

**MICRO-ONDAS COMO ALTERNATIVA TECNOLÓGICA PARA AUMENTO DO  
RENDIMENTO INDUSTRIAL DA CANA-DE-AÇÚCAR**

**MARCOS VINICIUS SEDANO**

**MICRO-ONDAS COMO ALTERNATIVA TECNOLÓGICA PARA AUMENTO DO  
RENDIMENTO INDUSTRIAL DA CANA-DE-AÇÚCAR**

**MARCOS VINICIUS SEDANO**

Dissertação apresentada a Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação, Universidade do Oeste Paulista, como parte dos requisitos obtenção do título de Mestre em Agronomia.

Área de Concentração: Produção Vegetal

Orientador: Prof. Dr. Tadeu Alcides Marques

633.611  
S447m

Sedano, Marcos Vinicius

Micro-ondas como alternativa tecnológica  
para aumento do rendimento industrial da  
cana-de-açúcar / Sedano, Marcos Vinicius.  
– Presidente Prudente, 2012.  
34 f. : il.

Dissertação (Mestrado em Agronomia)  
Universidade do Oeste Paulista – UNOESTE:  
Presidente Prudente, SP, 2012.

Bibliografia.

Orientador: Tadeu Alcides Marques

1. Cana Desintegrada. 2. Radiação. 3.  
Bagaço. 4. Extração. I. Título.

**MARCOS VINICIUS SEDANO**

**MICRO-ONDAS COMO ALTERNATIVA TECNOLÓGICA PARA AUMENTO DO  
RENDIMENTO INDUSTRIAL DA CANA-DE-AÇÚCAR**

Dissertação apresentada a Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação, Universidade do Oeste Paulista, como parte dos requisitos obtenção do título de Mestre em Agronomia.

Presidente Prudente, 18 de Outubro de 2012

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Dr. Tadeu Alcides Marques  
Universidade do Oeste Paulista- Unoeste  
Presidente Prudente- SP

---

Prof. Dra. Mara Heloísa Olsen Neves Scaliante  
Universidade Estadual de Maringá (UEM)  
Maringá-PR

---

Prof. Dr. Fábio Fernando de Araujo  
Universidade do Oeste Paulista  
Presidente Prudente-SP

## DEDICATÓRIA

*A Deus por estar sempre presente em minha vida e me proporcionar as vossas vontades.*

*À minha mãe e meu pai, os quais amo muito, pelo exemplo de vida e família, e que nunca mediram esforços e estiveram sempre presente em todos os momentos da realização deste trabalho.*

*À minha esposa Michelli, pelo carinho, compreensão e companheirismo.*

*A meus familiares, pelo amor e companheirismo indispensáveis para a conclusão do curso.*

## **AGRADECIMENTOS**

*A Deus, pois sem ele nada em minha vida seria possível, por me dar forças nos momentos mais difíceis e estar sempre comigo, que através da força do teu espírito, me fez superar as dificuldades encontradas no caminho.*

*Aos meus pais, Antonio Sedano e Adaicy Sedano, pelo amor, carinho, compreensão, incentivo e ajuda, durante toda minha vida, muito obrigado, Amo Vocês.*

*A minha esposa Michelli Sedano, pelo apoio, companheirismo, conselhos e incentivos nas horas mais difíceis, por sua compreensão nas horas em que precisei me ausentar, ou deixar de estar com ela em função do estudo ou trabalho, obrigado por tudo.*

*Aos meus amigos Mário, Luis Eduardo e Fábio Benincasa que de alguma forma sempre me deram base estrutural e tiveram consciência de minhas ausências. Aos professores do curso de Mestrado em Agronomia da Unoeste, que a mim repassaram seus conhecimentos, fazendo que meu desenvolvimento fosse o melhor possível.*

*Ao Profº Dr. Tadeu Alcides Marques, meu orientador que não mediu esforço para realização desse trabalho de conclusão.*

*A Profº MSC Ângela Godinho que teve paciência em minhas ausências e contribuiu com seus conhecimentos.*

*Aos demais colegas e funcionários do curso que, de uma forma ou outra, contribuíram para a esta conquista.*

“[...] Tudo o que um sonho precisa para ser realizado é alguém que acredite que ele possa ser realizado [...]” (Roberto Shinyashiki).

## RESUMO

### MICRO-ONDAS COMO ALTERNATIVA TECNOLÓGICA PARA AUMENTO DO RENDIMENTO INDUSTRIAL DA CANA-DE-AÇÚCAR

A utilização de micro-ondas nas agroindústrias tem como um dos objetivos elevar a temperatura do material pela irradiação. A hipótese central deste trabalho é que a elevação da temperatura da cana desintegrada, colabora na melhoria do processo de extração do caldo. Foram utilizados dois tipos de cana-de-açúcar: desintegrada da esteira de borracha, e do “shutt-donelly” do quinto terno. Num primeiro ensaio foram aplicadas as potências 0W, 125W, 156W, 188W, 218W e 250W. No segundo ensaio foram aplicadas a potência máxima de 312W variando o tempo de 30s, 40s, 50s, 60s, 70s, 80s e 90s. Ambos ensaios foram realizados com quatro repetições. O delineamento estatístico foi fatorial, sendo um fator a origem da cana (esteira de borracha ou “shutt donelly” do quinto terno) e outro fator a potência no primeiro ensaio e o tempo de exposição no segundo ensaio. A radiação micro-ondas aumenta os índices de extrações, reduzindo o peso do bolo úmido (PBU). Há uma correlação entre índices de extração e potência de aquecimento.

**Palavras-chave:** Radiação, Cana Desintegrada, Bagaço, Extração.



## **ABSTRACT**

### **MICROWAVE TECHNOLOGY AS AN ALTERNATIVE TO INCREASE INDUSTRIAL EFFICIENCY OF SUGAR CANE**

The use of microwave in sugar mill has the purpose to raise the temperature of the material by irradiation. The central hypothesis of this work is that the elevation of temperature, collaborates on improving sugarcane disintegrated in the extraction process. We use two types of sugar cane, disintegrated rubber mat and “shutt-donelly” of the fifth suit. In a first test were applied the potencies 0W, 125W, 156W, 188W, 218W and 250W. In the second test were applied to maximum power by varying the time of 312W 30s, 40s, 50s, 60s, 70s, 80s and 90s. Both trials were conducted with four replications. The randomized factorial, being a factor was the origin of sugar cane (rubber mat or “shutt donelly” of the fifth suit) and another factor to power in the first test and the exposure time in the second test. Microwave radiation extraction rates increases, reducing the weight of the cake moist (PBU). There is a correlation between rates of extraction and heating power.

**Keywords:** Radiation, Sugar Cane, Disintegrated, Bagasse, Extraction.

## LISTA DE FIGURAS

<b>FIGURA 1-</b> Espectro visível.....	16
<b>FIGURA 2-</b> Movimento atômico durante o aquecimento.....	18
<b>FIGURA 3-</b> Instrumentação dos ternos de moendas.....	22
<b>FIGURA 4-</b> Extração na cana da esteira de borracha (extração pol%pol), em função da potência (W) no micro-ondas.....	28
<b>FIGURA 5-</b> Sacarose aparente no caldo % sacarose aparente na cana do “shutt-donelly” do quinto terno (extração pol%pol), em função da potência (W) utilizada.....	29
<b>FIGURA 6-</b> Peso do bolo úmido na cana da esteira de borracha em relação a potência.....	29
<b>FIGURA 7-</b> Peso do bolo úmido do “shutt-donelly” do quinto terno em função do aumento da Potência.....	30
<b>FIGURA 8-</b> Extração da Pol na cana da esteira de borracha em relação o tempo de aplicação da potência máxima (312W).....	30

## LISTA DE TABELAS

<b>TABELA 1-</b> Demonstração dos tipos de materiais, peso, potências utilizadas e o tempo de aplicação para o primeiro ensaio.....	23
<b>TABELA 2-</b> Demonstração dos tipos de materiais, peso, potências utilizadas e o tempo de aplicação para o segundo ensaio.....	23
<b>TABELA 3-</b> Açúcares totais recuperáveis (ATR) ( $\text{kgTC}^{-1}$ ), em função das diferentes potências (W) para os diferentes materiais.....	26
<b>TABELA 4-</b> Pol do bolo úmido (sacarose aparente % bolo úmido), em função das diferentes potências (W) para os diferentes materiais.....	26
<b>TABELA 5-</b> Extração (sacarose aparente no caldo % sacarose aparente na cana), em função das diferentes potências (W) para os diferentes materiais.....	27
<b>TABELA 6-</b> PBU (g) em função das diferentes potências (W) para os diferentes materiais.....	27

## SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	12
2 REVISÃO DE LITERATURA.....	14
2.1 Extração por Moendas.....	14
2.1.2 Embebição.....	14
2.2 Perdas Industriais.....	15
2.3 Micro-ondas.....	15
2.3.1 Radiação.....	17
2.3.2 Atuação forno micro-ondas.....	18
2.3.3 Aquecimento por micro-ondas.....	19
3 MATERIAS E MÉTODOS.....	22
3.1 Método de Análise pela Prensa Hidráulica da Cana-de-Açúcar.....	25
3.2 Objetivo da Metodologia.....	25
3.3 Análises Estatísticas.....	25
4 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	26
5 CONCLUSÕES.....	31
REFERÊNCIAS.....	32

## 1 INTRODUÇÃO

A necessidade mundial por fontes alternativas de energia e a posição de destaque do Brasil em relação à produção de etanol proporcionam a cultura da cana-de-açúcar em destaque bioenergético, sendo que o aproveitamento da matéria-prima cana-de-açúcar é de fundamental importância e melhores índices de extração acarretam melhores aproveitamentos da cana-de-açúcar (CENTURION et al., 2007).

A área cultivada com cana-de-açúcar que será colhida e destinada à atividade sucroalcooleira na safra 2012/13 está estimada em 8,5 milhões de hectares, distribuídas em todos estados produtores conforme suas características. O estado de São Paulo é o maior produtor com 51,82% (4,4 milhões de hectares), seguido por Minas Gerais com 8,46% (721,86 mil hectares), Goiás com 8,69% (741,38 mil hectares), Paraná com 7,13% (608,38 mil hectares), Mato Grosso do Sul com 6,50% (554,29 mil hectares), Alagoas com 5,26% (448,86 mil hectares) e Pernambuco com 3,63% (309,74 mil hectares). Nos demais estados produtores as áreas são menores, com representações abaixo de 3%. A área de cana-de-açúcar destinada a produção neste ano safra apresentou um crescimento de 2,1% ou 171,7 mil hectares em relação a safra passada. A falta de investimento em novas unidades ou mesmo na ampliação da capacidade de processamento das usinas já existente, bem como a renovação de áreas já cultivadas, dificulta um maior crescimento (CONAB, 2012).

A indústria sucroalcooleira tem como objetivo principal recuperar os açúcares contidos na matéria-prima e conduzi-los no processo, esta etapa tem participação fundamental na recuperação dos açúcares. A extração por moenda é uma operação feita para retirada do caldo contido na cana. Modelos de moendas, desenhos de castelos, embebição, ajustes da moenda, controle de pressão e velocidade são fatores e técnicas utilizados com o intuito de elevar os índices de extração. A utilização de micro-ondas nas agroindústrias tem a finalidade básica de elevar a temperatura do material pela irradiação. Este aumento de temperatura da cana-de-açúcar proporciona menor viscosidade do caldo, maior agitação das moléculas. A utilização de micro-ondas pode oferecer inúmeras vantagens se comparado com os métodos convencionais de processamento térmico (GONÇALVES et al., 2009). O MAE (extração assistida por micro-ondas) processo no qual utiliza-se energia de micro-ondas pode causar migração seletiva dos compostos, com mais rapidez e recuperações iguais ou superiores ao processo

convencional (GOU et al., 2012; CUI; MEI, 2002). O Processo de aquecimento gera calor no interior do material vegetal acarretando temperaturas mais elevadas do interior do material até a sua superfície (ROCHA et al., 2011).

O funcionamento do forno de micro-ondas (FMO) se baseia em uma válvula chamada magnetron sob vácuo que converte energia elétrica em micro-ondas. As ondas eletromagnéticas produzidas são guiadas até o material a ser aquecido. A radiação micro-ondas é não ionizante e causa a migração dos íons e a rotação dos dipolos sem causar mudanças na estrutura da molécula tem frequência na faixa entre 0,3 e 300GHz, correspondendo a comprimentos de ondas da ordem de 1cm a 1m e encontra-se na região do espectro eletromagnético entre o infravermelho e as radiofrequências (SOUZA; MIRANDA, 2011).

O controle do binômio tempo/temperatura em aquecimento por micro-ondas não pode ser comparado ao aquecimento convencional. As mudanças nas propriedades dos materiais durante o aquecimento têm um efeito mais pronunciado no aquecimento por micro-ondas. Enquanto o produto se aquece, sua potencialidade de absorção de micro-ondas aumenta sensivelmente, o que aumenta a ascensão da temperatura e conseqüentemente aumentos adicionais da taxa de absorção de micro-ondas (ZHANG et al., 1999; ZHANG; DATTA, 2000).

Algumas unidades industriais demandam aumentos em suas capacidades de moagem, contudo apresentam limitações espaciais pelo motivo de não serem planejadas ampliações em seus projetos iniciais.

Para maiores capacidades sem grandes prejuízos na extração o presente trabalho tem como hipótese que a elevação da temperatura devido a radiação de micro-ondas, proporciona melhores índices de extração.

O objetivo é avaliar o efeito do uso das micro-ondas nos parâmetros tecnológicos de extração em potências e tempos diferenciados. As amostras obtidas de cana-de-açúcar desintegradas foram da esteira de borracha e do “shutt-donelly” do quinto terno.

## **2 REVISÃO DE LITERATURA**

### **2.1 Extração por Moendas**

A extração por moenda é uma operação feita para retirada do caldo contido na cana com, tem-se como referência os valores de extração pela na compressão de 250Kgf cm<sup>2</sup>, junto com ele a sacarose. Esta operação consiste em separar as frações líquidas (caldo) e sólidas da cana, caldo e fibra. A moenda é composta por um conjunto de até seis ternos, cada terno é composto por quatro rolos, onde a cana é introduzida entre os rolos, expulsando o caldo das células da cana respectivamente (BELTRÃO; ANDRADE, 2006; CHEN; CHOU, 1993).

Com a utilização de picadores e desfibradores, equipamentos utilizados para preparo da matéria-prima, o trabalho das moendas ficou reduzido apenas à extração do caldo remanescente do bagaço. No início do século XXI com moendas que são constituídas com quatro rolos sendo: um rolo superior, um rolo inferior de entrada, um rolo inferior de saída e um rolo de pressão, este último projetado para pressionar a passagem do bagaço entre o rolo superior e o rolo inferior de entrada (FERNANDES, 2003).

#### **2.1.2 Embebição**

A embebição é realizada durante a moagem e consiste em umidificar o bagaço com água ou o próprio caldo. Existem dois tipos de embebição: simples e composta. Na simples adiciona-se água na proporção de 30% no bagaço moído a partir do segundo terno, e na embebição composta a mais utilizada, adiciona-se água no último terno para isto parte do caldo extraído no último terno é utilizado para embeber o bagaço do terno anterior, o caldo é utilizado até o segundo terno. A embebição possibilita um aumento de extração de até 96% dos açúcares contidos na cana (CASTRO; ANDRADE, 2007). As aplicações da embebição podem ser constituídas por canos perfurados, bicos injetores ou de calhas. O controle de temperatura dessa água deve ser realizado mantendo-se acima de 70°C, para obter uma embebição adequada (MARQUES et al., 2001).

## 2.2 Perdas Industriais

De acordo com CTC (2009) os tópicos “perdas industriais” são indicadores das perdas de açúcar que ocorrem durante o processamento da cana-de-açúcar na indústria. Esta forma de abordagem permite que uma empresa possa avaliar o valor das perdas que ocorrem setorialmente através de quantificação, seja em forma de matéria prima, açúcares redutores totais (ART), pol (percentagem de sacarose aparente), etc, ou de produto (açúcar, etanol, xarope, levedura), ou em valores monetários. A noção da perda industrial pode ajudar no trabalho de diminuição ou eliminação destas perdas identificadas, avançando e direcionando os investimentos em recursos humanos (treinamentos e capacitação), nas implementações das melhorias nos processos (tecnologias), na facilidade do gerenciamento de rotinas, ou em equipamentos e máquinas mais eficientes.

Durante a moagem o bagaço é produzido e nele pode ficar retido cerca 2,5% de açúcar contido na cana desintegrada (PANDEY et al., 2000).

## 2.3 Micro-ondas

Em 1945, o engenheiro Percy Spencer estava pesquisando em seu trabalho radares na empresa Raytheon. Ele parou por alguns minutos na frente de um magnetron, um tubo de vácuo eletrônico que gera ondas de rádio de alta frequência, sentindo uma sensação estranha, Percy Spencer percebeu que a barra de chocolate no bolso estava começando a derreter. A partir desta constatação Spencer e outros engenheiros da empresa Raytheon passaram a desenvolver os primeiros fornos de microondas (SANSEVERINO, 2002).

Os primeiros modelos, comercializados em 1947, pesava 750 quilos e apresentavam quase 6 metros de altura. Fornos de micro-ondas foram utilizados exclusivamente em restaurantes, trens e navios oceânicos, locais onde grandes quantidades de comida tinham que ser cozidas rapidamente. Passaram-se anos, e o primeiro forno de micro-ondas doméstico chegou ao mercado em 1955. Graças ao desenvolvimento no Japão de um menor magnetron, o primeiro forno de micro-ondas compacto e prático foi introduzido em 1967, que custava cerca de US \$ 495 (CALVO; OLANO, 1992).

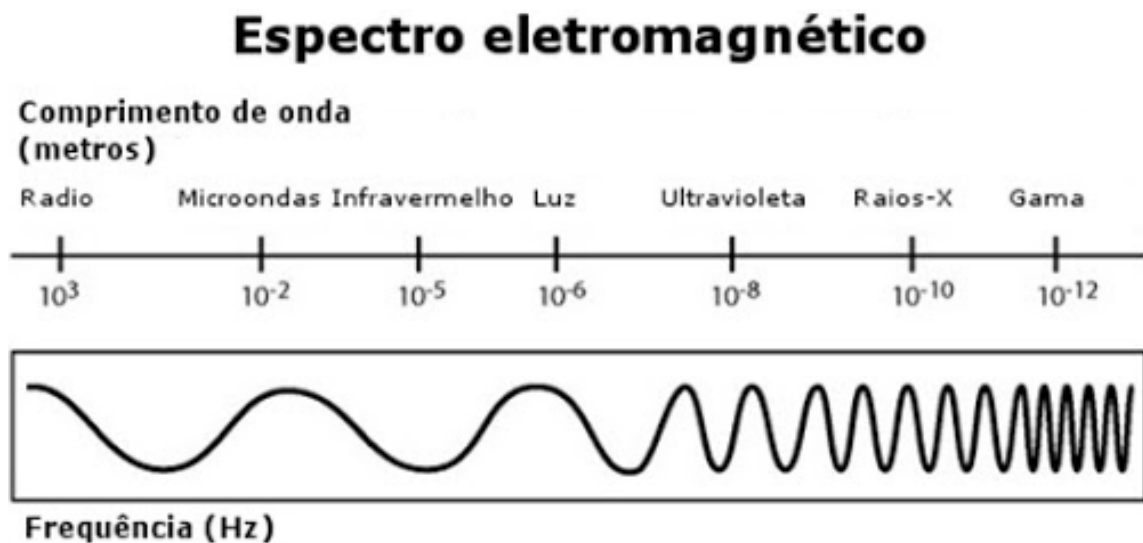
A utilização de micro-ondas pode oferecer inúmeras vantagens se comparado com os métodos convencionais de processamento térmico. O



aquecimento por micro-ondas pode ser mais rápido e mais uniforme e a distribuição do calor através do produto pode ser alcançada de melhor forma do que nos procedimentos convencionais (DATTA; HU, 1992).

O funcionamento do forno de micro-ondas se baseia em uma válvula chamada magnetron que gera as micro-ondas. Esta válvula é um dispositivo sob vácuo que converte energia elétrica em micro-ondas. Uma diferença de potencial é aplicada entre o ânodo e o cátodo. Um eletroímã colocado entre os dois pólos faz com que os elétrons descrevam uma trajetória em espiral produzindo assim uma radio freqüência. As ondas eletromagnéticas produzidas são guiadas até o material a ser aquecido. A radiação micro-ondas é não ionizante e causa a migração dos íons e a rotação dos dipolos sem causar mudanças na estrutura da molécula. A energia eletromagnética tem freqüência na faixa de  $10^3$  a  $10^5$  MHz como é demonstrada na Figura 1 (SANSEVERINO, 2002).

**FIGURA 1-** Espectro visível



Fonte: USP, 2012.

O aquecimento por irradiação com micro-ondas acontece pela interação da onda eletromagnética com o dipolo elétrico de uma molécula. No aquecimento por convecção a energia é transferida lentamente do recipiente de reação para a solução, porém, no aquecimento por micro-ondas ocorre à absorção direta da energia pelo material a ser aquecido. Desse modo, o aquecimento por microondas é seletivo e depende, principalmente, da constante dielétrica do material. Portanto, quanto maior a constante dielétrica, maior a quantidade de energia a ser armazenada; e quanto maior o momento de dipolo, maior a interação

da molécula com as ondas eletromagnéticas na região das microondas (BARBOZA et al, 2001).

Atualmente, o forno de micro-ondas tem uma significância maior além de sua função original. Explorando áreas como a química inorgânica e química orgânica, além de seguir para as biociências, já dominando a síntese de peptídeos, nanopartículas e polímeros. Trata-se de um método ecologicamente correto, barato e rápido (SILVA, 2009).

### **2.3.1 Radiação**

A palavra “radiação”, comumente associada à radioatividade, raios X e outros “perigos”, refere-se, de maneira geral a “energia radiante”, energia que se propaga no espaço, inclusive no vácuo, sem necessidade de um suporte físico. Em particular, “radiação eletromagnética” é energia que se propaga sob a forma de ondas caracterizadas por campos elétricos e magnéticos variáveis no tempo e no espaço (SENIZE, 1996).

O uso da radiação de microondas tornou-se popular na indústria de alimento, para dourar, secar, e cozer alimentos, bem como para a inativação dos microrganismos (ROSENBERG; BOGL, 1987; KAKITA et al., 1995).

O conceito de radiação eletromagnética foi proposto em 1856, quando James Clerk Maxwell mostrou teoricamente que um campo elétrico variável dava origem a um campo magnético variável e vice-versa. Desta forma, um circuito elétrico oscilante deveria emitir ondas eletromagnéticas, cuja existência foi comprovada (TEJERA; DE LA TORRE, 1991).

A transferência de energia por micro-ondas é muito diferente dos processos ditos convencionais de aquecimento. Estes transferem energia para a matéria por condução, convecção e irradiação enquanto as micro-ondas interagem diretamente com a matéria provocando aquecimento devido à interação do campo elétrico das moléculas com as ondas eletromagnéticas em diferentes fases produzindo a condução iônica e rotação dipolar (GEDYE et al., 1998).

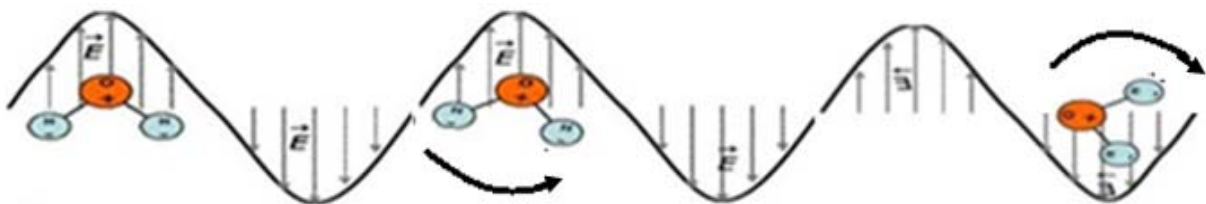
Consideram-se micro-ondas todas as radiações eletromagnéticas não ionizantes, cuja frequência se encontra no intervalo compreendido entre 3 e 300.000 MHz, sendo que as mais utilizadas são as de 915 e 2450 MHz (TEJERA; DE LA TORRE, 1991).

### 2.3.2 Atuação do forno micro-ondas

Os alimentos geralmente contêm uma certa porcentagem de água. A água é formada por moléculas polares, isto é, possuem pólos nos seus extremos, um positivo e outro negativo. As microondas na frequência de 2,45 GHz carregam energia que pode ser fracamente absorvida por moléculas polares como da água, gorduras e açúcares, acontecendo o fenômeno da ressonância. Moléculas polares são capazes de se alinhar com o campo elétrico das ondas. Como o campo muda de direção de acordo com a frequência, cada molécula tende a acompanhar essas mudanças, arrastando moléculas vizinhas. Essa agitação resulta no aumento da energia cinética das moléculas de água que são polares. Somente moléculas de água, gordura e açúcar entram em ressonância com as micro-ondas. Isso significa que apenas os alimentos que contêm essas moléculas são aquecidos pelo forno (CARVALHO, 2005).

No caso de fornos de micro-ondas, a frequência de onda de rádio comumente usada é aproximadamente 2500 megahertz (2,5 gigahertz). Ondas de rádio nesta frequência têm uma propriedade interessante: elas são absorvidas por água, gorduras e açúcares. Quando estas ondas são absorvidas, convertem-se diretamente em movimento atômico conforme demonstrado na Figura 2, gerando calor. Micro-ondas nesta frequência têm outra propriedade interessante: elas não são absorvidas pela maioria dos plásticos, vidro ou cerâmica (SENIZE, 1996).

**FIGURA 2-** Movimento atômico durante o aquecimento



Fonte: Física, 2012.

A frequência de 2450 megahertz é a mais comumente utilizada para os fornos convencionais ou domésticos, e ambas são usadas em aquecimento industrial. O aquecimento por micro-ondas envolve primariamente dois mecanismos: dielétrico e iônico. A água no alimento é frequentemente o componente preliminar responsável pelo aquecimento dielétrico. Devido a sua natureza dipolar, as moléculas de água tendem a seguir o campo elétrico associado com a radiação

eletromagnética. Tais oscilações das moléculas de água produzem o calor. O segundo principal mecanismo de aquecimento com micro-ondas e frequência de rádio é através da migração oscilatória dos íons no alimento que gera o calor sob a influência da oscilação do campo elétrico (DATTA; HU, 1992).

### 2.3.3 Aquecimento por micro-ondas

O aquecimento de alguns materiais quando expostos a campos de alta frequência (acima de  $10^8$  Hz) é conhecido desde o século XIX sendo este utilizado em aplicações em larga escala desde as primeiras décadas do século XX (ZLOTORZYNSK, 1995).

A interação da radiação de micro-ondas com moléculas, átomos ou íons presentes nas substâncias passou a ser utilizado em laboratórios de química. São diversas as finalidades de seu uso, tais como: secagem de amostras, sínteses, extração de compostos orgânicos e mineralização de amostras orgânicas e inorgânicas. A temperatura de um corpo é a medida do seu conteúdo de energia calorífica. Para aumentar a temperatura de um corpo é preciso fornecer ao mesmo, energia sob a forma de energia calorífica, ou sob outra forma transformável em energia calorífica. Nos processos de aquecimento mais conhecidos ditos “convencionais”, recorre-se à transmissão de calor, isto é, à transferência de energia calorífica de um meio “quente” para o material “frio” que se quer aquecer. Em outros processos de aquecimento, entre os quais os de indução eletromagnética e o de histerese dielétrica, o material recebe um acréscimo de energia sob outra forma, que é transformada em energia calorífica no interior do próprio material, não havendo transmissão de calor do meio externo para o material (SENIZE, 1996).

O aquecimento por micro-ondas refere-se ao uso de ondas eletromagnéticas de determinadas frequências para gerar calor em um material (METAXAS; MEREDITH, 1988; METAXAS, 1996; ROUSSY; PEARCE, 1995). As radiações não ionizantes são todas as radiações eletromagnéticas com energia do fóton inferior a 10eV (elétrons volts). Valor esse mínimo para “arrancar” elétrons de moléculas em material biológico. Energia de 10eV corresponde à frequência de  $2,4 \times 10^{15}$  Hz, ou seja, na região do ultravioleta curto. Na frequência dos fornos de microondas ( $2,45 \times 10^9$  Hz) o fóton tem energia um milhão de vezes menor, não tendo

qualquer possibilidade de provocar ionização em alimentos, animais ou pessoas expostas (GREENE, 1992).

O controle do binômio tempo/temperatura em aquecimento por microondas não pode ser comparado ao aquecimento convencional. As mudanças nas propriedades dos materiais durante o aquecimento têm um efeito mais pronunciado no aquecimento por micro-ondas em comparação ao aquecimento convencional. Enquanto o produto se aquece, sua potencialidade de absorção de micro-ondas aumenta sensivelmente, o que aumenta a ascensão da temperatura e conseqüentemente aumentos adicionais da taxa de absorção de microondas. Tal união poderia conduzir ao aquecimento desgovernado conforme citam (ZHANG et al., 1999) e (ZHANG; DATTA, 2000).

Com o avanço nos estudos em campos elétricos e magnéticos e a partir da invenção da pilha de Volta, em 1800, desenvolveram-se inúmeras aplicações médicas de corrente contínua. D'arsonval (apud DURNEY et al., 1986), provavelmente, foi o primeiro a estudar os efeitos fisiológicos da corrente alternada e de campos elétricos e magnéticos variáveis.

No início do século 20, os efeitos térmicos dos campos de radiofreqüência eram bem conhecidos e utilizados em diatermia. Ao longo da história, a introdução de novos aparelhos e novas técnicas relacionadas com a eletricidade provocou e continua a provocar reações pessoais e coletivas de todo tipo. O efeito biológico mais conhecido dos campos eletromagnéticos e mais facilmente de se entender é o efeito térmico. A pele aquece-se ao sol. Os alimentos cozinham no forno de micro-ondas (DURNEY et al., 1986).

Nos anos 30 e 40, desenvolveram-se geradores de rádio freqüência (RF) de alta potência. Operadores desses transmissores logo observaram, talvez como fato curioso, que a exposição à RF podia produzir sensação de calor. Nestas mesmas décadas, começaram a ser determinadas, de maneira sistemática, as propriedades dielétricas dos tecidos biológicos, objetivando o entendimento dos mecanismos de interação com os campos eletromagnéticos (SENIZE, 1996).

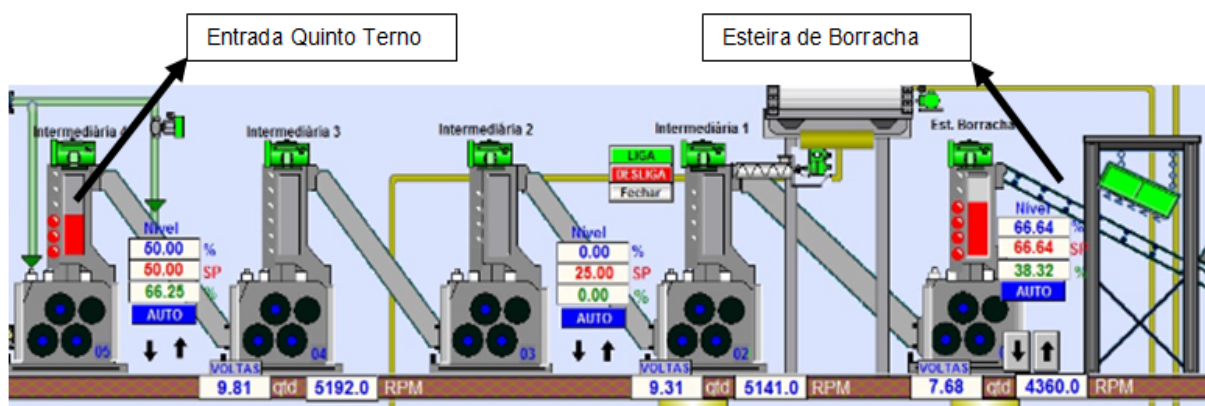
A capacidade em diminuir o tempo de aquecimento dos produtos depende da potência do forno de micro-ondas, da umidade do alimento e do volume do produto. A eficácia da penetração pelas micro-ondas se determina através da profundidade pela qual a metade da energia eletromagnética que incide sobre a superfície do produto, se transforma em calor. Esta penetração está em relação inversa com a freqüência, de modo que para produtos de maior espessura, deve-ser

utilizar as ondas de baixa frequência. É muito difícil comparar precisamente a eficácia do aquecimento de micro-ondas ao aquecimento convencional baseando-se na literatura, em função das diferentes técnicas empregadas ou da falta do detalhe nos métodos ou nos materiais utilizados, especialmente com relação à monitoração de temperatura (HEDDLESON; DOORES, 1994).

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Durante o período de junho a setembro de 2011, na Usina Alta Paulista em Junqueirópolis, foram realizados dois ensaios utilizando a técnica de aquecimento por micro-ondas. Nos dois ensaios utilizou-se cana desintegrada passando pela esteira de borracha e a mesma cana passando no “shutt-donelly” do quinto terno como pode ser visto no esquema representado pela Figura 3.

**FIGURA 3-** Instrumentação dos ternos de moendas



Fonte: Do autor, 2012.

Os tratamentos utilizados foram o aquecimento por micro-ondas durante 94s simulando o tempo de percurso determinado pela aplicação de uma fita colorida na esteira de borracha e cronometrado até sua saída com o bagaço no quinto terno, nas diferentes potências de 0W, 125W, 156W, 188W, 218W, 250W, conforme Tabela 1. No segundo ensaio utilizou-se a potência máxima de 312W com os tempos de aplicação de 0s, 30s, 40s, 50s, 60s, 70s, 80s e 90s demonstrado na Tabela 2.

**TABELA 1-** Demonstração dos tipos de materiais, peso, potências utilizadas e o tempo de aplicação.

<b>Amostra</b>	<b>Peso amostra</b>	<b>Potência (W)</b>	<b>Tempo (s)</b>
Cana Desintegrada	500g	0	94"
		125	
		156	
		188	
		218	
		250	
Cana Entrada do 5º terno	500g	0	94"
		125	
		156	
		188	
		218	
		250	

Fonte: Do autor, 2012.

**TABELA 2-** Demonstração dos tipos de materiais, peso, potências utilizadas e o tempo de aplicação.

<b>Amostra</b>	<b>Peso amostra</b>	<b>Tempo (s)</b>	<b>Potência (W)</b>
Cana Desintegrada	500g	0	312
		30	
		40	
		50	
		60	
		70	
		80	
		90	
Cana Entrada do 5º terno	500g	0	312
		30	
		40	
		50	
		60	
		70	
		80	
		90	

Fonte: Do autor, 2012.



Nos dois ensaios utilizou-se 4 repetições. Para a execução utilizou-se um forno micro-ondas da marca Brastemp, modelo Max com frequência de 2450MHZ e com a capacidade de 30 litros e potência máxima de 312W. Para as amostras da esteira de borracha coletou-se manualmente 30kg. Para a amostra de cana desintegrada do shut-donelly do quinto terno, foi construída uma porta alçapão, onde amostrou-se 30kg de cana-de-açúcar embebida com 200% de água a uma temperatura de 45°C.

As amostras foram enviadas para o laboratório e pesadas. Durante o período de julho a setembro foram realizadas quatro amostragens no intervalo de 21 dias (Repetições). Após pesagem as amostras foram levadas para a prensa hidráulica e analisadas de acordo com Fernandes (2011).

Prensagem a  $250\text{kgcm}^{-2}$  por um minuto, onde é extraído o caldo e o PBU (Peso do Bolo Úmido), o PBU foi pesado e no caldo foi realizado as determinações de brix ( $B_j$ ) e leitura sacarimétrica (LS). Para os valores de pol no caldo ( $S_j$ ) onde os valores devem ser convertidos para clarificação com subacetato de chumbo, pureza do caldo (PUR), açúcares redutores no caldo ( $AR_j$ ), fibra % cana (FIB), pol na cana (PC), açúcares redutores % cana (ARC) e açúcares totais recuperáveis (ATR) foi calculado da seguinte maneira:

$$S_j = (1,00621 \cdot LS + 0,05117) \cdot (0,2605 - 0,0009882 \cdot B_j);$$

$$PUR = (S_j / B_j) \cdot 100;$$

$$AR_j = (3,641 - 0,03343 \cdot PUR);$$

$$FIB = (0,08 \cdot PBU + 0,876);$$

$$PC = S_j \cdot (1 - 0,01 \cdot FIB) \cdot (1,0313 - 0,00575 \cdot FIB);$$

$$ARC = AR_j \cdot (1 - 0,01 \cdot FIB) \cdot (1,0313 - 0,00575 \cdot FIB);$$

$$ATR = 9,26288 \cdot PC + 8,8 \cdot ARC;$$

$$\text{Extração} = (((500 \cdot S_j) - (PBU \cdot S_j)) / (500 \cdot PC)) \cdot 100$$

### **3.1 Método de Análise pela Prensa Hidráulica da Cana-de-Açúcar**

### **3.2 Objetivo da Metodologia**

As análises de brix, leitura sacarimétrica e PBU da cana-de-açúcar tem como, objetivo de determinar a qualidade da matéria prima para vários fins, por exemplo o cálculo de eficiência das moendas e os rendimentos industriais (MARQUES, 2007).

### **3.3 Análises Estatísticas**

O delineamento estatístico foi fatorial, sendo um fator a origem da cana (esteira de borracha ou “shutt donelly” do quinto terno) e outro fator a potência no primeiro ensaio e o tempo de exposição no segundo ensaio. Todos os dados foram submetidos à análise de variância (ANOVA,  $p < 0,05$ ) e ao teste de comparação de médias Scott-knott ( $p < 0,05$ ) segundo Banzatto e Kronka (2006) no software Sivar e para a confecção dos gráficos foi utilizado o programa matemático Microcal Origin 6.0 e utilizou-se o programa Maple 12.0 para as derivações dos pontos máximos.

#### 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 3, pode-se observar que as diferentes potências utilizadas não promoveram alterações na variável ATR. Apenas detectou-se diferenças para estas variáveis entre a cana desintegrada da esteira de borracha e do “shutt-donelly” do quinto terno.

**TABELA 3-** Açúcares totais recuperáveis (ATR) (kgTC<sup>-1</sup>), em função das diferentes potências (W) para os diferentes materiais.

Potência (W)	Esteira de Borracha	Quinto Terno	Média
0	111,86 Aa	26,55 Ab	69,21 A
125	112,19 Aa	27,50 Ab	69,84 A
156	111,91 Aa	26,86 Ab	69,39 A
188	115,12 Aa	27,44 Ab	71,28 A
218	114,58 Aa	27,57 Ab	71,07 A
250	115,49 Aa	27,19 Ab	71,34 A
Média	113,53 a	27,18 b	70,35

CV% 4,53

Letras maiúsculas diferenças na coluna e letras minúsculas diferenças na linha ( $p < 0,05$ ), teste Scott-Knott.

Fonte: Do autor, 2012.

Já na Tabela 4 observa-se diferentes valores de pol no bolo úmido para a cana do “shutt-donelly” do quinto terno entre o tratamento sem o uso de micro-ondas (testemunha) com todos os demais tratamentos, independente da potência utilizada. Este fato pode ser explicado devido a adição de água no quinto terno (embebição), aumentando a umidade do produto faz com que a atuação das micro-ondas se tornem mais eficientes (Carvalho,2005).

**TABELA 4-** Pol do bolo úmido (sacarose aparente % bolo úmido), em função das diferentes potências (W) para os diferentes materiais.

Potência (W)	Esteira de Borracha	Quinto Terno	Média
0	3,97 Aa	0,97 Ab	2,47 A
125	4,03 Aa	0,46 Bb	2,25 A
156	4,68 Aa	0,30 Bb	2,49 A
188	4,11 Aa	0,31 Bb	2,21 A
218	3,99 Aa	0,23 Bb	2,11 A
250	3,55 Aa	0,38 Bb	1,96 A
Média	4,05 b	0,44 a	2,25

CV% 22,08

Letras maiúsculas diferenças na coluna e letras minúsculas diferenças na linha ( $p < 0,05$ ), teste Scott-Knott.

Fonte: Do autor, 2012.

Para variável extração Tabela 5 observa-se que todas as potências promoveram maiores extrações quando comparadas a testemunha (sem uso de micro-ondas). Para Chemat et al., (2005) durante irradiação, as células da matriz da amostra são termicamente estressadas, continuamente com aumento da temperatura das células e, conseqüentemente ocorre ruptura das paredes celulares promovendo a drenagem de seu conteúdo, fato que beneficia a extração. Para os valores referentes a esteira de borracha, as maiores extrações são explicadas pelos menores PBU (Tabela 6), sendo a cana igual a somatória de PBU mais volume de caldo extraído, tem-se que maiores volumes de caldos foram obtidos ocasionando, maiores extrações. De acordo com Gonçalves et al., (2009) elevações da temperatura proporcionam menor viscosidade do caldo, maior agitação das moléculas.

**TABELA 5-** Extração (sacarose aparente no caldo % sacarose aparente na cana), em função das diferentes potências (W) para os diferentes materiais.

Potência (W)	Esteira de Borracha	Quinto Terno	Média
0	81,98 Bb	83,74 Ba	82,86 B
125	83,06 Ab	84,43 Aa	83,75 A
156	83,05 Ab	84,30 Aa	83,68 A
188	83,12 Ab	84,41 Aa	83,77 A
218	83,35 Ab	84,40 Aa	83,88 A
250	83,10 Ab	84,32 Aa	83,71 A
Média	82,94 b	84,27 a	83,61

CV% 0,30

Letras maiúsculas diferenças na coluna e letras minúsculas diferenças na linha ( $p < 0,05$ ), teste Scott-Knott.

Fonte: Do autor, 2012.

**TABELA 6-** PBU (g) em função das diferentes potências (W) para os diferentes materiais.

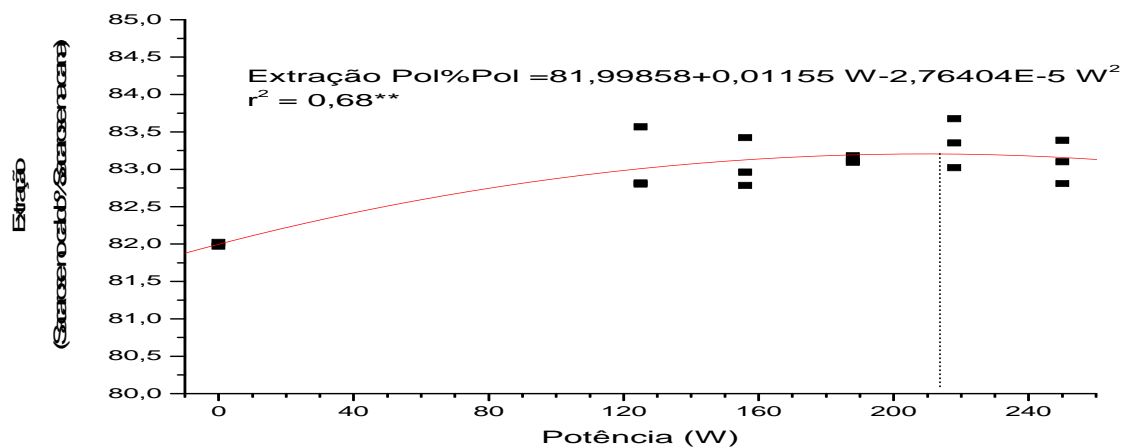
Potência (W)	Esteira de Borracha	Quinto Terno	Média
0	164,73 Aa	148,48 Ab	156,61 A
125	156,43 Ba	144,70 Ab	150,57 B
156	158,97 Ba	145,66 Ab	152,31 B
188	155,43 Ba	144,35 Ab	149,89 B
218	155,95 Ba	143,93 Ab	149,94 B
250	155,40 Ba	141,88 Ab	148,64 B
Média	157,82 a	144,82 b	151,33

CV% 2,18

Fonte: Do autor, 2012.

A Figura 4 apresenta a análise de regressão entre potência e extração de sacarose, sendo que a potência de maximização de extração calculada por derivação é de 208,73W e proporcionou extração de 83,2%, Silva (2000) relata que potências maiores promovem maiores penetrações no material em exposição, conseqüentemente elevam a temperatura e proporcionam maiores extrações.

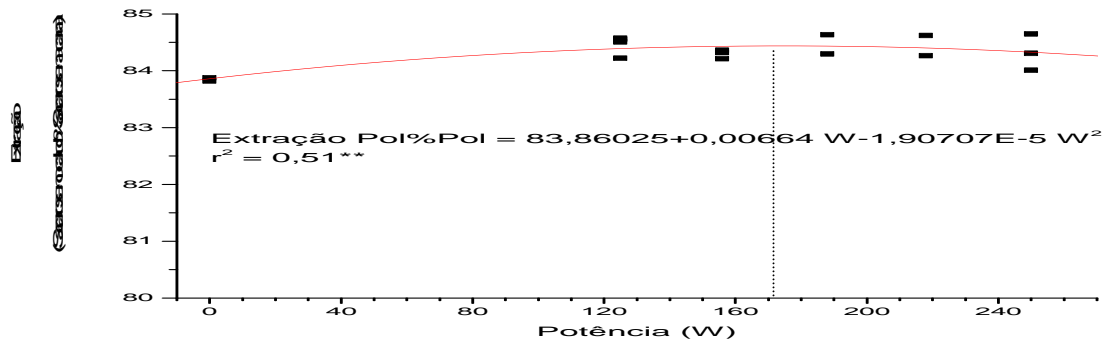
**FIGURA 4-** Extração na cana da esteira de borracha (extração pol%pol), em função da potência (W) no micro-ondas.



Fonte: Do autor, 2012.

A Figura 5 apresenta a regressão quadrática para extração de Pol para cana do “shutt-donelly” do quinto terço e a potência utilizada com 14 de probabilidade, sendo que a potência de maximização de extração foi de 174,08W e proporcionou extração de 84,41%. Esta figura demonstra que com o aumento da potencia utilizada consegue-se elevações na extração.

**FIGURA 5-** Sacarose aparente no caldo % sacarose aparente na cana do “shutt-donelly” do quinto terno (extração pol%pol), em função da potência (W) utilizada.

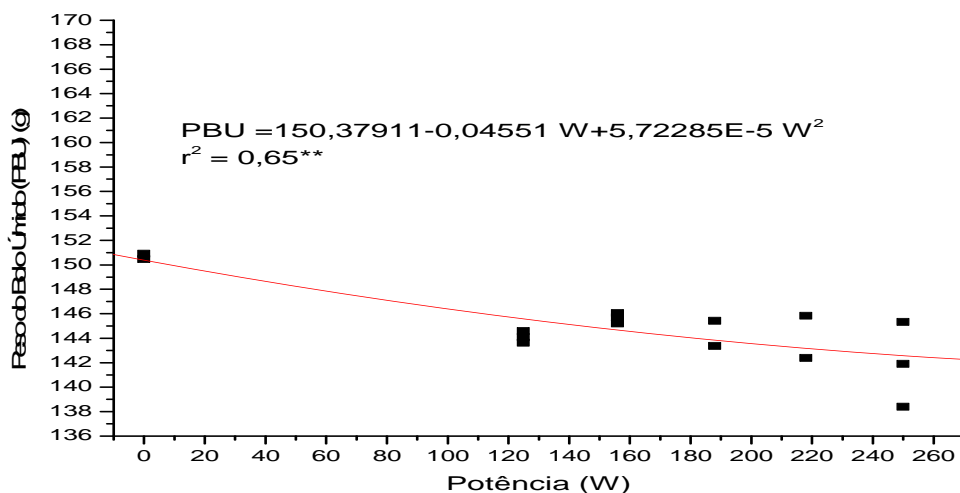


Fonte: Do autor, 2012.

Figura 4 e 5 reforçam as maiores extrações com o uso de micro-ondas e descrevem modelos matemáticos para as diferentes potências.

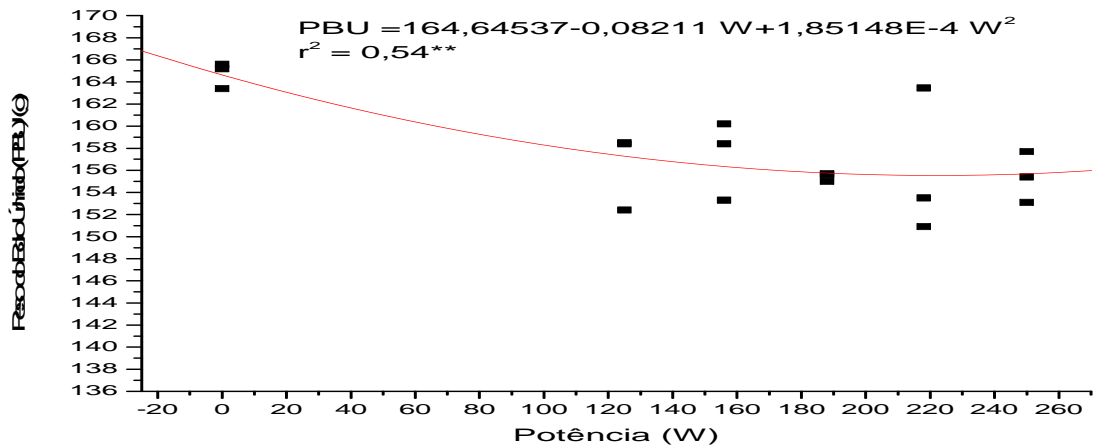
As Figuras 6 e 7, apresentaram regressões quadráticas entre PBU e potência, tanto para cana da esteira de borracha quanto para a amostra do “shutt-donelly” do quinto terno. Observa-se que maiores potências resultam em menores PBU, ocasionando maiores extrações.

**FIGURA 6-** Peso do bolo úmido na cana da esteira de borracha em relação a potência.



Fonte: Do autor, 2012.

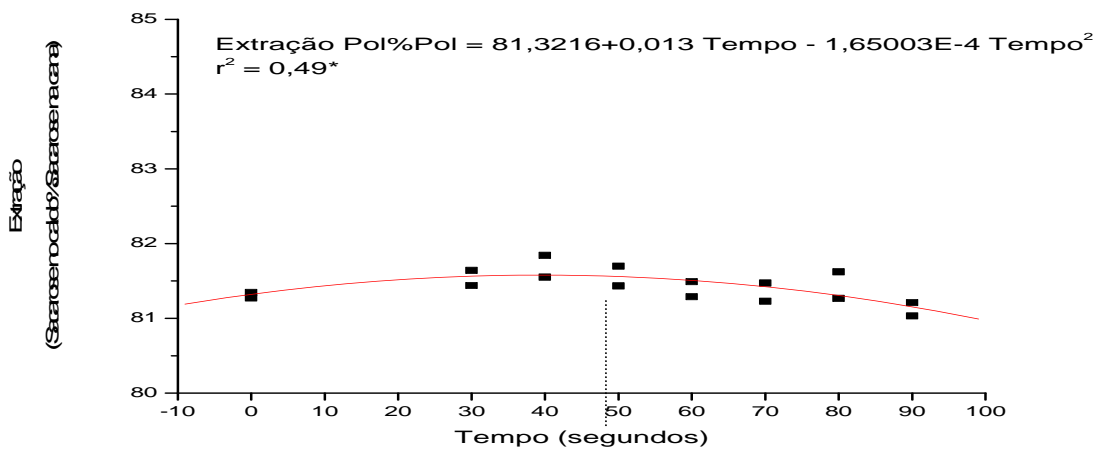
**FIGURA 7-** Peso do bolo úmido do “shutt-donelly” do quinto terno em função do aumento da Potência.



Fonte: Do autor, 2012.

A Figura 8 revela correlação entre tempo de exposição com a potencia de 312W a micro-ondas e extração, sendo o tempo de otimização de 39,4 segundos proporcionando extração (sacarose aparente no caldo % sacarose aparente na cana) de 81,58%, Zhang e Datta, (2000), que associa o tempo de exposição diretamente com o aumento da temperatura, o que pode ser associado a maiores extrações como revela o modelo matemático, com um valor de maximização.

**FIGURA 8-** Extração da Pol na cana da esteira de borracha em relação o tempo de aplicação da potência máxima (312W).



Fonte: Do autor, 2012.

## 5 CONCLUSÕES

O uso de radiação micro-ondas aumenta os índices de extração;

A radiação micro-ondas reduz o peso do bolo úmido (PBU);

Existe uma correlação entre índices de extração e potência utilizada, com significância a 1%.



## REFERÊNCIAS

BANZATTO, D.A; KRONKA, S.N. **Experimentação agrícola**. 4. ed. Jaboticabal: FUNEP, 2006.

BARBOZA, A.C.R.N et al. Aquecimento em forno de microondas: desenvolvimento de alguns conceitos fundamentais. **Química Nova**, Campinas, v. 24, n. 6, maio, 2001.

BELTRÃO, S.C.; ANDRADE, S.A. **Engenharia e tecnologia açucareira**. Recife: Departamento de Engenharia Química da UFPE, 2006.

CALVO, M.M.; OLANO, A. Thermal treatments of goat's milk. **Ciencia y Tecnología de Alimentos**, v. 32, n. 2, p. 139-152, 1992.

CARVALHO, R.P. **Microondas** – temas atuais de física. São Paulo: Ed. Livraria da Física, 2005.

CASTRO, S.B.; ANDRADE, S.A.C. **Tecnologia do açúcar**. Recife: Ed. Universitária do UFPE, 2007. p. 72-81.

CENTURION, J.F. et al. Influência do cultivo da cana-de-açúcar e da mineralogia da fração argila nas propriedades físicas de Latossolos Vermelhos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, p. 199-209, 2007.

CHEMAT, S. Assistida por microondas, extração cinética de terpenos de alcaravia sementes "Engenharia Química e Processamento". 2005.

CHEN, J.C.P.; CHOU, C.C. **Cane sugar handbook**. 12 ed. New York: [s.n.] ,1993. p. 1090.

CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento de safra brasileira: cana-de-açúcar**, terceiro levantamento, agosto/2012. Disponível em: <http://www.conab.gov.br>. Acesso em: 01 Set. 2012.

CTC - Centro de Tecnologia Canavieira. **Perdas industriais**. [s.l.]: [s.n], 2009.

CUI, Z.W; MEI, C. A breve introdução de MAE. **International Journal of Engineering Technology iJet-IJENS**, v. 10, 2002.

DATTA, A.K.; HU, W. Quality optimization of dielectric heating processes. **Food Technology**, v. 46, n. 12, p. 53-56, 1992.

DURNEY, C.H. Radiofrequency radiation dosimetry handbook. **USAF School of Medicine Report**. TR – 85-73, 1986.

FERNANDES, A. **Cálculos na agroindústria da cana-de-açúcar**. 2. ed. Piracicaba: EME, 2003.

FERNANDES, A. **Cálculos na agroindústria da cana-de-açúcar**. Piracicaba: EME, 2011. v. 2.

GEDYE, R.N.; WEI, J.B. Rate enhancement of organic reactions by microwaves at atmospheric pressure. **Journal of Chemical Reviews**, v. 76, n. 5, p. 525-532, 1998.

GREENE, M.W. Non-ionizing radiation. In: **Proceedings...** 2nd International Non-Ionizing Workshop, Vancouver, B.C. 1992.

GONÇALVES, M.F.V. et al. **Tratamento térmico do amido de batata-doce (Ipomoea batata L.) sob baixa umidade em micro-ondas**. Campinas: Ciência e Tecnologia de Alimentos, 2009.

GOU, H.R. et al. **Microwave-Assisted Extraction of Chlorophyll from Filter Mudo f Sugercane Mill and Component Analysis**. Advances in Environmental Science and Engineering, 2012.

HEDDLESON, R.A.; DOORES, S. Factors affecting microwave heating of foods and microwave induced destruction of foodborne pathogens - a review. **Journal of Food Protection**, v. 57, n. 11, p. 1025-1037, 1994.

KAKITA, Y. et al. Inactivation of *Lactobacillus* bacteriophage PL-1 by microwave irradiation. **Microbiology Immunology**, v. 39, p. 571-576, 1995.

MARQUES, M.O. et al. **Tecnologia do açúcar, produção e industrialização da cana-de-açúcar**. Jaboticabal: Funep, 2001.

MARQUES, T.A. **Apostila de análise tecnológica - usinas e destilarias**. Presidente Prudente: [s.n], 2007.

METAXAS, R.; MEREDITH, R.J. **Industrial microwave heating**. London: Peter Peregrinus, 1988.

METAXAS, R. **Foundations of electro heat: a unified approach**. Chichester: John Wiley & Sons, 1996.

PANDEY, A. et al. Biotechnological potential of agro-industrial residues. In: sugarcane bagasse. **Bioresource Technology**, v. 74, 2000.

ROCHA, L.C.M.R. et al. **Métodos de secagem de amostras de folhas de acaloreira, cana-de-açúcar e citros na determinação da massa seca e nos teores de macronutrientes**. Jaboticabal: Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, 2011.

ROSENBERG, U.; BOGL, W. Microwave thawing, drying, and baking in the food industry. **Food Technology**, v. 41, n. 6, p. 85-99, 1987.

ROUSSY, G.; PEARCE, J. **Foundations and industrial applications of microwaves and radio frequency fields**. New York: Wiley, 1995.

SANSEVERINO, A.M. **Microondas em síntese orgânica**. 2002. Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/%0D/qn/v25n4/10542.pdf>. Acesso em 17 Out 2001.

SENIZE, J.T. Efeitos biológicos das radiações não ionizantes: normas de segurança para a exposição a campos de rádio frequências e microondas. **Revista da Sociedade Brasileira de Telecomunicações**, v. 11, n. 1, p. 81-89, 1996.

SILVA, B.N.M. **Micro-ondas, a nova macro-onda nos laboratórios de química**. Disponível em: <http://www.uff.br/sbqrio/novidades/Novidades2009/Microondas%20em%20sintese.htm>. Acesso em: 18 Fev 2009.

SILVA, J.A. **Tópicos da tecnologia de alimentos**. São Paulo: Varela, 2000.

SOUZA, R.O.M.A; MIRANDA, L.S.M, **Irradiação de micro-ondas aplicadas à síntese orgânica**: uma história de sucesso no Brasil. Rio de Janeiro: Química Nova, 2011.

TEJERA, I.F.; DE LA TORRE, H.A. Procedimientos de conservacion de los alimentos. II - El calor. **Alimentaría**, v. 28, p. 21-6, 1991.

ZHANG, H. et al. Experimental and numerical investigation of microwave sterilization of solid foods. **American Institute of Chemical Engineers Journal**, 1999.

ZHANG, H.; DATTA, A.K. **Electromagnetics of microwave heating: magnitude and uniformity of energy absorption in oven**. New York: Marcel Dekker, 2000.

ZLOTORZYNSK, A. The application of microwave-radiation to analytical and environmental chemistry. **Critical Reviews in Analytical Chemistry**, v. 25, p. 43–76, 1995.