de energia. O módulo trabalha com consumo mínimo e oferece comunicação e transmissão de dados entre dispositivos de forma segura, sua frequência é de 2,4GHz que está na

faixa de frequência ISM. As especificações técnicas do módulo de rádio frequência UBEE são apresentadas na tabela 1.

Tabela 1 – Especificações técnicas do módulo RF UBEE

DESEMPENHO
Indoor / centros urbanos - 70m (antena Wipe) Visada direta - 150m (antena Wipe) Potencia máxima de saída de transmissão (Configurável por Software) - 1mW (0 dBm) Taxa de dados RF - 250 Kbps Taxa de dados serial (configurável por software) - 1200-115200 bps Sensibilidade do Receptor - 95 dBm
ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS
Tensão de Operação - 2.4 a 3.6V (3.3V típico) Consumo de corrente (típico): Modo Sleep - <50 uA Modo TX - 33mA Modo RX - 28mA
ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS
Frequência de operação - ISM 2.4GHz Dimensões - 36.06mm x 24,38mm Faixa de temperatura: -40 °C a +85°C Opções de Antena: Monopolo (Wipe), Planar (Mini), SMA Reverso (PRO)
Especificações de Rede
Topologias de Rede - Ponto a ponto, Ponto - multiponto, Peer-to-peer Canal de Operação Configurável por Software - 16 Canais sequenciais Opções de endereçamento - PAN ID, Canal e Endereços

Fonte: Fractum (2011).

2.5 Instrumentação eletrônica

A Instrumentação, definida como a ciência da medição e controle (EREN, 2006), desenvolve e pesquisa métodos e utilizações possíveis para os instrumentos que são dispositivos essenciais para medir variáveis físicas em diversas aplicações, tais como: operações industriais, produtos de consumo, monitoramento ambiental, pesquisa e desenvolvimento, entre outros. É responsável por criar dispositivos capazes de transformar as variáveis físicas do ambiente em sinais elétricos que podem ser medidos (NORTHROP, 2005). Um sistema de medição e controle tipicamente utilizado em ambientes de produção é ilustrado na figura 3. Neste sistema a “quantidade sendo medida” (QSM) representa o universo das variáveis físicas do ambiente. No esquema da figura 3, o sensor converte a grandeza física

em tensão ou corrente elétrica. Este sinal elétrico resultante é normalmente de baixa amplitude e contém artefatos originados por interferências eletromagnéticas e mecânicas, portanto, tem que ser condicionado. Os sinais adquiridos e livres de artefatos são digitalizados e transferidos para um sistema de controle. Neste projeto, os instrumentos foram acoplados a nós zigbee® que transferem os dados coletados para um sistema de controle que analisa as medições recebidas e responde enviando requisições de acionamento de dispositivos inseridos no processo.

Figura 3 - Diagrama de blocos de um sistema de instrumentação com Zigbee.

Com as disposições apresentadas os nós podem trabalhar retransmitindo as informações colhidas, o projeto da linha com escala reduzida proposta, possuirá uma rede de sensores com transmissão de dados utilizando tecnologia *zigbee*, que dispensará interligação elétrica entre os sensores e poderá até permitir a estes, mobilidade através de pequenas mudanças nos parâmetros do software de controle. Os sensores poderão realizar leituras de pontos mais críticos da produção, além de realizar o monitoramento em tempo real de toda a linha e não através de um monitoramento por estágio (CALLAWAY, 2002).

2.6 Forno tipo túnel

Um forno tipo túnel é mais moderno e eficiente no que se diz respeito à economia energética. Segundo Santos (2001), esse tipo de forno possui uma estrutura dividida em três secções.

- Pré-aquecimento
- Queima
- Resfriamento

Este tipo de forno aproveita o calor de uma secção em outra, onde o ar quente utilizado na zona de resfriamento é enviado para a zona de queima e os gases que saem desta zona são enviados para a zona de pré-aquecimento, este funcionamento descrito por Santos (2001) é utilizado para forno à combustão, porém como o forno projetado neste trabalho possui um tamanho relativamente pequeno, o espaço entre as resistências não justifica o transporte do calor entre as secções. Um forno elétrico basicamente é constituído de:

- Área interna onde o produto será aquecido.
- Resistências elétricas para aquecimento.
- Controle mecânico ou eletrônico para regulação da temperatura.
- Isolante térmico para a conservação do calor na parte interna do forno.

3 OBJETIVO

Este trabalho objetiva testar a seguinte hipótese:

“Uma Linha de produção de biscoitos de escala reduzida pode ser monitorada e controlada automaticamente por um sistema eletrônico e computacional utilizando tecnologia wireless”

Para testar a eficácia do monitoramento eletrônico e computacional *wireless* em uma linha de produção de biscoitos de escala reduzida, os seguintes objetivos específicos foram seguidos:

- Projeto e desenvolvimento de uma linha de produção de biscoitos em escala reduzida;
- Montagem na linha de um sistema de sensores e dispositivos de controle automatizados com característica de envio de dados em tempo real, utilizando tecnologia *wireless* com protocolo *zigbee*;
- Desenvolvimento de um software de controle capaz de receber os dados coletados, processá-los e enviar sinais de comandos para os atuadores;
- Montar e testar um nó sensor capaz de monitorar a temperatura do alimento durante seu deslocamento na esteira transportadora do forno elétrico;
- Controlar a linha em função dos dados do alimento.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Projeto de uma linha de produção de biscoitos com escala reduzida

O projeto se desenvolveu nas dependências da Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos da Universidade de São Paulo no Laboratório de Física Aplicada e Computacional, através do emprego de técnicas de instrumentação eletrônica, computação embarcada, comunicação sem fio e automação eletropneumática. Para o financiamento do projeto proposto foram utilizados recursos disponibilizados pela FAPESP do processo 2009/07593-1. O projeto inicial da mini linha previa a utilização de: farinógrafo, misturador, laminador, rolo de prensa, rolo de molde, esteira de rebarba de massa, esteira direcional, esteira para forno, forno de três zonas de aquecimento e compartimento de saída, porém para um processo totalmente automatizado alguns itens foram substituídos ou modificados. Para todas as etapas do processo foram projetados sensores que são responsáveis pela medição das variáveis, os dados amostrados são transmitidos para um sistema computacional através de comunicação sem fio por rádio frequência, para que seja possível a análise em tempo real das condições do alimento submetido ao processo.

Um algoritmo de controle no sistema computacional é responsável por enviar sinais aos atuadores que modificam essas variáveis. Para atender a estas necessidades o sistema de monitoramento contou com:

- Um sensor telemétrico de torque, desenvolvido para coletar dados referentes ao processo de mistura da massa do biscoito;
- Sensor telemétrico que acompanha o alimento na esteira transportadora, responsável pela medição da temperatura de uma amostra de biscoito durante sua passagem pelo forno;
- Acoplagem de seis sensores no interior do forno elétrico em locais estratégicos, para extrair o perfil de temperatura nos estágios do processo.

Todos os dados colhidos por estes sensores telemétricos são transmitidos ao computador central via comunicação sem fio (*wireless*), utilizando o protocolo

zigbee. Um software é responsável por registrar e processar os dados capturados do processo.

O projeto inicial é apresentado pela ilustração da figura 4. O farinógrafo é responsável por realizar as medidas do torque do motor do misturador em intervalos de 1 segundo, com o intuito de utilizar como variável de controle ou monitorar as características mecânicas da mistura da matéria prima (farinha e água). A variação das características mecânicas da massa, de água e farinha durante o processo de mistura causa variação no torque do motor do misturador, que depende dentre outras coisas da qualidade da matéria prima. As medidas de torque são transferidas a um sistema computacional, que processa os dados recebidos e é capaz de extrair informações que podem ser utilizadas para estimar o ponto da massa.

O próximo passo do processo é o despejo automático da massa à extrusora, após a extrusão da massa, um sistema adaptado à saída da extrusora faz o corte na forma de biscoito, que cai em uma esteira transportadora que o leva até a esteira transportadora do forno.

A esteira transportadora do forno possui controle de velocidade e sentido, dentro do forno seis sensores acoplados fazem a medida da temperatura de cada zona. Outro sensor telemétrico de temperatura foi desenvolvido para ser transportado junto ao alimento e enviar em tempo real a temperatura interna do alimento durante seu assamento.

Todas as variáveis medidas são enviadas pelos nós sensores para a estação de controle que é ilustrada na figura 4(e). Além das medições, os nós sensores são capazes de receber comandos provenientes do sistema computacional e de acionar atuadores que controlam e alteram as variáveis do processo.

Optou-se pelo emprego de uma rede de nós sensores sem fio com a utilização de protocolo *zigbee*, por ser uma tecnologia inovadora e que proporciona um baixo custo de implantação e manutenção.

Figura 4 – Representação esquemática da mini linha de produção de biscoitos, mostrando a disposição dos nós sensores.

O desenvolvimento da mini linha de escala reduzida consistiu nas seguintes etapas:

- Projeto e desenvolvimento de um forno elétrico tipo túnel com escala reduzida;
- Desenvolvimento de uma esteira transportadora com malha metálica e tracionamento por motor trifásico de 600 W e caixa redutora;
- Desenvolvimento de um painel de controle elétrico para acionamento dos sistemas;
- Aquisição e testes do misturador;
- Desenvolvimento de um sistema de extrusão;
- Desenvolvimento de um sistema de corte;
- Desenvolvimento de uma esteira transportadora para a separação do biscoito e transporte ao forno;
- Automação da extrusora, cortador e separação do biscoito;
- Desenvolvimento de nós sensores *wireless*;

- Desenvolvimento de sensores de temperatura móvel;
- Desenvolvimento de um sensor de medição do torque – farinógrafo;
- Desenvolvimento de um software de coleta e processamento dos dados.

4.1.1 Projeto e desenvolvimento de um forno elétrico com escala reduzida

A estrutura do forno desenvolvido foi montada em aço carbono metalon 30 x 50 cm, medindo internamente 0,4 x 0,4 x 2,0 m e externamente 0,50 x 0,50 x 2,0 m, essa estrutura recebeu tinta de alta temperatura na cor prata e o espaço entre as áreas interna e externa foi preenchido com lã de rocha, para isolamento térmica. O Diagrama da estrutura do forno é ilustrado na figura 5.

Figura 5 – Vista frontal da Ilustração do forno elétrico projetado.

Nas saídas do forno foram fixadas duas estruturas de sustentação para que os tambores transportadores pudessem ser acoplados, ambas as peças foram fabricadas em chapa de aço de espessura 4,8 mm, em uma das saídas o tambor foi acoplado em um furo elipsoidal e um tracionador foi implantado para possibilitar o ajuste da esteira, retirando as folgas e evitando que a mesma gire em falso quando o motor rotacionar. A estrutura de sustentação do lado oposto recebeu furos para a

acoplagem do tambor e do motor, que foram ligados entre si, assim quando o conjunto rotaciona a esteira segue o movimento. O projeto da estrutura de sustentação do tambor é ilustrado na figura 6.

Figura 6 – Detalhes da estrutura de sustentação do tambor.

Tanto o interior quanto o exterior do forno foram revestidos de chapas de aço inox e uma das paredes laterais recebeu além do material isolante térmico de lã de rocha, tijolos refratários. A utilização desse revestimento térmico se deu no lado do forno onde os terminais da resistência elétrica ficam expostos, com o intuito de proporcionar maior proteção ao circuito elétrico. Ainda uma estrutura de aço em forma de retângulo medindo 0,50 x 0,11 x 2,00 m e revestida de aço inox foi fabricada para ser encaixada na lateral do forno, protegendo os usuários de possíveis contatos com o circuito elétrico que interliga as resistências, além de facilitar o acesso ao circuito em eventuais manutenções.

4.1.1.1 Resistências elétricas

Para que o forno pudesse atingir temperaturas acima de 200 °C, foram instaladas 16 resistências elétricas em formato de “W” de 1200 watts cada, sendo 8 na parte inferior e 8 na parte superior, conforme especificações técnicas do fabricante das resistências. Como o forno é dividido em três zonas, pré

aquecimento, aquecimento e resfriamento, as resistências foram separadas em seis setores, assim, fazem parte da zona1 os setores 1 e 4, compostos de três resistências cada, da zona 2 fazem parte os setores 2 e 5, compostos também de três resistências cada e a zona 3 que é composta dos setores 3 e 4 que possuem duas resistências cada. As zonas e setores são ilustrados na figura 7.

Figura 7 – Ilustração das zonas e setores.

Para que as resistências pudessem ser acionadas pelo sistema computacional, um circuito de atuadores elétricos foi montado utilizando contatores, que são equipamentos eletro-eletrônicos responsáveis por conduzir tensão alternada de alta potência, através de um estímulo elétrico de baixa potência, assim cada contator fica responsável por acionar uma determinada zona. O diagrama do circuito elétrico é ilustrado na figura 8. As resistências foram ligadas de forma a distribuir a corrente entre as três linhas de alimentação do circuito. Esse procedimento foi realizado para que haja um balanceamento das cargas elétricas.

Figura 8 – Circuito elétrico de ligação das resistências.

As resistências foram ligadas utilizando um barramento de cobre, condutores e isolantes seguindo os padrões estabelecidos pela NBR 5410 (instalações elétricas de baixa tensão). Para a determinação do diâmetro do cabo elétrico ideal, baseou-se na lei complementar de ohm que determina que Potência é igual a Tensão multiplicado por corrente elétrica. Os cálculos que são apresentados à seguir retornam a amperagem que o cabo deverá suportar, com esse valor calculado a tabela 2 (retirada da NBR 5410) é consultada determinando a escolha do diâmetro do fio ideal de trabalho.

- **Cálculo do cabo para ligação comum entre as resistências (L1 e L2)**

$$P = 8 \times 1200 \text{ W} \quad (1)$$

$$P = 9600 \text{ W}$$

$$I = 9600 / 220 = 43,63 \text{ A} \quad \text{CABO ESCOLHIDO: } 10 \text{ mm} \quad (2)$$

- **Cálculo do cabo para acionamento das zonas com 3 resistências**

$$P = 3 \times 1200 \text{ W} \quad (3)$$

$$P = 3600 \text{ WATTS}$$

$$I = 3600 / 220 = 16,36 \text{ A} \quad \text{CABO ESCOLHIDO: } 2,5 \text{ mm} \quad (4)$$

- **Cálculo do cabo para acionamento das zonas com 2 resistências**

$$P = 2 \times 1200 \text{ W} \quad (5)$$

$$P = 2400 \text{ W}$$

$$I = 2400 / 220 = 10,90 \text{ A} \quad \text{CABO ESCOLHIDO: } 2,5 \text{ mm} \quad (6)$$

Tabela 2 – capacidade de corrente máxima suportada de cabos elétricos, retirado da NBR 5410/2004 – B1

Fios e Cabos Padrão Métrico		
<i>Seção Nominal [mm²]</i>	<i>Diâmetro [mm]</i>	<i>Corrente Máxima [A]</i>
1,0	1.13	14
1,5	1.38	17
2,5	1.78	24
4,0	2.26	32
6,0	2.76	41

4.1.2 Esteira transportadora

A estrutura de uma esteira transportadora depende diretamente do tipo, carga ou peso do material a ser transportado. Esta é composta basicamente de: tambores, roletes, correia e motor de tracionamento. O primeiro obstáculo para construção da esteira deste projeto foi a escolha da correia, por esta ter que suportar altas temperaturas. A correia utilizada foi especialmente fabricada em aço carbono em forma de malha. Os dois tambores foram fixados nas extremidades do forno em mancais com livre rotação e um dos tambores recebeu acoplagem da saída do redutor do motor. Dentro do forno quatro roletes foram instalados para garantir que a esteira permanecesse esticada, devido a seu peso elevado e seu comprimento, o projeto da esteira transportadora é ilustrado na figura 9.

Figura 9 – Projeto da esteira transportadora.

Para o tracionamento da esteira transportadora, instalada junto ao forno, o motor redutor escolhido que é da marca Bonfiglioli conta com 0,82 cv e 1340 RPM e para o controle da velocidade e sentido deste motor foi utilizado um inversor de frequência da marca Weg, modelo CFW-08 que possui funções para controle manual e remoto, potência de trabalho entre 0,25 cv e 20 cv e alto torque em baixas rotações. Para a determinação do cabo elétrico ideal para ligação entre motor e o inversor de frequência, o cálculo abaixo foi realizado.

Potência do motor = 600W

Tensão Elétrica = trifásica (220V)

$I = 600W / 220V = 2,72A$ CABO ESCOLHIDO = 1,5 mm (7)

4.1.3 Central de controle do forno elétrico

Foi instalado um painel de distribuição equipado com um disjuntor trifásico de 100 A que supre de energia o sistema desenvolvido através de um cabo PP (Condutor de Cobre flexível com Isolação PVC/F (Cloro de Polivinila) 70°C - 750V e Cobertura de PVC/ST1 70°C extra flexível não propagante à chama) de 4 vias com bitola de 10 mm².

A central do controle do forno foi instalada em um painel elétrico fixado com duas chapas de aço soldadas na estrutura da base do forno, dentro deste painel foi instalado um disjuntor trifásico de 80 A para a proteção do sistema. Na saída deste disjuntor um contator elétrico de 63 A foi ligado para que o sistema pudesse ser desligado ou ligado através do sistema computacional ou por um botão posicionado externamente a central de controle, além de permitir a instalação de botões de emergência que foram instalados em pontos estratégicos da linha. À saída deste contator foram ligados os terminais comuns das resistências, os contadores de acionamento das resistências, o inversor de frequência do motor da esteira, a placa eletrônica de controle e um cabo elétrico PP de 4 vias de 4 mm cada, que serve para alimentar o outro painel de controle da linha que será descrito posteriormente.

O circuito eletrônico instalado na central de controle do forno elétrico é responsável por ligar e desligar as resistências e registrar a temperatura dos sensores termopar.

Este dispositivo foi projetado para cumprir as seguintes tarefas:

- **Coleta de temperatura utilizando 6 sensores termopar tipo K.** Para esta tarefa, foi utilizado o amplificador para termopar com compensação de junção fria AD595;
- **Acionamento de 6 contadores (para ligar as resistências de aquecimento do forno).** Através de atuadores compostos de optoacopladores MOC3010 e tiristores BT16A;
- **Controle de um inversor modelo CFW-08 (WEG, 2011).** Um circuito foi projetado utilizando transistores BT337 e uma saída PWM para controlar as funções liga, desliga, sentido de rotação e frequência do inversor.

Foi utilizado o microcontrolador PIC16F877 como unidade de processamento e o módulo de rádio frequência *U-BEE* para implementação da rede *ZigBee*. O diagrama de blocos da central de controle do forno é ilustrado na figura 10.

Figura 10 – Diagrama de blocos da central de controle do forno.

Os comandos para acionamento do sistema e o fluxograma de interpretação do software embarcado são apresentados na figura 11. Após a construção do algoritmo, o programa foi escrito na linguagem C e transferido para a memória interna do microcontrolador, assim os comandos enviados pelo módulo *u-bee*, são recebidos e interpretados pelo microcontrolador, que executa a função requerida.

Figura 11– Diagrama de blocos da central de controle do forno.

O layout da placa eletrônica foi transferido para uma placa de cobre posteriormente corroída e os componentes soldados.

4.1.4 Misturador

Para a mistura dos ingredientes foi adquirido e testado para compor a mini linha uma amassadeira conjugada monofásica de $\frac{3}{4}$ de cv da empresa Braesi modelo AELI-715, que possui dois eixos, estrutura em aço com pintura epóxi, cuba em aço inox com capacidade para 8 Kg de massa pronta. Somente as funções de misturador do equipamento foram preservadas, além da remoção de sua tampa e sensor de detecção de abertura. Um motor redutor (90 V, 0.75 A, CC) foi acoplado junto ao eixo do misturador, responsável pelo despejo da massa, assim após o término da mistura, o sistema pode transferir automaticamente o conteúdo para a extrusora. A foto do misturador é mostrada na figura 12.

Figura 12 – Misturador Braesi modelo AELI-715.

4.1.5 Extrusão, corte e separação do biscoito

Para o desenvolvimento de um processo automatizado afim de extrusar, cortar e separar o biscoito, foi necessário o projeto de um sistema que fosse capaz de receber a massa do misturador, moldar, cortar e transportar à entrada do forno de

forma automática. Os projetos destinados para a operação citada serão apresentados nos tópicos subsequentes.

4.1.5.1 Extrusão do biscoito

A extrusão é um processo de produção mecânica que trabalha de forma semi-contínua, onde o material a ser extrusado é forçado por uma matriz tomando a forma desejada pelo equipamento, em alguns casos essas matrizes de saídas podem ser trocadas de acordo com a aplicação desejada. Normalmente uma extrusora possui uma rosca sem fim que faz a compressão do alimento à matriz que irá dar o formato ao produto. Porém, a extrusora projetada e desenvolvida neste projeto foi baseada em um tubo de aço inox, com diâmetro de 155 mm e comprimento de 515 mm, na entrada deste tubo foi acoplada uma bandeja que direciona a queda da massa proveniente do misturador. Para que o biscoito pudesse ser moldado, à saída deste tubo foi acoplada uma tubulação mais fina de aço inox, medindo 500 mm de comprimento e 33.60 mm de diâmetro, esta tubulação recebeu quatro orifícios cilíndricos de 15.80 mm com espaçamento entre eles de 82 mm. Assim, quando a massa é prensada, esta sai por esses orifícios em formato de canudo, caso se deseje criar outras formas de biscoitos, basta acoplar a esta saída uma nova matriz. Para a extrusão da massa foi utilizado um pistão pneumático com acionamento e recuo a ar comprimido, medindo 70 x 590 mm e haste de 25.30 x 540 mm, que proporciona um avanço de 490 mm. Na haste deste pistão foi acoplado um êmbolo de aço inox responsável por comprimir a massa pelo sistema. Para a verificação da eficácia do pistão escolhido, foram realizados cálculos que são apresentados a seguir:

$$F_t = P \times A \quad (8)$$

Onde:

F_t = força total

p = pressão relativa

A = área do êmbolo (cm^2)

Assim:

Para o curso de avanço a força teórica será: $F_a = p \times \frac{D^2 \times \pi}{4}$ (9)

Para o curso de retorno a força teórica será: $F_r = p \times \frac{(D^2 - d^2) \times \pi}{4}$ (10)

Onde:

F_a = força de avanço

F_r = força de retorno

p = pressão relativa de trabalho em bar

*D*² = diâmetro do êmbolo em cm

*d*² = diâmetro da haste do cilindro em cm

Cálculo da força do avanço do pistão:

Dados:

- Diâmetro do êmbolo: 7 cm
- Diâmetro da haste: 2,5 cm
- Pressão do compressor: 120 psi ou 8,30 bars
(1 bar é aproximadamente 14.5psi)

$$F_a = p \times A \quad (11)$$

$$F_a = p \times \frac{(7^2 - 2.5^2) \times 3.14}{4}$$

$$F_a = 278.54N$$

$$1 \text{ Newton} = 0.102 \text{ KgF}$$

$$F_a = 28.41\text{KgF} \pm 28\text{KgF}$$

Como os testes em laboratório, que contaram com a utilização de um dinamômetro, mostram que uma força acima de 20 KgF seria suficiente para que o sistema funcionasse e os cálculos apontaram que o pistão escolhido promoveria uma força de 28 KgF, pode-se comprovar a eficiência do equipamento. É importante ressaltar que um compressor com maior capacidade e pressão promoveria uma maior força e também permitiria a aquisição de um pistão com dimensões reduzidas.

4.1.5.2 Corte do biscoito

Para a realização do corte do biscoito, um pistão com avanço de 60 mm, medindo 170 x 26.55 mm, recebeu uma lâmina de aço inox com comprimento de 400 mm, largura de 20 mm e espessura de 2 mm, para sua fixação ao pistão uma peça com tamanho similar, porém com largura de 300 mm foi unida a lâmina e a uma peça em formato de “L”, que foi fixada ao pistão, a peça em “L” recebeu um furo em forma elipsoidal, para permitir futuras regulagens da lâmina. Quando o pistão é acionado, a faca passa rente aos furos da extrusora, proporcionando o corte do biscoito. O diagrama de funcionamento do corte do biscoito é apresentado na figura 13.

Figura 13 – Diagrama do sistema de corte da massa.

O acionamento do pistão foi realizado através de uma válvula 3/2, comandada por solenóide, assim através de um comando eletrônico proveniente da placa de controle, o pistão é acionado, e quando esse comando eletrônico é retirado o pistão retorna a seu estado de repouso. É possível através de um comando na placa de controle, configurar o tempo entre um acionamento e outro, dimensionando o tamanho do biscoito.

4.1.5.3 Esteira separadora

Se o corte da massa fosse sequencial e o biscoito fosse transportado diretamente ao forno, o crescimento da massa causado pelo aquecimento do alimento faria com que os biscoitos se unissem a seus vizinhos da horizontal. Para que pudesse haver a separação destes, antes do assamento, uma esteira denominada de esteira separadora foi adquirida e adaptada ao projeto. As dimensões da esteira são: 720 x 720 x 100 mm e a correia fabricada com material PVC, material recomendado para transporte de alimentos, possui largura de 615 mm. É importante ressaltar que a estrutura que suporta a extrusora foi montada junto à estrutura da esteira. Para a movimentação da esteira foi utilizado um motor trifásico de 3300 rpm e 0.55 kW. O projeto da esteira separadora e a extrusora são apresentados na figura 14.

Figura 14 – Projeto da esteira separadora e da extrusora.

4.1.5.4 Suporte misturador, extrusora e esteira separadora

Uma mesa em aço metalon 50 x 30 mm foi desenhada e montada medindo 1,10 x 1,10 x 0,70 m, seu tampo foi cortado em aço de espessura 3 mm. Para elevar o misturado, proporcionando o escoamento da massa à extrusora, duas chapas de aço de 1100 x 300 mm e espessura de 5 mm foram soldadas a esta mesa, uma chapa em forma de “U” medindo 700 x 300 x 200 mm e de espessura de 5 mm, com furos elipsoidais foi acoplada as chapas soldadas a mesa, os furos elipsoidais permitem a regulagem da altura da peça em “U”, proporcionando ajuste da altura do misturador.

A esteira separadora foi presa a mesa e, a estrutura que suporta a extrusora foi montada junto a base da estrutura da esteira, para isso duas chapas de 155 x 810 mm e espessura de 6,22 mm foram acopladas por quarto parafusos cada. Uma chapa em forma de “U” de 700 x 155 x 100 mm e espessura de 5 mm foi soldada e recebeu um furo central para acomodar e fixar o tubo principal de aço inox da extrusora. Nesta mesma base uma chapa em formato de “L” com dimensões de 700 x 80 x 25 mm e espessura de 5 mm foi presa a parte superior das chapas, onde foi acoplado o pistão. A estrutura projetada é apresentada na figura 15 e a disposição dos equipamentos ao término do desenvolvimento é apresentado na figura 16.

Figura 15 – Projeto para a sustentação do misturador, extrusora e esteira separadora.

Figura 16 – Estrutura desenhada para a sustentação do misturador, extrusora e esteira separadora.

4.1.6 Painel de controle da esteira separadora, misturador e extrusora

O dispositivo responsável por controlar a esteira separadora, o misturador e a extrusora foi montado em um painel elétrico com dimensões de 50 x 30 x 20 cm. Este painel foi equipado com um contator de 25 A, uma placa controladora, um transformador e um contator de 9 A.

A entrada do contator de 25 A recebeu 3 fases elétricas provenientes do painel de controle central através de um cabo PP 4 vias 2.5 mm cada via, e para facilitar a separação das partes da linha, quando esta não estiver sendo usada, foram utilizados conectores elétrico industrial macho e fêmea. Duas fases elétricas foram retiradas diretamente do disjuntor do painel de controle central (80 A) e a terceira fase foi retirada do contator principal do painel de controle central (63 A).

Assim, o contator do segundo painel é armado apenas quando o sistema do painel de controle central for ligado, este circuito foi montado principalmente para que todo o sistema possa receber botões de emergência. A quarta via do cabo PP foi utilizada para ligar o terra. Um transformador de tensão foi ligado ao contator para produzir as tensões necessárias para a alimentação do sistema, essas tensões foram 0 V, 9 V, 18 V e 60 V.

A Placa eletrônica foi projetada para despejar a massa à extrusora, acionar a extrusora, acionar o sistema de corte do biscoito e acionar a esteira separadora.

4.1.6.1 Placa controladora da esteira separadora, misturador e extrusora

A placa eletrônica utilizada no painel de controle da esteira separadora, do misturador e da extrusora teve sua entrada de alimentação conectada a um transformador que forneceu as tensões 0 V, 9 V, 18 V e 60 V, respectivamente circuitos eletrônicos retificadores de tensão foram projetados para proporcionar ao sistema as tensões 0 V, 12 V, 24 V e 90 V. Um circuito regulador de tensão transformou os 12 volts em 3.3 volts para alimentar o microcontrolador PIC16F628 e o módulo UBEE, esses dois componentes são a base da placa eletrônica, sendo o UBEE responsável pela comunicação sem fio e o PIC responsável pelo controle dos acionamentos. As funções desta placa eletrônica são: acionamento da válvula pneumática do pistão da extrusora, acionamento da válvula do pistão responsável pelo corte do biscoito, acionamento do motor responsável pelo despejo da massa e acionamento da esteira separadora.

- ***Acionamento da válvula pneumática do pistão da extrusora***

O sinal enviado pelo software de controle, através do módulo UBEE é recebido pelo microcontrolador que por sua vez envia para sua saída um sinal elétrico que é utilizado para chavear um transistor BC337, que ao conduzir fornece 24 volts para acionamento do solenóide da válvula, a válvula utilizada é uma 5/2 vias, por isso são necessários 2 solenóides, um para acionar a descida e o outro para acionar a subida do pistão.

- ***Acionamento da válvula do pistão responsável pelo corte do biscoito***

O circuito de acionamento do pistão de corte foi o mesmo utilizado no acionamento do pistão da extrusora, porém como se utilizou uma válvula 3/2 vias, apenas um circuito foi necessário, pois quando esta deixa de ser estimulada, faz com que o pistão retorne ao ponto inicial.

- ***Acionamento do motor responsável pelo despejo da massa***

Para este acionamento também foi utilizado um circuito com base no transistor BC337, porém este circuito foi projetado para fornecer 90 volts, tensão requerida pelo motor acoplado ao misturador. Para proporcionar a subida e descida da cuba são necessários dois circuitos, que proporcionarão o giro do motor em dois sentidos. Para a automação do processo de controle da subida e descida foram utilizados dois sensores finais de curso que permitem através de uma programação interna do microcontrolador PIC desligar o motor quando a cuba do misturador acionar qualquer um dos sensores finais de curso.

- ***Acionamento da esteira separadora***

Para o acionamento da esteira separadora foi utilizado um inversor de frequência WEG modelo CFW 08 que aciona e regula a velocidade do motor através de programação interna. O motor da esteira separadora é energizado através de um contator que liga o inversor que já possui em sua memória a velocidade e sentido de rotação desejado.

4.1.6.2 Sistema pneumático de acionamento da extrusora

Para o acionamento do pistão da extrusora um sistema pneumático foi montado utilizando um filtro regulador de fluxo com copo de proteção metálico e manômetro com dreno manual, uma válvula solenóide 5/2 biestável com sinal prioritário, dois silenciadores, três conexões rápidas para válvula, duas conexões

rápidas para filtro regulador, uma válvula reguladora de fluxo com conexão rápida e quatro metros de mangueira flexível. O filtro regulador recebe o ar comprimido e sua saída é ligada a válvula reguladora que tem a finalidade de alterar a velocidade com que o pistão irá trabalhar, sua saída é conectada à válvula e as duas saídas das válvulas são ligadas ao pistão. O diagrama de funcionamento do circuito é ilustrado na figura 17.

Figura 17 - Circuito eletro-pneumático para acionamento da extrusora.

4.1.7 Projeto e desenvolvimento dos sensores

A transmissão telemétrica dos dados coletados nos sensores é enviada via sistema de rede sem fio. O sistema é composto de dois módulos:

- **O primeiro módulo é a estação radio base (ERB)** que recebe os dados providos pelos sensores e alimenta o sistema computacional.
- **O segundo módulo é um nó ativo** que contém um sistema de condicionamento de sinal do sensor e envia os dados via transmissão sem fio, usando o protocolo *zigbee* na reconfiguração estrela.

4.1.7.1 Estação rádio base (ERB)

Para a recepção dos dados enviados pelos sensores telemétricos um sistema receptor wireless foi montado (figura 18), os dados enviados trabalham na frequência de 2.4Ghz, por ser uma frequência ISM reservada internacionalmente para aplicações industriais, científicas e médicas. As funções deste sistema são:

- Receber os dados dos sensores via tecnologia *zigBee*;
- Armazenar estes dados recebidos em um banco de dados e mostrar graficamente na tela;
- Processar as informações em tempo real utilizando uma rede neural artificial;
- Enviar ações aos dispositivos atuadores que modificarão as variáveis na entrada da linha.

Figura 18 – Diagrama esquemático do primeiro módulo, estação Rádio Base.

4.1.7.2 Sensores e formatos dos nós

Cada sensor possui um dispositivo *ZigBee* (NSZ) denominado nó. Cada nó com tecnologia Zigbee é composto de um microcontrolador, um módulo *Ubee* e a instrumentação necessária para acondicionar os sinais de saída dos sensores.

Assim, os nós coletam os dados dos sensores e os transmitem para a estação rádio base. O diagrama de blocos do equipamento é apresentado na figura 19.

Para a medição da temperatura foram utilizados sensores termopares do tipo K, que são responsáveis por medir a temperatura das zonas do forno e a temperatura na superfície da esteira, ainda para a medição da qualidade da mistura foi utilizado um nó sensor de torque.

Figura 19 – Diagrama de blocos dos sensores que utilizarão a tecnologia *ZigBee* para envio de dados.

Os nós ativos recebem e adequam os dados captados dos sensores através de um software de controle “multicast” que entrega a informação simultaneamente para múltiplos destinatários, utilizando a estratégia mais eficiente para realizar a tarefa, além da implementação de um controle anti-colisão que utiliza o algoritmo CSMA-CA (Carrier Sens Multiple Access with Collision Avoidance) (HARGREAVES, 2003), com esse sistema a transmissão dos dados é realizada de forma que estes cheguem sem interferências a seu destino, estes softwares utilizam o protocolo *ZigBee* e são processados diretamente no processador do NSZ que são controlados diretamente pela ERB.

4.1.7.3 Desenvolvimento dos dispositivos

O *layout* dos esquemas elétricos dos dispositivos foi realizado utilizando a ferramenta PCAD Schematics 2006 e para o *layout* das placas de circuito impresso

foi utilizada a ferramenta PCAD PCB 2006. Os layouts desenvolvidos foram transferidos para placas de fenolite cobreadas de face simples com 0,35 μm de camada de cobre utilizando o método de transferência térmica. As placas foram corroídas em solução de percloroeto de ferro. O *firmware* que é um programa ou conjunto de instruções que são programadas diretamente no hardware de um equipamento eletrônico, foi desenvolvido para os microcontroladores dos três tipos de dispositivo utilizando o ambiente MPLAB da Microchip® e o compilador PICC - PCW da CCS® (CCS, 2011). As etapas que envolvem o desenvolvimento de uma aplicação neste ambiente são mostradas na figura 20.

Figura 20 – Ambiente de desenvolvimento do *firmware*.

4.1.8 Nó sensor móvel de temperatura para monitoramento do biscoito em processamento

Este dispositivo foi projetado para coletar a temperatura interna do alimento durante seu percurso na esteira de processamento do forno tipo túnel. Consiste de um amplificador monolítico para termopar com compensação de junção fria AD595 (AnalogDevices, 1999), um módulo transceptor RF modelo U-BEE® (Fractum, 2011) e um microcontrolador PIC 12F675 (Microchip, 2011). O diagrama de blocos do dispositivo projetado é ilustrado na figura 21.

Figura 21 – Diagrama de blocos do sensor móvel.

A alimentação dos circuitos foi feita através de duas pilhas AAA de 1,5V cada. O microcontrolador recebeu um sistema embarcado, para o controle das funções do nó sensor. O fluxograma do algoritmo para o dispositivo desenvolvido é apresentado na figura 22.

Figura 22 – Fluxograma do software do sensor móvel.

4.1.8.1 Primeiro encapsulamento do sensor móvel

Para que o sensor pudesse ser transportado pela esteira e suportar as altas temperaturas que o forno impõe, dois encapsulamentos foram desenvolvidos e testados para proteger o sensor. Esses invólucros visam trabalhar com temperaturas superiores a 200° C em seu exterior, mas a condição de funcionalidade é que a temperatura interna não exceda o valor suportado pelos componentes eletrônicos utilizados no sensor, que é de 75° C.

O primeiro invólucro foi construído com cimento refratário em formato cilíndrico medindo 12 cm de altura e 3 cm de diâmetro, com uma cavidade interna para a instalação do equipamento eletrônico. Uma mufla eletrônica que varia a temperatura de 23 °C à 180 °C foi utilizada para os testes do primeiro protótipo, que foi submetido a temperatura máxima da mufla, a temperatura interna foi monitorada durante o tempo de exposição, para fazer essa captura um software foi desenvolvido em linguagem Delphi que recebe os dados via rede wireless Zigbee.

4.1.8.2 Segundo encapsulamento do sensor móvel

Os testes práticos realizados com o primeiro tipo de encapsulamento mostram que este não era resistente o suficiente para conter o calor irradiado, fato explicado pelo forno atingir temperaturas acima de 220 °C e o cimento refratário levar um tempo elevado para se resfriar, assim o circuito eletrônico interno logo atingia os 75 graus de trabalho máximo, afetando o nó sensor. Um novo invólucro foi desenvolvido utilizando a mesma tecnologia, porém com maior dimensão, medindo externamente 20,5 x 7,2 cm em formato cilíndrico e internamente 14 x 4,6 cm também em formato cilíndrico. Para a confecção foram utilizados tubos de PVC com dimensões diferentes, e através de ajustes com parafusos o tubo de menor tamanho pode ficar no centro do tubo de maior tamanho, e após a colocação de uma tampa na parte inferior, o cimento refratário foi adicionado entre as paredes dos tubos e nas duas tampas. O sistema de fechamento desta vez foi realizado através da tampa

superior e na junção utilizou-se selante a base de silicone para altas temperaturas para vedar o nó sensor.

Na parte superior um pequeno furo foi feito para que a junção termopar pudesse ficar exposta, deixando apenas o sensor fora do encapsulamento. Antes da colocação do sensor no forno este ainda foi envolvido em uma camada de lã de rocha para uma maior proteção.

4.1.8.3 Calibração do sensor de temperatura móvel

Para a calibração dos sensores, utilizou-se uma fonte de calor inserida em um recipiente isolante térmico. Dentro deste recipiente foram inseridos os sensores e o termômetro para monitoramento da temperatura. Durante o processo de calibração os dados de temperatura do sensor padrão e o sinal elétrico de saída de três sensores foram relacionados para se obter os gráficos de calibração, bem como suas respectivas equações. Essas equações foram utilizadas como equações de calibração dos sensores, ou seja, utilizadas para relacionar a medida da saída elétrica com uma unidade de temperatura.

Após a calibração, o erro de precisão dos sensores foi calculado. Para este erro foram tomadas diversas medidas de uma mesma temperatura e a precisão de uma dada medida foi calculada no intervalo de interesse. Sendo precisão o grau de variação de uma determinada medida. A fórmula utilizada para o cálculo da precisão dos sensores foi:

$$P_m = \left| 1 - \left(\frac{X_{medido} - X_{médio}}{X_{médio}} \right) \right| \times 100 \quad (12)$$

Onde: x_{medido} : medida de uma dada temperatura no intervalo de interesse trabalhado;
 $x_{médio}$: média das diversas medidas de uma mesma temperatura;

4.1.9 Sensor de medição de torque - farinógrafo

Uma vez que o torque do motor que aciona as pás do misturador varia com a mudança das características da massa de farinha, a corrente que alimenta sua bobina também varia. Assim, um sistema de medição de torque foi adequado a um misturador comercial para avaliar a eficiência da medida do torque em função da corrente e a sua relação com as propriedades da farinha. Para controlar e monitorar todo o sistema de medição de torque, um sistema de aquisição de dados da corrente da bobina do motor do misturador foi desenvolvido.

Para medir a corrente, foi utilizado o sensor CSLA1CD (HONEYWELL, 2011), este sensor é baseado em um sensor de efeito *hall* e tem capacidade de aplicação em medição de correntes AC e DC. A saída do CSLA1CD é uma tensão proporcional a corrente que circula através do seu núcleo toroidal, a corrente da bobina do motor trabalha com tensão AC e frequência de 60 Hz e a amplitude varia proporcionalmente de acordo com a corrente utilizada, portanto o sistema de torque ligado ao motor pode ser monitorado através da corrente que flui no sistema.

Para o desenvolvimento foi utilizado um circuito detector de pico baseado no amplificador operacional LM358 a fim de medir a amplitude do sinal adquirido pelo sensor CSLA1CD. Este sinal condicionado foi digitalizado utilizando o conversor analógico-digital de um microcontrolador PIC12F675 que é responsável também por controlar o acionamento do misturador através de um atuador que utiliza um tiristor (BT16A). O dispositivo permite realizar a coleta de dados e o controle do misturador de forma remota através da rede *Zigbee* e para este fim foi utilizado um módulo transceptor RF modelo U-BEE®. O diagrama de blocos do sensor de medição de torque (farinógrafo) é apresentado na figura 23.

Figura 23 – Diagrama de blocos do controlador e sensor do farinógrafo.

A alimentação do circuito foi feita através de um transformador 220/9 VAC e uma fonte regulada com saídas de 9 V para o CSLA e 3,3 V para o restante do circuito. O fluxograma do algoritmo para o dispositivo desenvolvido é apresentado na figura 24.

Figura 24 – Fluxograma do software do controlador e sensor do farinógrafo.

4.1.10 Software de controle

O software de controle foi desenvolvido em linguagem *visual basic* versão 6.0 e conecta-se aos nós sensores através do módulo USBEE, que ao ser instalado no microcomputador atribui uma porta serial para sua comunicação. A conexão do nó coordenador com os nós sensores é realizada ao clicar o botão *con. serial*, para isso é necessário selecionar a porta *com* correta e clicar no referido botão, caso a conexão seja bem sucedida o sistema retornará a mensagem: Coordenador: Conectado.

Com o módulo coordenador operando, cada botão do sistema envia o nó que deverá ser coordenado, seguido dos comandos a serem executados. As funções do sistema são:

Módulo de controle UBEE

Identifica os nós sensores em funcionamento, informando funções específicas de cada equipamento, como número de série, intensidade do sinal, funcionamento entre outros.

Módulo misturador

Misturador on - Liga o misturador e inicia a recepção do sinal do farinógrafo, os valores coletados são apresentados no campo coleta de corrente a cada 1 segundo.

Misturador off – Desliga o misturador, mas não encerra a coleta do sinal do farinógrafo, que continua a ser exibido ou armazenado.

Coleta de corrente – Captura o sinal emitido pelo farinógrafo a cada vez que é pressionado.

Gravar – Grava em um arquivo texto o sinal enviado pelo farinógrafo, o nome do arquivo pode ser previamente nomeado.

Gráfico – Abre uma nova janela do software de controle, onde os gráficos do sinal do farinógrafo, o desvio padrão deste sinal e a derivada do desvio padrão são plotados em tempo real.

DV(X) – DV(x-180) – Seta o número de pontos para o cálculo do desvio padrão.

Jan – Seta o número de pontos para o cálculo da derivada do desvio padrão.

Módulo Esteira

Liga Horário – Liga a esteira do forno no sentido horário, fazendo com que a esteira se movimente da entrada para a saída do forno, a velocidade pode ser variada através do botão deslizante.

Liga A. Horário – Liga a esteira do forno no sentido anti-horário, a velocidade pode ser variada através do botão deslizante.

Para – Desliga a esteira.

Módulo Esteira 2

Esteira on – Liga a esteira separadora, sua velocidade ou sentido podem ser alterados diretamente no inversor de frequência.

Esteira off – Desliga a esteira separadora.

Desce misturador – ativa o motor responsável pelo despejo da massa, descendo a cuba do misturador.

Sobe misturador – ativa o motor responsável pelo despejo da massa, para o retorno da cuba do misturador à posição inicial.

Desce pistão – aciona o sistema pneumático da extrusora, avançando o pistão e comprimindo a massa dentro do cilindro.

Sobe pistão – aciona o sistema pneumático da extrusora, recuando o pistão.

Vel. faca de corte – informa ao software de controle a velocidade em que a faca de corte foi programada, essa informação é utilizada apenas no modo de controle automático.

Módulo Controle do forno

R1, R2, R3, R4, R5 e R6 – Liga a respectiva resistência ao ser acionado, e desliga ao ser desacionado.

Módulo Temperatura

Coleta – Captura e apresenta na tela a temperatura dos seis sensores instalados nas zonas do forno.

Gravar – Armazena em um arquivo texto os valores colhidos pelos seis sensores instalados nas zonas do forno.

4.1.11 Implantação de algoritmo no software de controle para controle automatizado do processo.

Através do cálculo da derivada do desvio padrão que aponta para a estimativa do ponto ideal da massa, o software de controle desenvolvido recebeu uma nova programação em um botão denominado controle automático. A programação foi baseada no algoritmo da figura 25.

Figura 25 – Fluxograma programação do software de controle, para botão processo automatizado.

Ao ser acionado o processo automatizado no software de controle, este envia comandos para ligar os dispositivos, em seguida aguarda até que os ingredientes sejam adicionados ao misturador, com uma confirmação do usuário o sistema liga o misturador e o farinógrafo. Enquanto a massa é misturada o sistema faz a captura dos dados coletados pelo farinógrafo em intervalos de 1 segundo, esses dados são plotados para visualização em tempo real em gráficos e armazenados em um arquivo texto, ao mesmo tempo o software calcula o desvio padrão e sua derivada.

Na tela de estimativa do ponto ideal da massa podem ser observados três gráficos, onde o primeiro trata-se do sinal elétrico proveniente do farinógrafo, a partir dos dados do primeiro gráfico é plotado o gráfico seguinte com o cálculo do desvio padrão, que da origem ao terceiro gráfico que plota a derivada do desvio padrão. Os cálculos são realizados, pois o desvio padrão representa a variância do sinal do farinógrafo, podendo proporcionar numericamente pontos de estabilidade do sinal, que podem ser associados a estimativa do ponto ideal da massa. Mas para que se pudesse fazer um sistema que identificasse o ponto ideal da massa em tempo real, foi necessário calcular a derivada a partir do desvio padrão, pois pontos de estabilidade levam a derivada a valores próximos a 0.

Para viabilizar a detecção do software de valores próximos a zero, uma variável denominada Janela foi adicionada para receber um intervalo de verificação, assim o sistema faz a média dos valores da derivada de acordo com a janela escolhida. Além da janela para a média das derivadas é possível setar também um valor a ser utilizado para verificação se essa média tendeu a zero, para que seja possível aplicar tolerância ao sistema, por exemplo, ao invés de verificar se a média chegou ao valor exato de zero, pode se verificar se a média chegou por exemplo, a 0,001, assim se os valores da média escolhida estiverem na faixa do valor a ser verificado o sistema desligará o misturador e iniciará o processamento dos biscoitos.

É possível observar no segundo gráfico uma defasagem do cálculo no intervalo de 0 a 180 segundos, isso se dá devido o sistema utilizar a média de 180 pontos, como o sistema trabalha em tempo real é necessário a captura dos primeiros 180 valores para que o cálculo seja iniciado, consequentemente o terceiro gráfico inicia sua plotagem aos 360 segundos, pois segue a média de 180 pontos do desvio padrão, necessitando também aguardar os primeiros 180 valores.

Após o desligamento do misturador, o software desce sua cuba e entra em modo de espera em um tempo previamente determinado, para que a massa possa

ser despejada na extrusora, ao final desse período, o sistema liga a esteira separadora, aciona a extrusora e o cortador. A velocidade do cortador pode ser previamente configurada, criando biscoitos maiores ou menores, de acordo com a velocidade do corte. A configuração da velocidade do corte é manual, porém foi criada uma variável para carregar previamente essa velocidade, assim o programa proporcionalmente regula a temperatura e a velocidade da esteira, que são ligadas em seguida. Os valores dos sensores de temperatura, incluindo o nó sensor móvel de temperatura são plotados na tela e armazenados em arquivos textos para futuras análises.

4.2 Verificação da viabilidade da detecção automática da estimativa ponto ideal da massa

Após o término da montagem total da linha e da realização de testes básicos de seu funcionamento, o passo seguinte foi verificar a capacidade do sistema em estimar em tempo real o ponto ideal da massa.

Segundo a literatura, alimentos viscoelásticos como massas de panificação necessitam de uma ação de desdobramento e estiramento para cisalhar o material. Equipamentos apropriados incluem misturadores de rosca dupla e misturadores planetários com lâminas entrelaçadas. A taxa de mistura é caracterizada por um índice de mistura, e a constante dessa taxa depende das características do misturador e do líquido. O gasto de energia de um misturador varia com a natureza, quantidade e viscosidade dos alimentos, e também pela posição, tipo, velocidade e tamanho do rotor (FELLOWS, 2006).

Espera-se que a associação da medição proveniente do farinógrafo e de um algoritmo matemático seja capaz de iniciar o processo de fabricação do alimento automaticamente. Para provar a viabilidade do processo foi realizado durante 30 minutos a aquisição de dados do farinógrafo com as composições:

- Sem carga no misturador;
- Farinha e água;
- Receita básica de biscoito.

4.2.1 Aquisição e análise do sinal do farinógrafo sem carga no misturador

Para a verificação do comportamento do misturador sem carga, o sistema de controle recebeu durante 30 minutos os dados colhidos pelo farinógrafo em intervalos de 1 segundo, esses dados foram armazenados em um arquivo texto e ao término foram compilados no programa *OriginPro 8*.

4.2.2 Aquisição e análise do sinal do farinógrafo em uma mistura de farinha e água

O segundo passo foi testar uma mistura de farinha e água em triplicata, para que se pudesse observar o comportamento ao longo do tempo dessa mistura. Para a compensação dos ingredientes a serem acrescentados na receita do biscoito, que leva 3 Kg de farinha e 1,8 Litros de água, os testes de farinha e água levaram 3,480 kg de farinha e 2,090 litros de água. Como o sinal oscila significativamente em um curto intervalo de tempo, para uma melhor visualização foi utilizada a função denominada *smoothing* do *OriginPro8* com intervalo de 50 pontos. O *smoothing* (que é um método de suavização para remoção de ruídos, afim de revelar informações importantes em um sinal). O ruído em um dado experimental pode camuflar aspectos importantes, como picos, vales, ou larguras de pico, também pode dificultar o cálculo das características dos sinais. Como o sinal dos gráficos plotados para este experimento oscilam consideravelmente em um pequeno intervalo de tempo, utilizou-se a função *Smoothing using Adjacent Averaging* que é a suavização por média adjacente. Esse processo plota a média móvel de um determinado intervalo de valores (ORIGINLAB, 2012).

4.2.3 Aquisição e análise do sinal do farinógrafo para uma receita de massa de biscoito

Ao término dos testes com mistura de farinha e água, o passo seguinte foi testar uma receita básica de biscoito em triplicata, para que se pudesse observar o comportamento ao longo do tempo do sinal adquirido pelo farinógrafo dessa receita. A receita básica utilizada contou com os seguintes ingredientes:

- 3Kg de farinha de trigo;
- 600 g de Gordura vegetal hidrogenada;
- 105 g de sal;
- 51 g de fermento químico;
- 6 g de Bicarbonato de sódio;
- 12 g de lecitinha de soja;
- 1,8 litros de água.

4.2.4 Relação entre desvio padrão e a estimativa do ponto ideal da massa

Supondo que o ponto da massa esteja relacionado com a homogeneidade da mesma, espera-se que a variação do sinal obtido neste ponto tenda a ser constante, isto é, o desvio padrão de um intervalo de sinal deverá ser próximo ao desvio padrão do intervalo do sinal anterior, como também notar uma maior variação de energia quando acontece a quebra das pontes dissulfeto e das ligações de hidrogênio, demonstrando que se ultrapassou o ponto ideal da massa, tal quebra deve-se ao alinhamento dos polímeros na direção do cisalhamento e de algum rompimento nas ligações cruzadas dissulfeto, reduzindo os o tamanho dos polímeros (DAMORAN; PARKIN; FENNEMA, 2010).

Para que se pudesse criar um modelo matemático capaz de identificar o ponto ideal da massa em tempo real, analisou-se a variação da amplitude do sinal do farinógrafo. Com isso propõe-se um modelo baseado na variância do sinal

adquirido através do cálculo do desvio padrão para um determinado intervalo de sinal. Para a identificação do melhor intervalo de tempo, foram realizados testes utilizando o software OriginPro8. Vários intervalos foram testados até que se chegou ao valor de 180 segundos, que melhor descreve o comportamento da envoltória superior do sinal adquirido, a fórmula para o cálculo do desvio padrão de 180 pontos calculado no tempo i é apresentada à seguir.

$$S_i = \sum_{n=i-180}^i \frac{(X_n - \bar{X})^2}{180} \quad (13)$$

4.3 Teste final do projeto

Ao término do desenvolvimento do software de controle, a linha de biscoitos desenvolvida foi submetida novamente a testes. A função de processo automatizado foi acionada no software de controle, em seguida foram inseridos no misturador 3,480 kg de farinha e 2,090 litros de água, com a confirmação da adição dos ingredientes, o sistema ligou o misturador e iniciou a captura do sinal do farinógrafo, os dados capturados foram gravados em um arquivo texto e os gráficos do sinal do farinógrafo, desvio padrão calculado e a derivada do desvio padrão foram plotados na tela do software de controle em tempo real.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Testes de funcionamento do forno elétrico

Após a montagem do forno elétrico, mesmo antes da instalação da central de comandos e da colocação dos tijolos refratários, o forno foi testado através de uma ligação direta e aqueceu conforme o previsto. A etapa da montagem do forno durante o teste é apresentada na figura 26. É possível também observar nesta figura o barramento de cobre que interligou as resistências e a lã de rocha utilizada como isolante térmico.

Figura 26 – Forno elétrico tipo túnel, etapa da realização do primeiro teste de aquecimento.

Após o primeiro teste que promoveu a acomodação do material metálico do forno, foram realizados ajustes na fixação das chapas e resistências. A estrutura interna do forno, os arrebites e as resistências utilizadas são apresentadas na figura 27.

Figura 27 – Imagem interna do forno.

Após os testes de aquecimento do forno, o passo seguinte foi verificar o funcionamento da esteira transportadora, para isso uma ligação direta do motor trifásico resultou imediatamente no movimento desta, foram feitos ajustes nos parafusos tensionadores a fim de centralizar a esteira com relação ao tambor e os roletes. A esteira transportadora montada é apresentada na figura 28, ainda nesta figura pode-se observar a estrutura de sustentação do forno, a estrutura de sustentação dos tambores, a esteira fabricada em malha de aço e o motor redutor utilizado.

Figura 28 – Detalhes da esteira transportadora do forno elétrico.

A estrutura de sustentação detalhada da esteira transportadora é mostrada na figura 29.

Figura 29 – Detalhes da estrutura de sustentação dos tambores da esteira transportadora do forno elétrico.

Após os testes iniciais, o painel de controle foi instalado e foram feitos testes utilizando a infra-estrutura de rede *Zigbee* e software de controle desenvolvido. Foram enviados comandos de acionamento das resistências elétricas que atuaram sobre o sistema conforme o esperado, porém nas primeiras 5 horas de utilização do forno, este exalou um forte odor e fumaça que foram originados pelo verniz que cobre as resistências e o óleo utilizado na conformação das chapas de aço. Finalmente foram enviados comandos para o tracionamento da esteira em ambos os sentidos, e em várias velocidades de rotação. Novamente, o sistema respondeu como o esperado.

Para testar a coleta dos dados e levantar o perfil do forno, todas as resistências foram ligadas em potencia máxima e o sensor móvel de temperatura acompanhou o deslocamento da esteira. Os dados de temperatura foram enviados para a estação rádio base e armazenados em um banco de dados. O sensor percorreu a esteira em três posições: região da direita, região da esquerda e região central, esta operação foi realizada 10 vezes, os gráficos mostrados são a média das temperaturas medidas. O perfil do forno obtido usando o nó sensor móvel é apresentado na figura 30.

Figura 30 – Perfil de temperatura do forno elétrico obtido pelo sensor móvel.

O gráfico do perfil de temperatura no forno mostra que independente da posição do sensor, o perfil de temperatura será o mesmo, ou seja, independente da localização do alimento a transmissão de calor em todas as direções será constante, não havendo zonas de maior ou de menor temperatura que possam prejudicar o processamento do preparo dos alimentos.

Nota-se também que nos primeiros 20 cm a uma velocidade de 0,46 cm/min a temperatura lida no sensor ainda não atingiu o equilíbrio. Como a medição na entrada do forno condiz com a temperatura de estabilidade do forno, conclui-se que o sensor leva um determinado tempo para entrar em equilíbrio, o que não é percebido em fornos tradicionais, pois os sensores fixos já estarão com a temperatura equalizada.

Nas mesmas condições foram tomadas as medidas das temperaturas durante a passagem do biscoito pelo forno. O perfil de temperatura captado dentro do alimento é apresentado na figura 31.

Figura 31 – Perfil de temperatura no alimento.

Nota-se nesta figura que é possível saber a temperatura no centro do biscoito em cada posição do forno. Esta informação pode ser utilizada para otimizar diversos fatores na produção do alimento assado em forno contínuo. No teste de monitoramento do biscoito foi preparada uma massa de biscoito tipo *cracker*, o sensor móvel percorreu a esteira do lado do alimento, a velocidade da esteira foi configurada para trabalhar a 0,46 cm/min. O termopar do sensor que atravessa o encapsulamento por um furo no centro da tampa foi devidamente posicionado no centro da massa do biscoito, para monitorar a temperatura durante o cozimento do biscoito. A espessura da massa utilizada foi de 10 mm em formato circular de 7,5 cm de diâmetro. O forno elétrico terminado é apresentado nas figuras 32 e 33.

Figura 32 – Imagem do forno elétrico (entrada do forno).

Figura 33 – Imagem do forno elétrico (saída do forno).

5.2 Central de controle do forno elétrico

Os diagramas dos circuitos eletrônicos projetados para o controle do forno elétrico são apresentados na figura 34.

Figura 34 – Diagrama dos circuitos eletrônicos utilizados na central de controle do forno elétrico.

O layout da placa de circuito impresso desenvolvida a partir do diagrama dos circuitos desenvolvidos é apresentado na figura 35.

Figura 35 – Layout de PCI do controlador do forno.

A placa eletrônica da central de controle do forno elétrico é apresentada na figura 36.

Figura 36 – Imagem da placa de controle do forno elétrico.

Destaca-se na figura o módulo de transmissão sem fio com protocolo *zigbee* (*U-bee*), o microcontrolador (MCU), o conector de entrada do inversor de frequência e as entradas e saídas. O painel de controle montado é apresentado na figura 37, onde pode se observar a placa central de controle aproximadamente no centro, ela atua nos componentes elétricos controlando todo funcionamento do forno.

Figura 37 – Painel de controle do forno elétrico.

5.3 Automação do processo de despejo da massa

A adaptação do motor responsável pela descida da cuba do misturador, a fim de despejar a massa na extrusora é apresentada na figura 38.

Figura 38 – Adaptação de um motor contínuo ao misturador, para despejo da massa na extrusora.

A disposição dos sensores finais de curso, que indicam o término da subida e descida da cuba do misturador são apresentados na figura 39.

Figura 39 – Imagem do misturador, mostrando os sensores finais de curso, cuba e motor de despejo da massa.

5.4 Painel de controle da esteira separadora, misturador e extrusora

O diagrama do projeto dos circuitos eletrônicos da placa central de controle da esteira separadora, misturador e extrusora é apresentado na figura 40.

Figura 40 – Diagrama da placa eletrônica da central e comandos da esteira separadora, misturador e extrusora.

O painel de controle da central de comandos da esteira separadora, misturador e extrusora é apresentado na figura 41, destacam-se nesta imagem o contator principal que recebe energia do painel de controle central, a placa eletrônica de controle responsável pelo acionamento da esteira separadora, da extrusora e do despejo da massa, o circuito de controle do corte de biscoito e o contator para acionamento do inversor que liga o motor da esteira separadora.

Figura 41 – Central e comandos.

5.5 Testes de funcionamento do misturador, extrusora e esteira separadora

O sistema de mistura, extrusão e separação desenvolvidos são apresentados nas imagens das figuras 42 e 43.

Figura 42 – Sistema de preparo do biscoito.

Figura 43 – Sistema de preparo do biscoito.

Primeiramente foi realizado o teste da descida e subida do misturador através de comandos simples, em seguida os sensores finais de curso foram ajustados e com novos testes e ajustes esse sistema funcionou como esperado, bastando

apenas um comando do software de controle para o acionamento da subida ou descida, que o microcontrolador inicia e termina o movimento da cuba do misturador.

O primeiro teste do sistema pneumático da extrusora foi realizado sem carga e mostrou eficiência tanto na subida, quanto na descida do misturador para testes realizados com diferentes tipos de pressão e fluxo. O passo seguinte foi a configuração do inversor de frequência e alguns ajustes na esteira separadora para a configuração da velocidade ideal de trabalho. O acionamento remoto foi testado e a esteira separadora comportou-se como esperado.

Finalizados os testes individuais dos componentes, realizou-se um teste com a massa composta de 3 Kg de farinha e 1,8 litros de água, essa massa foi batida por cerca de 30 minutos no misturador e ao término o sistema de descida da cuba do misturador foi acionado, porém a massa ficou presa nas pás do misturador, notou-se que a alta viscosidade da mistura de farinha e água foi a responsável, e mesmo com o acionamento das pás do misturador a massa não desceu como se esperava, dificultando inclusive a higienização do misturador após o experimento.

Para a continuação dos testes, a massa foi retirada manualmente e inserida diretamente na extrusora, o acionamento remoto funcionou como esperado, porém de forma lenta, causado pela alta viscosidade da mistura e pela força insuficiente do compressor utilizado, pois o máximo que o sistema pneumático do LAFAC fornece são 4 KgF e o ideal seria pelo menos o dobro. Para a continuação dos testes, os tubos de massa extrusados foram cortados manualmente neste primeiro teste e a esteira transportou os biscoitos para o forno, que saíram prontos no final do processo. É importante salientar que esses testes não objetivaram a qualidade do biscoito, o objetivo foi apenas analisar os processos envolvidos. Os componentes da linha de produção de biscoitos: misturador, extrusora e esteira separadora, detalhando melhor o sistema de controle são apresentados na figura 44.

Figura 44 – Sistema de preparo do biscoito, destacando os componentes de acionamento.

5.6 Nó sensor móvel de temperatura

O primeiro invólucro com o sensor de temperatura móvel desenvolvido é apresentado na figura 45.

Figura 45 – primeiro invólucro testado construído de cimento refratário.

O gráfico da resposta da temperatura interna do encapsulamento de acordo com o tempo é apresentado na figura 46. Após 25 minutos corridos, o sensor atinge 60 °C que é a temperatura de segurança. Como o forno projetado em máxima potência leva 4 minutos para realizar um ciclo e 8 minutos em velocidade lenta, o encapsulamento testado pode ser utilizado com segurança para o sensor.

Figura 46 – Variação da temperatura interna do encapsulamento submetida a 180° C.

O segundo encapsulamento desenvolvido é apresentado na figura 47.

Figura 47 – Segundo encapsulamento desenvolvido, visão frontal e superior.

O esquema elétrico projetado para o nó sensor móvel é apresentado na figura 48, a figura 48(a) apresenta o módulo projetado para recepção e emissão dos dados, a figura 48(b) apresenta o circuito elétrico para a acoplagem do sensor termopar e a figura 48(c) é o circuito do microcontrolador que faz o controle dos dados.

Figura 48 – Esquema elétrico do nó sensor móvel

Após o desenho do esquema elétrico do nó sensor móvel, o layout da placa eletrônica foi desenhado e pode ser visto na figura 49.

Figura 49 – Layout de PCB para o nó sensor móvel.

O nó sensor móvel desenvolvido é apresentado na imagem da figura 50.

Figura 50 – Imagens do protótipo do nó sensor móvel.

O erro limite dos sensores foi considerado como sendo o erro limite do termômetro padrão utilizado, especificado pelo fabricante, mais uma correção da exatidão. A exatidão definida pelo grau de conformidade de um dado valor medido em relação a uma definição previamente determinada pode ser obtida da equação de calibração e o valor aproxima-se do coeficiente de correlação linear obtido nas equações 2, 3 e 4. Os 3 sensores calibrados são apresentados nas figuras 51, 52 e 53, onde as curvas relacionam a temperatura e a saída elétrica.

As equações dos sensores 1, 2 e 3 são, respectivamente:

$$y = 0,269x + 5,2921 \quad (14)$$

$$y = 0,289x + 6,5055 \quad (15)$$

$$y = 0,264x + 4,3066 \quad (16)$$

Onde y é o valor da temperatura obtida no termômetro padrão e x é a saída digital do conversor A/D com uma resolução de 10 bits, garantindo assim uma resolução na temperatura de $0,5^{\circ}\text{C}$.

Figura 51 - Curva de calibração do sensor 1.

Figura 52 - Curva de calibração do sensor 2.

Figura 53 - Curva de calibração do sensor 3.

Nota-se que na faixa de temperatura de operação do forno, a resposta do sensor é linear. A precisão média dos sensores foi de 99,76% e a exatidão 99,8% em relação ao padrão utilizado.

5.7 Nó sensor de medição de torque - farinógrafo

O esquema elétrico projetado para o controlador e sensor do farinógrafo é apresentado na figura 54. O layout da placa desenvolvida é apresentado na figura 55.

Figura 54 – Esquema elétrico do sensor e controlador do farinógrafo.

Figura 55 – Layout PCI da placa eletrônica desenvolvida.

O protótipo do sensor e controlador do farinógrafo desenvolvido é apresentado na figura 56.

Figura 56 – Imagens do protótipo do sensor e controlador do farinógrafo.

O sistema eletrônico juntamente com o sistema de medição de torque adaptado ao misturador comercial é ilustrado na figura 57. Diferentemente do farinógrafo comercial padrão este sistema permite medir as propriedades não só da farinha, mas também de toda a receita. A saída elétrica do sistema de medição e controle do farinógrafo é proporcional à variação da corrente gerada em função da energia mecânica (ou torque), necessária para transformar as propriedades reológicas da mistura (farinha e outros ingredientes).

Figura 57 – Farinógrafo formado por um Sistema de medição de torque integrado ao misturador.

A eficácia do sistema na medição do torque pode ser visualizada nos gráficos das figuras 58, 59 e 60. Na figura 58 tem-se a variação do sinal em função do tempo da mistura de farinha pura em diversas situações. Nos primeiros 2 minutos houve o processo de adição da farinha dentro do misturador, em seguida, entre os minutos 3

e 6 a farinha foi misturada, no minuto 7 iniciou-se o processo de adição de água que prolongou-se até o minuto 10, a partir deste ponto a farinha foi misturada até o minuto 22. Nota-se no gráfico da figura 58 que todas estas ocorrências mudaram o padrão do sinal elétrico obtido do sistema, o que comprova que o sistema é sensível aos eventos relacionados ao processo de mistura da farinha.

Figura 58 – Variação do sinal elétrico do sistema de medição de torque. Experimento com farinha e água.

A sensibilidade do sistema pode ser avaliada ao comparar-se a figura 58 com a figura 59 e figura 60. Na figura 59 tem-se a farinha com outras propriedades e nota-se que o padrão do sinal difere-se totalmente do observado com a farinha da figura 58.

Figura 59 – Variação do sinal elétrico do sistema de medição do torque. Experimento com farinha, água e óleo.

O sinal do misturador movimentando-se sem carga (carga livre) é mostrado na figura 60. Nota-se nos extremos do gráfico uma variação. Esta variação ocorre sempre que o motor é ligado, o que é esperado em função de existir uma resposta indutiva do motor.

Figura 60 – Variação do sinal elétrico do sistema de medição do torque. Experimento sem carga.

5.8 Software de controle

A tela do software de controle desenvolvido é apresentada na figura 61.

Figura 61 – Tela do software de controle

5.9 Verificação da viabilidade da detecção automática da estimativa ponto ideal da massa

Os resultados das medidas do sinal do farinógrafo sem carga, para uma mistura de água e farinha e para uma mistura de uma receita básica de biscoitos serão detalhados a seguir.

5.9.1 Aquisição e análise do sinal do farinógrafo sem carga no misturador.

O resultado obtido com a leitura do sinal do farinógrafo sem carga no misturador é apresentado na figura 62.

Figura 62 - gráfico da aquisição dos dados do farinógrafo sem carga no misturador.

Nota-se no gráfico da figura 62 que no início da medição há um pico de tensão de 1,46 V, que se explica pelo torque inicial do motor consumir mais energia e não haver nenhuma resistência aplicada às pás do misturador, em seguida a leitura do farinógrafo praticamente permanece constante, oscilando em torno de 0,50 V. Ainda, percebe-se nitidamente no gráfico que o sistema é suscetível a ruídos, porém essa interferência não ultrapassa 2 segundos contínuos.

5.9.2 Aquisição e análise do sinal do farinógrafo em uma mistura de farinha e água

Os resultados obtidos com a leitura do sinal do farinógrafo para misturas de farinha e água são apresentados nas figuras 63, 64 e 65.

Figura 63 - Gráfico do sinal do misturador para a primeira mistura entre de farinha e água.

Pode se observar no gráfico da figura 63 que a tensão gasta para a realização da mistura dos componentes cresce rapidamente no início do processo, saltando de aproximadamente 0,55 volts para aproximadamente 0,79 volts em apenas 1 minuto e meio, isso ocorre por que neste período ocorrem as ligações químicas entre a água e a farinha, essa formação da massa consequentemente gera maior resistência às rotações das pás do misturador. Segundo Damoran, Parkine e Fennema (2010), no amassamento da mistura da massa com a farinha de trigo ocorrem diversas alterações físico-químicas devido a aplicação das forças de tensão e cisalhamento que fazem as proteínas do glúten absorverem água, desdobrando-as

parcialmente, esse desdobramento facilita as reações de intercâmbio sulfidril-dissulfeto e as interações hidrofóbicas, levando a formação de polímeros em forma de fio. Essas interações contribuem para o desenvolvimento das propriedades viscoelásticas únicas da massa de trigo, logo não ocorre nenhum desdobramento protéico adicional durante o cozimento ou forneamento da massa.

Aos 520 segundos do início do experimento ocorre o maior consumo de tensão elétrica, que pode ser caudado pela heterogeneidade entre os ingredientes, pois estes ainda não formam uma mistura. Após este ponto a tensão elétrica para a mistura da massa diminui até aproximadamente 1100 segundos, pois a água e as proteínas da farinha estão interagindo, começando a formar a rede visco-elástica. Há uma estabilidade no sinal no intervalo de 1300 a 1400 segundos, onde acredita-se ser o ponto ideal da massa, após esse intervalo houve um aumento na oscilação dos valores da média móvel da tensão elétrica e uma perceptível queda, fato que pode ser explicado pela massa ultrapassar o ponto ideal, onde esta atinge sua força de cisalhamento e começa a romper as ligações de sulfeto que dão estabilidade ao glúten.

Figura 64 - Gráfico do sinal do misturador para a segunda mistura entre farinha e água.

No gráfico da figura 64 verifica-se um comportamento semelhante ao gráfico da figura 63, porém no intervalo de 1150 e 1200 segundos alcança-se uma baixa de variação na média móvel, onde acredita-se ser o ponto ideal da massa, após 1300 segundos têm-se variações na média móvel que seguem até os 1600 segundos.

Segundo a literatura, essas variações podem ser relacionadas a massa ter atingido sua força de cisalhamento (força necessária para romper as pontes dissulfeto e ligações de hidrogênio formadas na batedura e necessárias para a estrutura do gluten), consonante a Fellows (2006), a estrutura do glúten é fixada pelo calor a temperaturas acima de 74 °C, esse processo retém o dióxido de carbono, oriundo da fermentação dentro da estrutura. De acordo com Damoran, Parkin e Fennema (2010), acredita-se que os polímeros lineares formados interagem entre si e por pontes de hidrogênio, associações hidrofóbicas e ligação cruzada dissulfeto que formam um película do tipo folha, capaz de reter o gás.

Figura 65 - Gráfico do sinal do misturador para a terceira mistura entre de farinha e água.

O gráfico da figura 65 também apresenta comportamento semelhante as duas análises anteriores, percebe-se que de 1180 a 1300 segundos a variação da energia se mantém praticamente constante, indicando uma homogenização da mistura,

relacionada ao ponto ideal da massa. A partir desse ponto nota-se um pequeno aumento da tensão elétrica consumida, seguido de uma queda constante, que pode indicar que a massa ultrapassou o ponto ideal, justificado pelas transformações no glúten levarem a um aumento da resistência da massa com o tempo, até seu grau máximo, seguido por uma queda na resistência indicando uma quebra na estrutura da rede (DAMORAN *et al.*, 2010). Estas alterações na resistência provocam uma diminuição no torque do motor do misturador, que reflete na diminuição da variação da corrente do motor, diminuindo assim o efeito indutivo no sensor hall, o que como consequência diminui a variação do sinal elétrico no sistema de medida.

5.9.3 Relação entre desvio padrão e a estimativa do ponto ideal da massa

O gráfico do cálculo do desvio padrão da primeira medição entre farinha e água e o polinômio encontrado para descrever o comportamento da curva do desvio padrão são apresentados na figura 66.

Figura 66 - Desvio padrão a partir da primeira medição da mistura entre farinha e água.

O gráfico da figura 66, plotado a partir dos dados da primeira mistura entre farinha e água (figura 63), demonstra que o desvio padrão calculado interrompe sua queda no mesmo ponto de estabilidade aparente obtido no gráfico da figura 63, intervalo de 1300 a 1400 segundos, indicando que é possível através do cálculo do desvio padrão estimar o ponto ideal da massa. No gráfico da figura 66 é possível observar uma curva em vermelho, que representa uma função polinomial semelhante a seu comportamento, os valores calculados são apresentados em sua legenda.

Figura 67 - Gráfico do desvio padrão a partir da segunda medição da mistura entre farinha e água.

Semelhante ao gráfico da figura 66, o gráfico da figura 67 foi plotado a partir da segunda medição entre farinha e água (gráfico da figura 64), a curva do desvio padrão mostra uma estabilidade em sua queda no intervalo de 1150 a 1400 segundos. Como o gráfico da figura 64 mostra que a região do ponto ideal da massa se dá entre o intervalo de 1180 e 1300 segundos, confirma-se que a função gerada pelos desvios padrões de trechos de sinal de 180 pontos pode ser utilizado para

estimar o ponto ideal da massa, já que mostra claramente o ponto em que a tensão elétrica requerida para movimentar as pás do misturador é quase constante, ou seja a homogeneidade da mistura foi alcançada.

Figura 68 - Desvio padrão a partir da terceira medição da mistura entre farinha e água.

Novamente pode se observar que o cálculo do desvio padrão pode estimar o ponto ideal da massa, pois o desvio padrão calculado é apresentado no gráfico da figura 68. Após alcançar seu ponto máximo sua queda é interrompida aos 1150 segundos e alcança sua estabilidade em 1200 segundos, valor correspondente ao que se entende por ponto ideal da massa, identificado no gráfico da figura 65.

5.9.4 Relação entre o cálculo da derivada e ponto ideal da massa

Após a análise dos gráficos das figuras 66, 67 e 68 e a confirmação que se pode utilizar o cálculo do desvio padrão para identificar o ponto ideal da massa, foi necessário encontrar uma função matemática que permitisse essa identificação em

tempo real, pois durante o processo o gráfico ainda está em formação. Como o ponto ideal da massa se dá onde ocorre a estabilidade do desvio padrão, espera-se que a derivada deste valor retorne zero quando esta estabilidade ocorrer.

Para provar a viabilidade da utilização do cálculo da derivada, três gráficos foram plotados (figura 69, 70 e 71) que são compostos da curva do desvio padrão de cada teste da mistura da farinha e de água e da curva de sua respectiva derivada. Nota-se que em todos os gráficos quando se atinge o maior valor de desvio padrão, a derivada passa pelo valor zero, o que já era esperado para todo ponto de valor máximo de uma função. Descartando esta passagem já esperada pelo valor zero, todos os gráficos serão analisados para provar ou reprovar a viabilidade da utilização do cálculo da derivada do desvio padrão.

Figura 69 - Comparação entre o desvio padrão calculado e a derivada da primeira medição da mistura entre farinha e água.

Ao analisar o gráfico da figura 69, nota-se que próximo a 830 segundos a derivada atinge o valor zero, ocorrido por haver uma pequena estabilidade da variação do desvio padrão. Em seguida volta a assumir valores negativos, até que em 1400 segundos atinge o valor zero e se mantém próximo a este valor até 1650 segundos. A passagem pelo valor zero em 1400 segundos estima o ponto ideal da

massa, comprovados pelos gráficos das figuras 63 e 66 que apontam 1400 segundos sendo um valor do intervalo onde a massa provavelmente atinge seu ponto ideal.

Figura 70 - Comparação entre o desvio padrão calculado e a derivada da segunda medição da mistura entre farinha e água.

No gráfico da figura 70, a passagem pelo valor zero primeiramente ocorre em 1250 segundos e se mantém próximo ao valor de zero até 1480 segundos, comprovando mais uma vez a relação entre a derivada da função gerada pelos desvios padrões e a estimativa ponto ideal da massa, já que os gráficos das figuras 64 e 67 apontam 1250 segundos sendo um valor contido no intervalo do ponto ideal da massa.

Figura 71 - Comparação entre o desvio padrão calculado e a derivada da segunda medição da mistura entre farinha e água.

O terceiro teste entre farinha e água que gerou o gráfico da figura 71 confirma novamente que o cálculo da derivada do desvio padrão pode identificar o ponto ideal da massa, pois o valor onde o gráfico passa em zero é 1200 segundos, correspondente ao intervalo do ponto ideal da massa dos gráficos das figuras 65 e 68.

5.9.5 Aquisição e análise do sinal do farinógrafo para uma receita de massa de biscoito

O sinal proveniente da aquisição do sinal do farinógrafo para uma receita básica de massa de biscoito, resultaram nos gráficos das figuras 72, 73 e 74.

Figura 72 - Gráfico do sinal do misturador para o primeiro teste para a receita de biscoito.

Nota-se neste gráfico que o comportamento da massa do biscoito do tempo de 0 a 600 segundos se assemelha ao comportamento da mistura da farinha e da água (figura 63), porém com menos intensidade, já que a receita do biscoito leva ingredientes oleosos. Segundo Damoran, Parkin e Fennema (2010), os ingredientes oleosos (lipídios) facilitam as ligações entre a água e as proteínas do trigo, melhorando a textura da massa que implica em uma menor necessidade de energia, oferecendo menor resistência às pás do misturador. Outro fator importante a se observar é que diferente dos resultados da farinha e da água, o ponto da receita se dá quando o consumo de energia aumenta. Ainda de acordo com Damoran, Parkine Fennema, (2010) isso é explicado pela incorporação de gás à massa, que é fracionado pelo batimento, implicando no aumento de volume e consequente aumento no consumo de energia. O crescimento da tensão se estabiliza entre 1580 e 1650 segundos, onde acredita-se estar o ponto ideal da massa, porém este trabalho não explorará tal relação. Após este valor o sinal volta a oscilar.

Figura 73 - Gráfico do sinal do misturador para o segundo teste para a receita de biscoito.

O gráfico da figura 73 apresenta comportamento similar ao gráfico da figura 72, no intervalo de 0 a 700 segundos. O consumo de energia se estabiliza no intervalo de 1600 a 1680 segundos, também comportando-se similarmente ao gráfico da figura 73, onde o intervalo observado é de 1580 a 1650 segundos.

Figura 74 - Gráfico do sinal do misturador para o terceiro teste para a receita de biscoito.

Novamente o gráfico da figura 74 mostra o comportamento similar ao gráfico da figura 65 no intervalo de 0 a 600 segundos, porém sua estabilidade ocorre em torno de 1630 em um pequeno intervalo de tempo.

O intervalo onde acredita-se que a massa alcance seu ponto ideal encontra-se entre 1580 e 1680 em todos os experimentos. Esse intervalo que está entre 26 e 28 minutos, pode ser associado ao tempo sugerido ao ponto ideal da massa.

5.9.6 Relação entre desvio padrão e a estimativa do ponto ideal da massa, para uma receita de biscoito

Assim como realizado para a mistura entre farinha e água, será analisada a relação entre o sinal do farinógrafo e o desvio padrão, espera-se que seja possível relacionar o ponto da massa com uma estabilização deste cálculo. Para isso, foram

gerados gráficos a partir dos dados das figuras 75, 76 e 77, que correspondem ao teste em triplicata de uma receita básica de biscoitos.

Figura 75 - Gráfico do desvio padrão para a primeira mistura testada da receita de biscoito.

Nota-se no gráfico da figura 75 que há uma grande diferença entre o desvio padrão calculado para farinha e água (figuras 66, 67 e 68) e o desvio padrão calculado para a mistura de uma receita básica de biscoitos. Observa-se que o gráfico do desvio padrão plotado para farinha e água, após atingir seu ponto máximo, que ocorre logo nos primeiros 200 segundos, é seguido por queda constante até atingir seu ponto de estabilização e novamente após esse ponto ocorre uma nova queda. Já no gráfico de uma receita básica de biscoitos há um crescimento contínuo com o decorrer do tempo que se dá após os 600 segundos iniciais.

Para verificar a viabilidade da detecção do ponto ideal da massa, comparou-se os gráficos das figuras 72 e 75. No gráfico da figura 72 a tensão se estabiliza no intervalo de 1580 a 1650 segundos, intervalo onde acredita-se que a massa atinja seu ponto ideal. Já no gráfico da figura 75 há uma interrupção no crescimento do

desvio padrão, seguido de uma pequena estabilização no intervalo de 1580 a 1630, que são correlacionados com o intervalo do gráfico da figura 72, mostrando uma relação entre os dados.

Figura 76 - Gráfico do desvio padrão para a segunda mistura testada da receita de biscoito.

O gráfico da figura 76 confirma a relação entre o desvio padrão e o sinal do farinógrafo, com o intuito de estimar o ponto ideal da massa, pois obteve comportamento semelhante ao gráfico da figura 75. Percebe-se neste uma estabilização no sinal no intervalo de 1570 a 1630 segundos, como o gráfico da figura 73 apresenta uma estabilidade da tensão no intervalo de 1600 a 1680 segundos, prova-se a relação dos dados.

Figura 77 - Gráfico do desvio padrão para a terceira mistura testada da receita de biscoito.

O cálculo do desvio padrão da terceira mistura, da receita básica de biscoito, mostra novamente comportamento semelhante aos gráficos das figuras 75 e 76. Neste a interrupção no crescimento e a estabilização do sinal deu-se no intervalo de 1620 a 1670 segundos, comparando os valores obtidos no gráfico correspondente da figura 74, onde o intervalo de estabilização se dá entre os valores de 1580 a 1650 segundos, observa-se novamente a relação entre os dados obtidos. Provando que é possível estimar o ponto ideal da massa através do cálculo do desvio padrão.

Mesmo mostrando a relação entre o sinal elétrico obtido pelo farinógrafo e o cálculo do desvio padrão, este trabalho não explorará os métodos de detecção da estimativa do ponto da massa de uma receita de biscoitos, pois se tratam de diversos ingredientes reagindo entre si, merecendo um estudo posterior detalhado.

5.10 Software de controle, estimativa do ponto ideal da massa

A tela do software de controle, recebendo o sinal proveniente do farinógrafo e calculando em tempo real o desvio padrão e a derivada do desvio padrão é apresentada na figura 78.

Figura 78 – Tela do software de controle, calculando o desvio padrão e a derivada do desvio padrão.

5.11 Teste final do projeto

Após aproximadamente 25 minutos o sistema desligou o misturador e desceu a cuba, porém a massa não se soltou das pás do misturador, devido principalmente à alta viscosidade da mistura entre farinha e água. A massa misturada foi inserida

manualmente na extrusora, ao término, o sistema acionou o pistão da extrusora que acionou o sistema de corte.

No experimento foi utilizado o maior intervalo para corte disponível. Percebeu-se nesse processo que nos orifícios das extremidades da tubulação a massa não saía com a mesma intensidade, ocorrido principalmente pela baixa pressão do compressor. Os biscoitos cortados caíram na esteira transportadora e foram transportados até o forno, porém pela alta viscosidade da mistura entre farinha e água, alguns biscoitos aderiam à esteira transportadora, o que não permitiu seu despejo na esteira do forno.

Ao mesmo tempo em que o sistema de corte foi acionado, o sistema também ligou as resistências do forno ao máximo e a esteira na velocidade mínima, já que anteriormente foi indicado ao sistema que os biscoitos seriam cortados em tamanho grande, as temperaturas monitoradas nas zonas do forno foram apresentadas na tela do sistema e guardadas em um arquivo texto como esperado.

Os biscoitos produzidos foram retirados na saída do forno já assados, porém percebeu-se que não foram assados uniformemente. Os problemas encontrados serão analisados à seguir:

Despejo da massa do misturador para a extrusora

Para a certificação do funcionamento do processo de despejo da massa do misturador para a extrusora, um novo teste foi realizado, porém desta vez a bandeja que interliga o misturador e a extrusora foi untada com manteiga. Um novo teste foi realizado utilizando uma receita básica de biscoitos, dessa vez o processo despejou parcialmente a massa à extrusora, o que torna o processo semi-automático. Analisando as falhas, percebe-se que a melhor saída para um processo totalmente automatizado é interligar o misturador à extrusora. Para isso, é importante que novas formas sejam estudadas, para que as pás do misturador após a realização da mistura, sejam utilizadas para transportar a massa à extrusora ou o desenvolvimento de um sistema unificado de mistura e extrusão. Acredita-se que com isso, esse processo reduzirá significativamente o tempo gasto e o consumo de energia.

Diferença da espessura da massa, nos orifícios da extrusora

Percebeu-se que a desproporção da intensidade da massa nos orifícios das extremidades da extrusora ocorreu principalmente pela falta de pressão do compressor do LAFAC. Esta falta de pressão acaba por não atender a demanda de vazão dos quatro orifícios de saída. O máximo que o compressor do laboratório suporta em operação de trabalho constante é 4KgF, pressão muito abaixo do que o necessário para a operação do cilindro utilizado. Para a resolução do problema é necessário que o compressor seja trocado, ou que o processo de mistura e extrusão seja único, o que substituiria o pistão por uma rosca sem fim.

Despejo do biscoito na esteira do forno

Para verificar o funcionamento do transporte do biscoito ao forno, a esteira transportadora foi untada e um novo teste foi realizado com uma receita básica de biscoito, percebeu-se que poucas amostras tiveram dificuldade para serem despejadas ao forno. Analisando a dificuldade do processo, testou-se a utilização de um fio de nylon no final da esteira transportadora, que força o biscoito a se descolar da esteira transportadora. Verificado a viabilidade, o fio de nylon foi adaptado à linha de biscoitos.

Resultados dos sinais capturados pelo sistema

Para facilitar a análise da interpretação do software de detecção do ponto ideal da massa, os dados captados pelo farinógrafo foram plotados também utilizando o software OriginPro8, esse gráfico é apresentado na figura 79. Observa-se que o sinal elétrico obteve comportamento similar aos gráficos das figuras 63, 64 e 65, no intervalo de 0 a 700 segundos, em seguida após um crescimento contínuo com alta variação na média móvel, iniciou uma queda com pequena variação desta média. É possível observar em vários pontos no intervalo de 900 a 1400 segundos a ocorrência de pequenas estabilizações do sinal.

Figura 79 – Sinal elétrico do farinógrafo para uma mistura de farinha e água.

A figura 79 mostra a tela do software de controle, onde o cálculo da estimativa do ponto ideal da massa é realizado em tempo real utilizando para isso o sinal do farinógrafo. Pode se observar no terceiro gráfico da figura 80 que próximo aos 400 segundos a derivada ultrapassa o valor 0, explicado por neste ponto o sinal que gera o gráfico 1 atingir seu valor máximo, em seguida a derivada tende a zero no intervalo próximo a 550 segundos, porém a média dos valores não chegaram ao valor de verificação escolhido que foi de 0,001, o que não comprova que a massa chegou em seu ponto ideal. No intervalo de 1460 segundos, o cálculo da derivada se mantém próximo ao valor 0, porém sua média também não atingiram 0,001. Somente aos 1517 segundos o sistema detectou o ponto ideal da massa, pois a média dos valores de 1300 a 1500 segundos, valor escolhido para verificação atingiram o valor 0,001, identificando um possível ponto ideal da massa.

É importante salientar que a utilização do processo de detecção em tempo real, tem um atraso de 90 segundos, pois trabalha calculando o desvio padrão em uma janela de 180 pontos, o que leva a média estar no meio desse intervalo, ou

seja, 90 pontos. A tela do software de controle no momento da estimativa da detecção do ponto da massa é apresentada na figura 80.

Figura 80 – Tela do software de controle, que mostra os gráficos em tempo real do sistema de detecção do ponto ideal da massa.

É importante salientar que o software de controle apenas estima a detecção do ponto ideal da massa em tempo real. Não se pode afirmar com certeza que ele tenha realmente encontrado esse ponto, pois para isso seriam necessários ensaios mecânicos, análise de crocância entre outros ensaios, o que não é objetivo deste projeto. Toda a linha de escala reduzida é apresentada na figura 81.

Figura 81 – Linha de produção de biscoitos desenvolvida em escala reduzida.

6 CONCLUSÃO

A partir dos resultados conclui-se que os objetivos propostos pelo projeto foram cumpridos. No que se diz respeito ao projeto e desenvolvimento de uma mini linha automatizada, a fabricação de biscoitos tipo cracker foi possível.

Na linha de produção de biscoitos de escala reduzida, um sistema de sensores e dispositivos de controle automatizados com característica de envio de dados em tempo real, utilizando tecnologia wireless e protocolo *Zigbee* foi implantado. Desenvolveu-se um farinógrafo baseado na leitura indireta da corrente que alimenta o motor do misturador que representa o torque que é aplicado à massa. Foram desenvolvidos também seis sensores de temperatura que medem as zonas do forno e o nó sensor de temperatura móvel.

Os experimentos realizados neste projeto demonstram a viabilidade no emprego do farinógrafo desenvolvido, além do novo equipamento ter custo baixo e trabalhar em tempo real, o sinal ao longo do tempo difere-se para uma massa a base de farinha e água e uma receita básica de biscoitos, mostrando que o sistema é sensível a adição de ingredientes, diferente dos farinógrafos comerciais que analisam apenas uma amostra da farinha e da água que serão processadas. O desenvolvimento de um modelo matemático, implantado no software de controle permitiu estimar o ponto ideal da massa para uma mistura de farinha e água, de acordo com as considerações de estabilidade que a literatura aborda, foi utilizado para isso o cálculo da derivada do desvio padrão do sinal capturado pelo equipamento, permitindo a automação do processo.

O uso de um nó sensor capaz de monitorar a temperatura do alimento durante seu deslocamento na esteira transportadora do forno elétrico também funcionou como esperado. A calibração dos sensores mostrou um comportamento linear na faixa de temperatura de interesse para medidas no forno utilizado. A utilização dos sensores móveis na esteira permitiu realizar testes tanto para averiguar o perfil do forno na esteira móvel, como para avaliar a temperatura dentro do alimento sendo assado. Estes dados poderão ser relevantes para estudos futuros, pois estes permitirão avaliar a temperatura do alimento sendo assado e não apenas o dado da temperatura irradiada ao alimento como muitos estudos apresentam.

Com todas as etapas desenvolvidas pode-se afirmar que o monitoramento eletrônico e computacional de uma linha de biscoitos, pode estimar o ponto ideal da massa e controlar a produção do biscoito automaticamente.

REFERÊNCIAS

ASADA, G. *et al.* **Wireless integrated network sensors (WINS)**. Proc. of SPIE, no. 3673, p. 11-18, 2000.

CALDEIRA, M. T. M. *et al.* Trigo: diversidade de tipos, tipificação de farinhas e genotipagem. **Biotecnologia ciência e desenvolvimento**, Rio de Janeiro, 2011.

CALLAWAY E. D. *et al.* Home networking with IEEE 802.15.4: A developing standard for low-rate wireless personal area networks. **IEEE communication magazine**, v. 40, no. 8, p. 70-77, 2002.

CUNHA, Roberto Luiz. Redes Wireless em chão de fábrica. **Mecatrônica atual**, abr., 2008. Disponível em: <http://www.mecatronicaatual.com.br/secoes/leitura/114>, acesso em: 12 jan. 2012.

DAMODARAN, S., PARKIN, K. L., FENNEMA, O. R. **Química de alimentos de Fennema/Srinivasan Damodaran**. Tradução Adriano Brandelli *et al.*, 4. ed. Porto Alegre: Artmed, 2010.

EREN, H. **Wireless sensor and instruments**. Boca Ration: Taylor & Francis, 2006.

FELLOWS, P. J. **Tecnologia do processamento de alimentos**: princípios e prática tradução Florencia Cladera Oliveira *et al.* 2. ed. Porto Alegre: Artmed, 2006.

GALLO, M. A.; HANCOCK, W. M. **Comunicação entre computadores e tecnologias**. São Paulo: Pioneira Thomson Learning, 2003.

HARGREAVES, E. **O protocolo CSMA-CA e o padrão IEEE 802.11**. Coppe/UFRJ Rio de Janeiro: Departamento de Engenharia de Sistemas Laboratório Ravel R, 2003.

IEEE Standard 802.15.4: Part 15.4. Wireless medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications for low-rate Wireless Personal Area Networks (WPANs). IEEE Computer Society. **IEEE standards association**, 2012. Disponível em: <<http://standards.ieee.org/getieee802/download/802.15.4a-2007.pdf>>. Acesso em: 17 jun. 2012.

KINNEY, P. ZigBee Technology: Wireless Control that Simply Works. **Zigbee Alliance**, 2003. Disponível em: <<http://www.zigbee.org/>>. Acesso em: 15 set. 2010.

MAACHE-REZZOUG, Z. *et al.* Study of mixing in connection with the rheological properties of biscuit dough and dimensional characteristics of biscuits. *In: Journal of food engineering*, França, v. 35, p. 43-55, Jan., 1998.

MICROCHIP. PIC12F629/675 Data Sheet. **Microchip technology**, 2010. Disponível em: <<http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/41190G.pdf>>. Acesso em: 18 jul. 2011.

MIN, R. *et al.* Energy-centric enabling technologies for wireless sensor networks. **IEEE wireless communications**, v. 9, no. 4, p. 28-37, 2002.

MÓDULO RF U-BEE Protocolo IEEE 802.15.4 REV 01. **Fractum**, Santa Rita do Sapucaí, 2012. Disponível em: <http://www.fractumrf.com/manuais/UBEE_datasheet.pdf>. Acesso em: 18 jul. 2011.

MONOLITHIC Thermocouple Amplifiers with Cold Junction Compensation AD594/AD595 Datasheet. **Analog devices**, 1999. Disponível em: <http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/AD594_595.pdf>. Acesso em: 18 jul. 2011.

NASCIMENTO, Leonardo Tavares. Monografia Especialização. Avaliação da utilização de tecnologia de comunicação sem fio em redes PROFIBUS e FOUNDATION Fieldbus™. **Centro de tecnologia e geociências**, Universidade Federal de Pernambuco, 2008. Disponível em: <http://www2.ee.ufpe.br/instrumentacao/monografias/Leonardo_Monografia_PROMI_NP_I.pdf>. Acesso em: 20 jul. 2011.

NING, W.; NAIQIAN, Z.; MAOHU, W. Wireless sensors in agriculture and food industry - Recent development and future perspective. **Computers and electronics in agriculture**, v. 50, no. 1, p 1-14, 2006.

NORTHROP, R. B. **Instrumentation and measurements**. 2th. Ed. USA: Taylor & Francis Group, 2005.

ORDONEZ, E. D. M; PENTEDADO, C. G.; SILVA, A. C. R. **Microcontroladores e FPGAs**: aplicações em automação. São Paulo: Novatec, 2005.

ORIGIN: Smoothing using Adjacent Averaging. **Originlab, data analysis and graphing software**, 2012. Disponível em: <<http://www.originlab.com/index.aspx?go=Products/Origin/DataAnalysis/SignalProcessing/SmoothingAndFitting&pid=62>>. Acesso em: 08 jun. 2012.

PCW C Compiler reference manual, July 2011. **Custom computer services**, 2012. Disponível em: <http://www.ccsinfo.com/downloads/ccs_c_manual.pdf>. Acesso em: 18 jul. 2011

SANTOS, G. M. Estudo do comportamento térmico de um forno túnel utilizado na indústria de cerâmica vermelha. **Congresso brasileiro de engenharia mecânica**, Uberlândia, 2001.

SILVA, A. C. S. *et al.* A wireless floating base sensor network for physiological response to live stock. **Computers and electronics in agriculture**, v. 49, n. 2, p. 246-254, 2005.

SOLID State Sensors CS Series Linear Current Sensors. **Honeywell**, 2011. Disponível em: <<http://content.honeywell.com/sensing/prodinfo/current/catalog/c20058.pdf>>. Acesso em: 18 jul. 2011.

TEDRUS, G. A. S. *et al.* Estudo da adição de vital glúten à farinha de arroz, farinha de aveia e amido de trigo na qualidade de pães. **Ciência e tecnologia de alimentos**, Campinas, v. 21, n. 1, p. 20-25, jan./abr. 2001.

WEG. CFW08 - Inversor de Frequência. **WEG S.A.** Disponível em: <<http://catalogo.weg.com.br/files/wegnet/WEG-cfw-08-inversor-de-frequencia-catalogo-portugues-br.pdf>>. Acesso em: 20 jul. 2011.

YASSU, F. Brasil assume liderança mundial. **DBO Rural**, n. 280, p. 30, mar. 2004.