

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SISTEMAS E
PROCESSOS INDUSTRIAIS**

CÁSSIO TAGLIARI

Estudo da aplicação de microondas no processo de secagem industrial
de borracha sintética

Santa Cruz do Sul, fevereiro de 2012.

UNIVERSIDADE DE SANTA CRUZ DO SUL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SISTEMAS E
PROCESSOS INDUSTRIAIS

Por

CÁSSIO TAGLIARI

Estudo da aplicação de microondas no processo de secagem industrial
de borracha sintética

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Sistemas e Processos Industriais – Mestrado, como um dos pré-requisitos para obtenção do Título de Mestre em Sistemas e Processos Industriais.

Orientador: Prof. Dr. Rubén Edgardo Panta Pazos
Co-Orientador: Prof. Dr. Adilson Ben da Costa

Santa Cruz do Sul, fevereiro de 2012.

RESUMO

A borracha é um componente indispensável no mundo moderno. Inicialmente obtida apenas a partir do látex natural, já no início do século XX começou a ser produzida de forma sintética tendo, esses processos, sido desenvolvidos e otimizados junto com o avanço da ciência. No entanto, na etapa final desse processo produtivo, referente à secagem do produto, as técnicas e princípios em escala industrial têm se mantido sem mudanças e comuns a qualquer tipo de indústria. Esse trabalho se propôs a avaliar a utilização de sistema de aquecimento por microondas no processo industrial de secagem de borracha sintética SBR em uma linha de produção contínua. Caracterizou-se em um estudo do tipo exploratório-experimental, de natureza quantitativa aplicada que iniciou em laboratório, com um forno de microondas de uso doméstico, culminando com a instalação e operação experimental de um equipamento de microondas, de escala industrial, para a secagem de borracha sintética em uma unidade do Rio Grande do Sul de uma indústria petroquímica multinacional. A partir da análise dos resultados, foi constatada a viabilidade da aplicação dessa tecnologia em escala industrial, ainda que essa aplicação dependa de alguma melhoria em relação à mecânica dos equipamentos. Ficou também evidenciado que, apesar da viabilidade apresentada, a secagem por microondas não pode, ainda, ser utilizada como único método de secagem, dado sua limitação de redução de umidade, apontando a necessidade de uma configuração mista, a partir de um processo de secagem assistido por microondas combinado com as técnicas atuais.

Palavras-chave: secagem industrial, microondas, borracha sintética, SBR, elastômeros.

ABSTRACT

Rubber is nowadays an essential component to the modern world. It was originally obtained only from the natural latex but since the beginning of the twentieth century it began to be synthetically produced. Most of these production processes have been developed and continuously optimized during the science evolution. However, the final rubber production stage consists of the industrial drying process, whose principles and techniques have remained mostly unchanged and are very similar to a large sort of industries. This study aims to evaluate the use of microwave heating to dry the SBR synthetic rubber on a continuous production line. This study is characterized as an exploratory and experimental research, which resulted on the installation and operation of an industrial scale microwave equipment for the drying of synthetic rubber in a petrochemical industry at Rio Grande do Sul. Once the data were analyzed, it was possible to identify the feasibility of the application of this technology on industrial scale. However, despite of this, it became clear that this technology should not be applied stand-alone, due to its limitation on drying very low moisture materials. A more efficient application would be achieved through a combined operation with the microwave technology assisting convective drying.

Key-words: industrial drying, microwave, synthetic rubber, SBR, elastomers.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Fluxograma simplificado da fabricação de SBR.....	18
Figura 2 – Teor de umidade em diferentes condições de saturação.....	21
Figura 3 – Classificação de Secadores Industriais.....	25
Figura 4 – Espectro Eletromagnético	27
Figura 5 – Teor de Umidade x Constante Dielétrica.....	29
Figura 6 – Típico sistema de aquecimento por microondas	33
Figura 7 – Caminho da radiação em um aplicador de “onda viajante”	35
Figura 8 – Diagrama de blocos Equipamento Industrial de Secagem por Microondas	38
Figura 9 – Secador por Microondas Industrial da IMS	44
Figura 10 – <i>Layout</i> mecânico simplificado da etapa de secagem de SBR.....	45
Figura 11 – <i>Layout</i> de Secagem com desvio adaptado para secador por Microondas	45
Figura 12 – Pontos de medição de potência	48
Figura 13 – Curva de secagem SBR em microondas de amostras coletadas após a desaguadora	54
Figura 14 – Curva de secagem SBR em microondas de amostras coletadas antes da desaguadora	55
Figura 15 – Vista parcial dos equipamentos para o experimento.....	59
Figura 16 – Vista superior do conjunto de equipamentos para o experimento em linha.....	60
Figura 17 – Detalhe do dispositivo para espalhar a borracha	61
Figura 18 – Camada de borracha na saída do aplicador	62
Figura 19 – Gráfico de Loadings PC1xPC2	68
Figura 20 – Gráfico de Loadings PC1xPC2xPC3.....	71
Figura 21 – Gráfico Biplot PC1xPC2	72
Figura 22 – Gráfico Biplot PC1xPC3	73
Figura 23 – Grumos de borracha ciclizada.....	75

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Critérios de classificação de secadores	26
Tabela 2 – Variáveis do experimento em linha.....	46
Tabela 3 – Resultados laboratoriais de amostras coletadas antes da desaguadora.	53
Tabela 4 – Resultados laboratoriais de amostras coletadas após a desaguadora....	53
Tabela 5 – Resultados dos ensaios dos parâmetros físico-químicos.....	56
Tabela 6 – Custos do experimento em linha	64
Tabela 7 – Dados experimentais.....	66

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	9
1.1	Tema.....	10
1.2	Problema.....	10
1.3	Justificativa	12
1.4	Estrutura do trabalho	14
2	OBJETIVOS.....	16
2.1	Objetivo Geral.....	16
2.2	Objetivos específicos	16
3	REFERENCIAL TEÓRICO.....	17
3.1	Processo de Produção de Borracha Sintética.....	17
3.2	Sistemas de Secagem Industrial.....	19
3.2.1	Teor de Umidade de Sólidos.....	19
3.2.2	Processos de secagem.....	22
3.2.3	Classificação de secadores industriais	25
3.3	Aquecimento por Radiação de Microondas	26
3.3.1	Interação de campos eletromagnéticos com os materiais compostos.....	28
3.4	Sistemas de aquecimento por microondas	32
3.4.1	Gerador de Microondas	33
3.4.2	Guia de Ondas.....	34
3.4.3	Aplicador	34
3.4.4	Demais componentes de segurança e controle.....	36
3.4.5	Uso de sistemas assistidos por microondas na indústria.....	36
3.4.6	Secador Industrial por Microondas	37
4	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	40
4.1	Determinação da eficiência de secagem da borracha sintética por microondas em escala laboratorial.....	42
4.1.1	Determinação do teor de umidade da borracha.....	42
4.2	Determinação de alterações das propriedades físico-químicas, da borracha sintética, quando submetida à radiação de microondas	43

4.3	Instalação do equipamento de secagem industrial por microondas.....	43
4.4	Determinação da eficiência de secagem da borracha sintética em resposta ao estímulo de microondas em escala industrial	46
4.4.1	Potência de microondas	47
4.5	Interpretação de resultados	49
5	RESULTADOS.....	50
5.1	Histórico do experimento em linha.....	50
5.2	Resultados dos ensaios em laboratório	52
5.3	Resultados dos ensaios em linha	57
5.3.1	Instalação do equipamento de secagem industrial por microondas.....	57
5.3.2	Operação do sistema industrial de secagem por microondas	60
5.3.3	Avaliação das condições de operação.....	62
5.3.4	Custos envolvidos no experimento	64
5.4	Eficiência de secagem industrial por microondas	65
5.4.1	Análise dos Loadings.....	67
5.4.2	Análise dos Scores	72
5.5	Análise das condições físico-químicas das amostras	74
6	CONCLUSÃO	76
6.1	Sugestões para futuros trabalhos	79
	ANEXOS	83
	ANEXO A: Layout do teste em linha de produção.....	84
	ANEXO A: Fotos Sistema de Secagem	85

1 INTRODUÇÃO

Atualmente, a borracha e seus sub-produtos tornaram-se parte indispensável no mundo moderno, seja na fabricação de produtos conhecidos como pneus, chiclete, solados de sapato e mangueiras, até em aplicações especializadas para a área médica e espacial. Inicialmente produzida a partir da seringueira, a borracha passou a ter um relevante papel no próprio desenvolvimento do século XX.

Nos idos do século passado, tal importância refletiu em grande desenvolvimento econômico para as regiões produtoras da borracha natural (*Hevea Brasiliensis*), em especial ao Brasil. O conhecimento científico na época sobre a borracha não era muito grande. Em 1909, porém, o químico alemão Fritz Hofmann¹, obteve sucesso na união de moléculas de metil-isopreno, obtendo por isso a patente da primeira borracha sintética do mundo.

A produção de borracha em escala industrial teve um grande impulso, entretanto, durante o período das guerras mundiais que assolaram o mundo (SHREVE, 1980). Sendo um artigo fundamental para a indústria bélica, os exércitos em combate não poderiam ficar dependentes de matérias-primas importadas, muitas vezes de países inimigos.

Com o passar dos anos e o avanço da ciência, diversos outros tipos de borracha sintética foram desenvolvidos, cada um com características especiais sendo propícios para aplicações específicas. Para a indústria de pneus, já nos anos 1930, foi desenvolvida a borracha SBR (Styrene-Butadiene Rubber), formada a partir do copolímero de butadieno e estireno (WHITE, 2001).

Atualmente, as borrachas sintéticas são consideradas *commodities* internacionais, sendo produzidas por empresas químicas especializadas e servindo de matéria-prima para as indústrias finais. Essas indústrias finais é que fazem a vulcanização e mistura de diversos tipos de borrachas para produzirem os produtos para o mercado de consumo.

No processo de fabricação da borracha sintética estão presentes uma série de etapas que transformam os monômeros do início do processo em elastômeros ao término do mesmo. A etapa final dessa fabricação, após as transformações químicas,

¹ Fritz Hofmann (1866-1956) - As pesquisas que resultaram no desenvolvimento da borracha sintética foram realizadas nos laboratórios da "Elberfelder Farbenfabriken vorm. Friedr. Bayer & Co.".

é o processo de secagem, onde o látex coagulado deve ter seu nível de umidade reduzido de 45% para 0,5%, aproximadamente.

Em muitos casos, a secagem envolve a aplicação de energia térmica para evaporação da água. Em um processo de secagem industrial, a transferência de calor se dá predominantemente por convecção e condução (NONHEBEL et al, 1971). Ao longo das últimas décadas, o processo de secagem por ar quente vem sofrendo otimizações, principalmente com relação às fontes combustíveis utilizadas. Contudo, as técnicas e os princípios de secagem têm se mantido basicamente os mesmos, sendo comuns a praticamente todas as indústrias que utilizam etapas de secagem em alguma parte de seu processo produtivo. Segundo explica Mujumdar (2011b), a despeito das inovações tecnológicas, a tendência na indústria, especificamente no que tange à secagem, é sempre de se repetir e copiar o que já está há longo tempo em funcionamento.

Dessa forma, este trabalho se propõe a estudar alternativas técnicas que possam modificar esta tendência, introduzindo outras tecnologias de secagem aplicadas à indústria de borracha sintética.

1.1 Tema

Esta pesquisa está voltada ao processo industrial de secagem de borracha sintética (SBR). O foco do trabalho será no estudo para a implantação de alternativas tecnológicas aos sistemas convectivos a partir de aplicações com microondas.

1.2 Problema

A secagem de produtos em fornos industriais é um processo relativamente lento, principalmente em função das grandes inércias envolvidas. Quanto maior a temperatura do forno, mais rapidamente se consegue fazer a secagem. No entanto, para a secagem de borracha, a temperatura passa a ser um fator crítico. Segundo Shreve (1980), a borracha sintética é um material difícil de secar, sendo necessário um extremo cuidado para não ocorrer um sobreaquecimento, uma vez que o excesso

de calor pode deteriorar o produto e até mesmo provocar sua autocombustão. Em função disso, o controle de temperatura do forno e da borracha durante o processo é extremamente complexo e vital para a correta secagem do produto.

Parte da desidratação da borracha se dá por convecção, ou seja, a partir da troca térmica entre o ar quente e a superfície da borracha. Essa, por sua vez, propagará essa energia para as moléculas de água, fazendo com que as mesmas evaporem. Para se obter melhores desempenhos, a área de troca térmica deve ser maximizada, impactando em fornos com grande geometria. Além disso, grandes volumes de ar devem ser aquecidos para entrarem em contato com a superfície da borracha.

Entretanto, quanto mais secas forem ficando as camadas exteriores da borracha, maior também se torna o coeficiente de isolamento térmico dessa camada externa. Com isso, a propagação do calor para as demais áreas internas do produto é prejudicada, impactando na eficiência da secagem. Conseqüentemente, a qualidade do produto acaba variando e frequentemente fica abaixo daquela esperada (MEREDITH, 1997).

Além da convecção, a circulação de ar quente pela borracha acaba retirando moléculas de água por arraste mecânico, em função principalmente da umidade do ar e da energia cinética presente na lufada. Como o ar deve possuir uma baixa umidade em vias de se maximizar esse efeito, o ar utilizado nos secadores deve ser constantemente renovado, passando, também, a exercer a função de meio exaustor do vapor. Assim, um grande esforço energético é empreendido para se aquecer e fazer circular uma considerável massa de ar que logo será descartada.

Conforme Mujumdar (2006), a secagem é uma das operações unitárias industriais com o mais intenso uso de energia, em grande parte em razão do alto calor latente de vaporização e da ineficiência do uso de ar quente como meio de secagem. A baixa eficiência técnica e energética apresentada pelos sistemas tradicionais de secagem de borracha impacta nos custos de produção e compromete a uniformidade da umidade ao longo do processo. Esses fatores acabam refletindo negativamente na qualidade do produto final e nos custos de produção.

Assim sendo, com a realização deste estudo se pretende responder à seguinte questão: é possível a utilização de sistemas industriais de aquecimento por

microondas no processo de secagem da borracha sintética SBR em uma linha de produção contínua?

1.3 Justificativa

A borracha sintética SBR é atualmente um produto largamente utilizado como insumo da indústria, destacando-se, em termos de volumes, a fabricação de pneus (ROCHA et al, 2007). A produção desse polímero é feita em escala global por algumas corporações que, sozinhas, dominam quase todo o mercado mundial. A tendência de consolidação tem se mantido, e, cada vez mais, os grupos têm fundido suas operações, buscando uma maior competitividade.

Nessa busca por competitividade, as técnicas empregadas para a secagem do produto final podem ter um papel relevante. Conforme já mencionado, os secadores a ar quente apresentam uma baixa eficiência técnica e energética, resultando em consideráveis custos associados aos insumos para a produção. Por essa razão, novas técnicas que minimizem essas deficiências podem representar uma valiosa vantagem às companhias.

Atualmente, com a evolução da ciência, a radiação de microondas já pode ser considerada como uma técnica viável para aplicações de secagem. Conforme Ku et al. (2002), o processamento industrial de materiais através de microondas é um avanço tecnológico relativamente recente que, além de benefícios às características dos materiais, pode resultar em:

- Redução do impacto ambiental do processamento dos materiais;
- Benefícios econômicos através da economia de energia, redução de espaço físico e tempo para a secagem;
- Aumento de qualidade do produto final, resultante de processos mais homogêneos de secagem.

Além disto, Menéndez et al. (2010) acrescentam os seguintes benefícios à secagem por microondas quando comparadas com a secagem tradicional:

- Aquecimento volumétrico ao invés de superficial;
- Aquecimento sem contato;
- Transferência de energia ao invés de transferência de calor;
- Aquecimento seletivo de materiais.

Tratando-se da tecnologia de secagem de borracha por microondas, estudos conduzidos por Khalid et al. (1988) demonstraram ser possível, sob o ponto de vista técnico, a desidratação de borracha natural através de microondas. Na condução de seu experimento, os autores observaram uma sensível redução no tempo necessário para a secagem de uma amostra de borracha natural ao se utilizar um forno de microondas ao invés de um secador a ar quente. O tempo de desidratação da referida amostra baixou de uma hora para um minuto.

Em termos industriais, a tecnologia de microondas já vem sendo aplicada com sucesso em diversos ramos fabris, tais como processamento de compósitos cerâmicos e processamento de polímeros em geral (KU et al, 2002). Importante salientar ainda que, segundo os mesmos autores, a vulcanização de borracha foi uma das primeiras aplicações de processamento de polímeros com microondas a ter sucesso comercial. Através de ensaios conduzidos na Tailândia, Makul et al. (2010) também obtiveram êxito ao utilizar microondas no processo de vulcanização de borracha natural.

Os elastômeros sintéticos, assim como a borracha natural e os demais materiais de baixa constante dielétrica, praticamente não são influenciados quando submetidos à radiação de microondas. Entretanto, as moléculas de água presentes no material acabam recebendo energia térmica através do processo de aquecimento volumétrico. Conforme Meredith (1998), a energia aplicada ao material é transferida eletromagneticamente a partir da superfície, e não através de um fluxo térmico como ocorrem nos processos convencionais de aquecimento. Com isso, a taxa de transferência de calor não mais passa a ser limitada pela difusão térmica e pela temperatura da superfície de troca térmica, propiciando uma significativa melhora na uniformidade da secagem. Segundo Meredith (1998), ainda, o tempo de aquecimento frequentemente pode ser reduzido a até 1% daquele requerido por um processo de aquecimento convencional.

Ao se estudar, portanto, a eficiência energética e o comportamento do gradiente de secagem, em aplicações de microondas para a secagem de borracha sintética, entende-se ser de extrema importância a proposta de uma nova técnica de desidratação para esse produto em escala industrial, que minimize as atuais deficiências apresentadas pelo sistema a convecção. Nessa questão, o desenvolvimento de uma tecnologia que possa realmente ser aplicada na indústria e que possa acarretar em economia nos custos, passa a se configurar como um grande trunfo estratégico e competitivo para as indústrias que conseguirem obter sucesso na sua aplicação.

1.4 Estrutura do trabalho

O presente trabalho tem por base os experimentos que se originaram a partir de um estudo aplicado ao processo de secagem de SBR em uma indústria petroquímica do Rio Grande do Sul. A fábrica pertence a um grupo de especialidades químicas de atuação global, sendo hoje um dos maiores produtores de elastômeros sintéticos do mundo. O portfólio da companhia inclui produtos para química básica e fina, pigmentos orgânicos e inorgânicos e plásticos de engenharia, além de produtos químicos para borrachas e couros, produtos de proteção e conservação de materiais, químicos funcionais, resinas para o tratamento de águas, entre outros. Em termos globais, o grupo possui 47 unidades produtivas distribuídas em 30 países de todos os continentes, totalizando aproximadamente 16.100 colaboradores. No Brasil, a empresa conta hoje com cerca de 1.200 funcionários alocados em 8 unidades nos estados de São Paulo, Rio de Janeiro, Pernambuco e Rio Grande do Sul.

Este trabalho, além da presente introdução, está estruturado em mais 4 capítulos. O segundo capítulo apresenta o objetivo geral do estudo, que consiste em avaliar a utilização de sistema de aquecimento por microondas no processo industrial de secagem de borracha sintética SBR em uma linha de produção contínua. Apresenta, também, as etapas específicas para a obtenção desse objetivo.

Já o terceiro capítulo é destinado ao referencial teórico, onde se buscou o posicionamento de diferentes autores sobre os assuntos ligados ao estudo. São

abordados aspectos referentes ao processo de produção de borracha sintética, aos sistemas de secagem industrial e aos sistemas de aquecimento por microondas.

No quarto capítulo são descritos os procedimentos metodológicos adotados além de ser feito um detalhamento das etapas que envolveram os experimentos realizados. No capítulo de número cinco são apresentadas, por sua vez, as análises dos resultados, retomando-se, um a um, os objetivos específicos propostos. Conclusão, referências e anexos completam o presente trabalho.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Avaliar a utilização de sistema de aquecimento por microondas no processo industrial de secagem de borracha sintética SBR em uma linha de produção contínua.

2.2 Objetivos específicos

- Determinar o comportamento de secagem da borracha sintética em resposta ao estímulo de microondas em escala laboratorial;
- Determinar alterações das propriedades físico-químicas da borracha sintética, quando submetida à radiação de microondas;
- Instalar um equipamento de secagem por microondas na linha de produção industrial;
- Determinar a eficiência de secagem da borracha sintética em resposta ao estímulo de microondas em escala industrial;
- Descrever as características técnicas de instalação e operação de sistemas de aquecimento por microondas para a secagem de borracha sintética.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 Processo de Produção de Borracha Sintética

A borracha é originária de duas fontes bem distintas: uma “natural” e outra “sintética” (BARLOW, 1994). Enquanto a borracha natural é um produto obtido a partir da extração de látex de seringueiras, a borracha sintética (SR) é produzida a partir de processos industriais. Nesses processos, o látex é produzido a partir de monômeros oriundos da cadeia petroquímica ou alcoolquímica. Esse látex sintético, analogamente ao látex natural, é transformado em borracha intermediária.

Segundo Barlow (1994), existem diferentes tipos de borrachas naturais e sintéticas. No grupo das borrachas sintéticas destacam-se: borracha butílica (BR), borracha de butadieno e estireno (SBR) e a borracha de cis-poliisopreno (IR). As três, juntamente com as borrachas naturais, são consideradas como elastômeros *commodities*, sendo responsáveis por grande parte do mercado mundial de borracha.

No que tange especificamente à borracha sintética, conforme Shreve (1980), os diversos métodos de produção desses elastômeros têm muito em comum entre si. Segundo o autor, ainda, o fluxograma do processo de produção da borracha SBR é típico, sendo possível a produção de diversos tipos de borracha nesse mesmo processo. Na Figura 1 é apresentado um fluxograma simplificado para a produção de SBR.

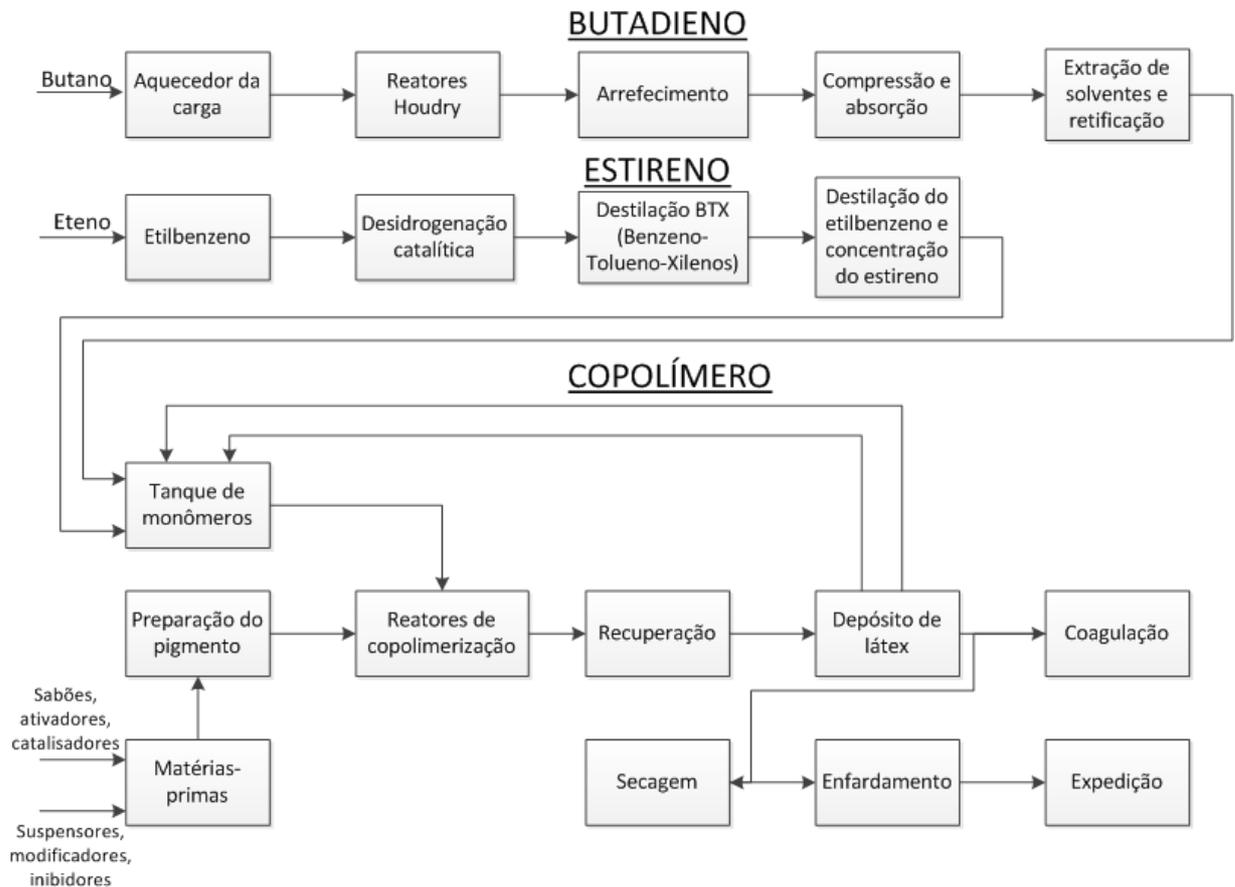


Figura 1 – Fluxograma simplificado da fabricação de SBR
Fonte: Shreve, 1980.

Conforme Figura 1, os monômeros são combinados a partir de proporções específicas e iniciam o processo de polimerização em uma cadeia de reatores, sendo críticos para a qualidade do produto parâmetros como temperatura e tempo da reação. Em determinado ponto, a polimerização deve ser interrompida e os monômeros que ainda não reagiram devem ser recuperados e utilizados novamente como matéria-prima.

A partir dessa reação, obtém-se o látex sintético. Esse látex é armazenado em tanques apropriados, sendo então enviado para o processo de coagulação. Nessa etapa, a borracha da emulsão é precipitada em forma de grumos a partir da adição de um eletrólito e um ácido diluído. Esses grumos coagulados são lavados em peneiras e secados a temperaturas convenientes (SHREVE, 1980). Após isso, a borracha é prensada e embalada em fardos, seguindo então para o setor de armazenamento.

3.2 Sistemas de Secagem Industrial

Conforme Blackadder et al. (2004), pode-se dizer que, genericamente, a secagem é o processo de remoção térmica de uma substância volátil – normalmente água – de um sólido, semi-sólido ou líquido, produzindo um sólido seco. Essa conversão é feita a partir da evaporação do líquido presente no sólido através da aplicação de calor. A mudança de fase e a obtenção de um produto em fase sólida são requisitos essenciais ao processo de secagem (MUJUMDAR, 1997).

Segundo o autor, a secagem é um processo complexo que envolve acoplamento simultâneo, transferência transiente de calor, transferência de momento e transporte de massa. Tais processos de transformações químicas e físicas podem provocar alterações na qualidade do produto. Essa informação é complementada por Mujumdar (2006) que explica que, em muitos processos, a secagem imprópria pode levar a danos irreversíveis à qualidade do produto.

Conforme Costa (2007), a secagem é uma das operações industriais mais utilizadas, tanto para o acabamento final quanto para o equilíbrio de umidade própria dos diversos materiais processados. A secagem é uma operação essencial para diversos ramos industriais, tais como indústria química, farmacêutica, de biotecnologia, alimentícia, cerâmicos, papel e de processamento de minerais e madeira.

3.2.1 Teor de Umidade de Sólidos

Segundo Anantharaman et al. (2005), o teor de umidade contido em uma solução líquida ou em um sólido úmido exerce uma pressão de vapor sobre uma extensão desse material, sendo essa pressão dependente da natureza da umidade, natureza do sólido e de sua temperatura. Um sólido úmido exposto a um gás perde continuamente sua umidade para esse gás, até que a pressão de vapor da umidade do sólido seja igual à pressão parcial do vapor desse gás.

Nesse instante, o material sólido e o gás entram em equilíbrio, e o teor de umidade restante no material é denominado Umidade de Equilíbrio. Mesmo que esse material fique exposto complementarmente por longos períodos de tempo, não

haverá nenhuma perda adicional de umidade desse sólido. O teor de umidade do material só poderá sofrer nova redução se for exposto a um gás com um menor nível de umidade relativa (MUJUMDAR, 2006).

Uma vez que um sólido úmido é normalmente mais inchado do que quando está seco – livre de umidade, não é conveniente expressar-se o teor de umidade desse material em termos volumétricos. Segundo ensina Pacheco (2002), o teor de umidade de um sólido (X) é normalmente expresso como o quociente entre a massa de umidade (M_a) e a massa do sólido isenta dessa umidade (M_d), conforme equação (1) abaixo:

$$X = \frac{M_a}{M_d} \quad (1)$$

De acordo com Van Brackel (1980), a higroscopia dos materiais é um tema importante para a análise do comportamento do seu teor de umidade. Um produto seco é dito higroscópico se for capaz de se ligar à água com uma diminuição simultânea da pressão de vapor. As propriedades higroscópicas dos produtos dependem de diversos fatores, entre eles a estrutura molecular, a solubilidade e a extensão da superfície reativa. Diferentes produtos podem apresentar diferentes propriedades higroscópicas.

A isoterma de absorção, também chamada de isoterma de equilíbrio, é utilizada para descrever as propriedades higroscópicas de um produto. Em condições experimentais isotérmicas, um gráfico pode ser construído representando a umidade de um sólido versus a umidade relativa do gás em seu entorno – normalmente ar. Na Figura 2, pode ser visto um exemplo de diagrama de isoterma de equilíbrio.

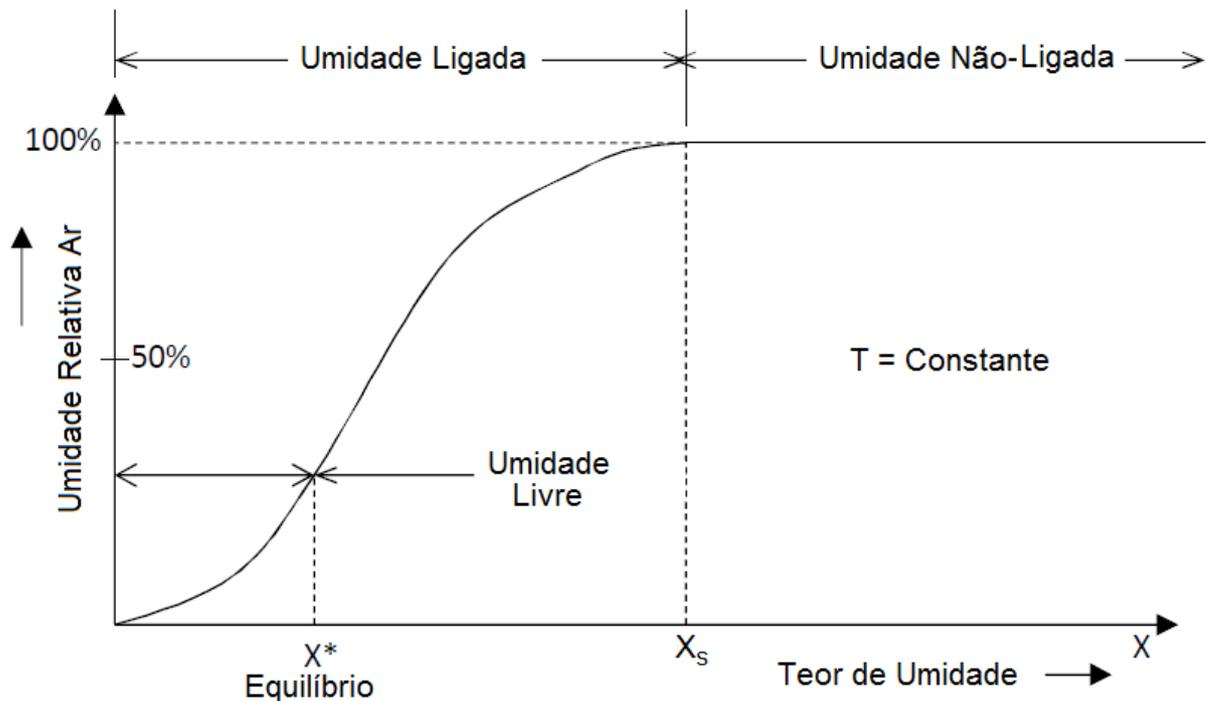


Figura 2 – Teor de umidade em diferentes condições de saturação
 Fonte: Adaptado de Mujumdar, 2011a.

No ponto X^* , o teor de umidade do sólido está em equilíbrio com as condições externas, sendo a pressão de vapor do líquido menor que a pressão parcial da atmosfera externa. Segundo Anantharaman et al. (2005), a higroscopicidade máxima X_s é atingida quando o sólido está em equilíbrio com um ar saturado, ou seja, com 100% de umidade relativa.

Durante o processo de secagem – sob temperatura e pressão constantes – de um determinado sólido saturado, sua umidade vai reduzindo-se até chegar ao valor de saturação X_s . Nesse intervalo, a pressão de vapor exercida pela água presente no sólido é exatamente igual à da água pura. A partir do ponto X_s , a umidade passa a exercer, gradualmente, pressões de vapor menores do que a pressão de vapor da água pura, atingindo um valor de umidade de equilíbrio no ponto X^* . Trata-se do limite mínimo de umidade que um material pode atingir durante secagem sob condições específicas de temperatura e umidade do ar (ANANTHARAMAN et al., 2005).

Conforme define Mujumdar (2006), a umidade presente em ligações químicas e que exerce uma pressão de vapor menor do que a da água pura é chamada de água ligada ou de umidade ligada. Já a umidade excedente ao ponto de saturação é

denominada de água não-ligada ou de umidade não-ligada. Microscopicamente, essa água se torna ligada ou não em função de diversos fatores, dependendo do tipo de material. Van Brackel (1980), por sua vez, explica que a água pode se tornar ligada em um sólido por retenção capilar, solução em estruturas celulares, solução com o sólido ou adsorção química ou física na superfície do material. Em materiais higroscópicos, a água não-ligada é composta basicamente pelo excesso de umidade a partir do ponto de saturação. Já para os materiais não-higroscópicos, praticamente toda a sua umidade é composta por água não-ligada.

A umidade livre é definida como a quantidade de água passível de ser removida de um sólido a determinada temperatura e pressão. A umidade livre pode incluir tanto água ligada quanto água não-ligada (PACHECO, 2002).

3.2.2 Processos de secagem

Conforme Mujumdar (2006), mais de 85% dos secadores industriais são do tipo convectivo, sendo o ar quente ou a combustão de gases o meio secante. Quase 99% das aplicações envolvem a remoção de água. Em todos os tipos de secadores, com exceção dos por efeito dielétrico, o fornecimento de calor se através das bordas do objeto em processo de secagem de maneira que o calor se difunde para o interior do material por condução. O líquido deve migrar para a periferia do material antes que possa ser carregado pelo gás externo. Para Park et al. (2007), quando um material sólido e úmido é submetido à secagem, dois processos ocorrem de forma simultânea:

- I. Transferência de energia, predominantemente na forma de calor, do ambiente externo para a evaporação da umidade superficial;
- II. Transferência da umidade interna para a superfície do sólido e sua consequente evaporação pelo processo descrito em I.

Durante uma operação de secagem, qualquer um desses processos pode se constituir como fator limitante à taxa de secagem, embora ambos ocorram de forma simultânea durante o ciclo de secagem. A taxa na qual acontece a secagem é

determinada pela taxa na qual os dois processos ocorrem. A transferência de energia na forma de calor do ambiente externo para o sólido pode ocorrer como resultado dos seguintes processos: convecção, condução, radiação e, em alguns casos, como combinação de todos esses efeitos (PARK et al., 2007).

De acordo com Nonhebel e Moss (1971), a secagem por condução é relativamente diferente da secagem por convecção. No caso da condução, o material úmido é colocado dentro de uma câmara que é aquecida pelo lado externo. Esse compartimento possui uma abertura por onde o vapor de água pode ser removido. Já no caso de secagem por convecção, gases quentes são soprados através da superfície do material úmido provendo meios tanto para a transferência de calor quanto para a remoção do vapor de água que já se despreendeu do sólido.

3.2.2.1 Processo I: Transferência de Energia

Em se tratando do processo de transferência de energia para o sólido, são as condições externas os fatores mais preponderantes, especialmente durante o estágio inicial, quando a umidade superficial não-ligada é removida. Conforme Williams-Gardner (1971) essas variáveis essenciais são:

- Temperatura;
- Umidade externa;
- Velocidade e direção do fluxo de ar;
- A forma física do sólido;
- Método de sustentação do sólido durante a operação de secagem.

Segundo o autor, ainda, a evaporação superficial é controlada pela difusão do vapor da superfície do sólido para a atmosfera externa através de uma fina camada de ar em contato com a superfície. A secagem envolve a transferência de massa entre fases quando um gás é colocado em contato com um líquido no qual é essencialmente insolúvel. A transferência de massa é normalmente acompanhada de simultânea transferência de calor (MUJUMDAR, 2006).

3.2.2.2 Processo II: Transferência de Umidade

Segundo Parker et al. (2007), além dos fatores relacionados às condições externas relativas à temperatura e umidade do ar externo, o processo de secagem também é dependente das características do sólido. Enquanto ocorre a evaporação de umidade superficial, um gradiente térmico se forma no interior do material como resultado da transferência de calor para o sólido úmido. Isso produz uma migração da umidade do interior para a periferia do material.

Conforme salienta Costa (2007), essa migração de umidade se dá através de um ou mais mecanismos, podendo-se citar entre eles a difusão, o fluxo capilar, o aumento de pressão interna devido ao encolhimento do sólido durante a secagem e, em caso de secagem indireta, através de uma repetida e progressiva vaporização e recondensação da umidade em direção à superfície.

Mujumdar (2006) afirma que a avaliação dessa movimentação interna da umidade é de relativa importância quando isso passa a ser o fator crítico de controle da operação, principalmente em casos de secagem para valores bem reduzidos de umidade final. Conforme ensina o autor, nesses casos, variáveis como temperatura e velocidade do ar, que normalmente agem para melhorar a taxa de evaporação superficial, apresentam relevância reduzida. Nesses cenários, tempos maiores de residência passam a ser prioritários.

De acordo com Mujumdar (2011a), o transporte de umidade dentro do sólido pode ocorrer por um ou mais dos seguintes mecanismos de transferência de massa:

- Difusão do líquido, quando o sólido estiver a uma temperatura menor que o ponto de ebulição do líquido;
- Difusão de vapor, quando o líquido vaporizar dentro do material;
- Difusão de Knudsen, quando a secagem acontece em temperatura e pressão muito baixas;
- Diferenças de pressão hidrostática, quando as taxas de vaporização internas excedem a taxa de transferência de vapor através do sólido;
- Combinações entre esses mecanismos.

3.2.3 Classificação de secadores industriais

Os secadores para uso industrial diferem entre si, dependendo principalmente do método de transferência de calor empregado. Na maioria dos casos, o calor é transferido para a superfície do sólido úmido e depois se propaga para o interior do mesmo. Entretanto, em secagem dielétrica ou por microondas, a energia é suprida para a geração de calor interno ao sólido para depois se propagar para as regiões periféricas (MUJUMDAR, 2006).

De uma maneira geral, os secadores industriais podem ser classificados de acordo com o seu método de operação e condições de serviço. A primeira divisão diz respeito ao modo de alimentação, se contínuo ou em bateladas. Nonhebel e Moss (1971) segmentam, ainda, o segundo nível de acordo com o método de transferência de calor, se por convecção ou por condução. Já Baker (1997) ensina que a segunda subdivisão dos secadores industriais se dá com relação à acomodação do material dentro do equipamento, que pode ser por camadas ou disperso. De acordo com esse autor, ainda, o método de transferência de calor se configuraria como o terceiro nível na classificação. Para Baker (1997), além dos secadores a condução e convecção, há de se considerar na classificação os tipos especiais de aquecimento, tais como aquecimento por radiação solar e microondas. Na Figura 3, é apresentado um diagrama dos diferentes tipos de secadores para uso industrial.

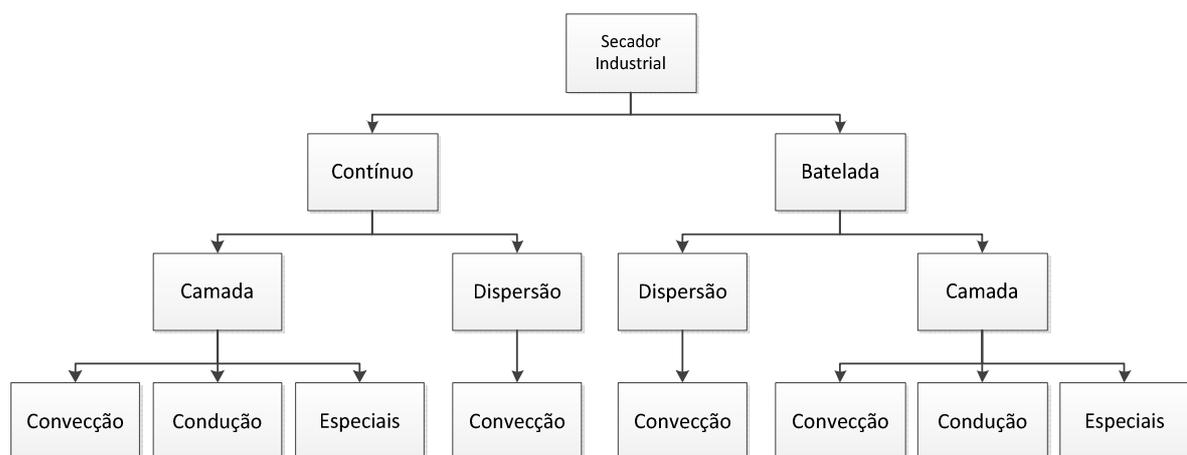


Figura 3 – Classificação de Secadores Industriais

Fonte: Adaptado pelo autor a partir de Nonhebel e Moss (1971) e Baker (1997).

A partir de uma vasta pesquisa em documentos e catálogos técnicos, Mujumdar (2011b) organizou e ampliou a classificação de secadores levando em conta outros fatores. Na Tabela 1, são apresentados os critérios de classificação de secadores industriais.

Tabela 1 – Critérios de classificação de secadores

Critério	Tipo
Modo de operação	<ul style="list-style-type: none"> • Batelada • Contínuo
Tipo de entrada de calor	<ul style="list-style-type: none"> • Convecção, condução, radiação eletromagnética, combinação de meios de transferência de calor • Intermitente ou contínuo • Adiabático ou não-adiabático
Estado do material no secador	<ul style="list-style-type: none"> • Estacionário • Em movimento, em agitação ou disperso
Pressão de operação	<ul style="list-style-type: none"> • Vácuo • Atmosférico
Meio de secagem (convecção)	<ul style="list-style-type: none"> • Ar • Vapor superaquecido
Temperatura de secagem	<ul style="list-style-type: none"> • Abaixo do ponto de ebulição • Acima do ponto de ebulição • Abaixo do ponto de congelamento
Número de estágios	<ul style="list-style-type: none"> • Simples • Multi-estágios
Tempo de residência	<ul style="list-style-type: none"> • Pequeno (< 1 minuto) • Médio (1-60 minutos) • Grande (> 60 minutos)

Fonte: Adaptado pelo autor a partir de Mujumdar, 2011b.

3.3 Aquecimento por Radiação de Microondas

Conforme explica Copson (1962), o aquecimento por microondas se distingue fundamentalmente dos demais por ser um processo de radiação. As microondas são ondas eletromagnéticas que se propagam no vácuo sendo constituídas por campos magnéticos e elétricos que se alternam perpendicularmente no espaço (HEWITT, 2002). O espectro eletromagnético inclui ainda desde as ondas de rádio, passando

pelas microondas, indo até os raios X e gama. A Figura 4, ilustra o espectro das ondas eletromagnéticas.

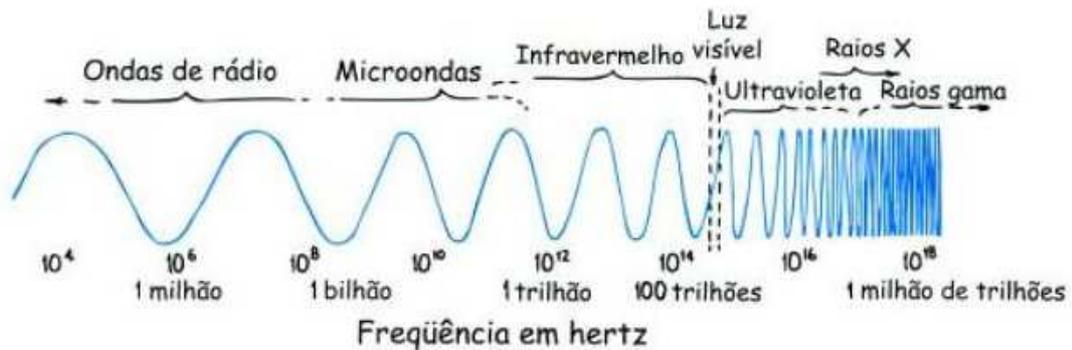


Figura 4 – Espectro Eletromagnético
Fonte: Hewitt, 2002.

A aplicação de microondas para o aquecimento de materiais baseia-se na alta eficiência do chamado aquecimento dielétrico por microondas. Esse tipo de aquecimento é diretamente dependente da habilidade de um material específico em absorver a energia irradiada através de ondas eletromagnéticas e transformá-la em calor (KAPPE et al., 2005).

Conforme Meredith (1998) existem dois princípios básicos para o aquecimento através de radiação eletromagnética: polarização de dipolos e condução iônica. No aquecimento por polarização, os componentes dipolares das moléculas dos materiais se acoplam eletrostaticamente ao campo elétrico das microondas e tendem a se alinhar mecanicamente com as mesmas. Como os campos que constituem a radiação de microondas são alternados no tempo, os dipolos buscam constantemente alinhar-se a eles, permanecendo sempre em estado de oscilação mecânica na frequência das microondas. Nesse processo, energia é transformada em calor em função da fricção molecular causada pelos dipolos em movimento.

A quantidade de calor gerada por esse processo é diretamente proporcional à capacidade das moléculas em se alinhar à frequência do campo a qual estão submetidas. De acordo com Kappe (2005), se o dipolo não possuir tempo suficiente para se realinhar ao campo aplicado (radiação de alta frequência) ou se realinhar muito rapidamente ao mesmo (radiação de baixa frequência), não ocorrerá a produção de calor. As frequências do espectro eletromagnético classificadas como microondas situam-se justamente entre esses dois limites, propiciando aos dipolos

tempo suficiente para se alinhar e realinhar ao campo elétrico. De uma forma geral, pode-se dizer que a energia contida no campo elétrico é transferida para o meio e a energia elétrica é convertida em energia cinética e térmica, produzindo finalmente calor.

Outro fenômeno físico de produção de calor por microondas é dado através do princípio da condução iônica. Meredith (1998) explica que os íons dissolvidos em determinadas substâncias tendem a oscilar mecanicamente na presença de campos eletromagnéticos. Nesse movimento, eles se chocam com as moléculas ou átomos próximos, gerando calor nessas colisões. Conforme Kappe (2005) esse efeito é muito importante particularmente quando se trata do aquecimento de líquidos com cargas iônicas, produzindo, em várias situações, muito mais calor do que aquele gerado pela polarização dos dipolos. Usualmente, o aquecimento de água através de energia de microondas envolve ambos os processos, tanto o aquecimento por condução iônica quanto a polarização de dipolos (MEREDITH, 1998).

3.3.1 Interação de campos eletromagnéticos com os materiais compostos

Segundo Metaxas (1993), as características determinantes à habilidade de um material ser satisfatoriamente aquecido por campos eletromagnéticos estão relacionadas às suas propriedades dielétricas. Essas propriedades, entretanto, são afetadas por uma série de outras condições e parâmetros, tais como a) teor de umidade; b) densidade aparente; c) temperatura e d) condutividade elétrica. Outros fatores, embora não diretamente associados às propriedades dielétricas, também acabam influenciando no aquecimento através de campos eletromagnéticos. São eles: e) condutividade térmica; f) calor específico; g) nível de penetração da radiação e h) energia refletida.

a) Teor de umidade

O teor de umidade em uma substância afeta significativamente sua constante dielétrica, uma vez que a água possui, em temperatura ambiente, uma alta permissividade elétrica – aproximadamente 78 F/m (GUPTA et al., 2007). De maneira

geral, portanto, quanto maior for o percentual de água em determinado material, maior será sua constante dielétrica.

Levando-se em consideração que o processo de secagem visa à remoção de umidade, é interessante notar que, quanto maior for a redução do nível de água, maior também será a redução das perdas dielétricas, prejudicando a habilidade de aquecimento do material. Conforme Schiffmann (2006), em muitos casos isso leva a um aquecimento auto-limitado, à medida que o material, com baixo teor de umidade, vai se tornando relativamente transparente à radiação de microondas. Na Figura 5, é ilustrado o comportamento da constante dielétrica de um material em função de seu teor de umidade.

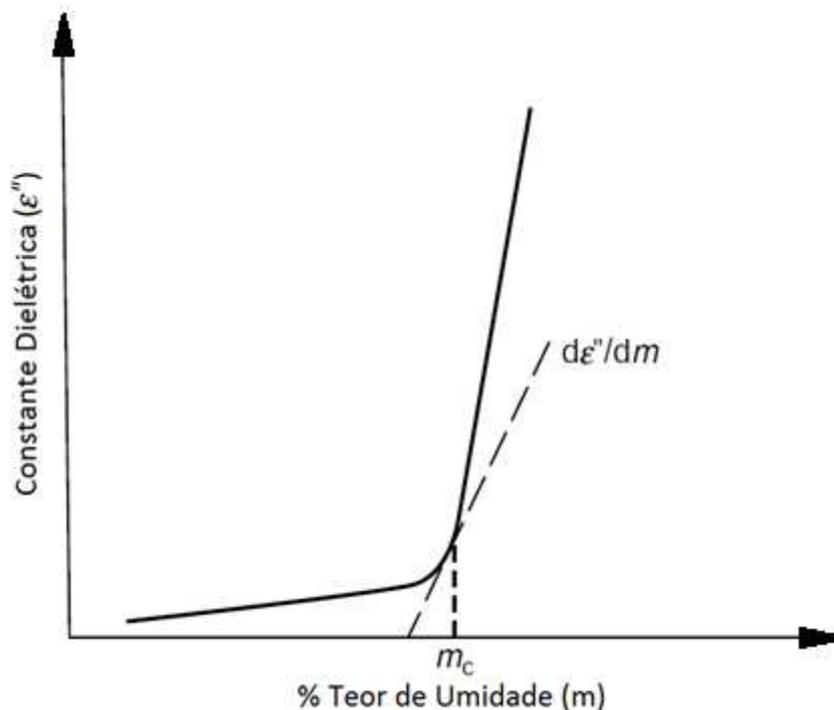


Figura 5 – Teor de Umidade x Constante Dielétrica
Fonte: Adaptado pelo autor a partir de Schiffmann, 2006.

Conforme visto anteriormente, a água está presente nos materiais em diferentes estados, podendo ser ligada ou não-ligada. Dessa forma, em situações de pouca umidade, abaixo do teor de umidade crítica do material (m_c), se está lidando basicamente com água ligada. Acima desse teor de umidade crítica, encontra-se primariamente água livre. Ainda de acordo com Schiffmann (2006), geralmente esse teor de umidade crítica (m_c) está na faixa entre 10 e 40% para materiais altamente higroscópicos e é de cerca de 1% para materiais não-higroscópicos.

b) Densidade aparente

A densidade aparente do material também pode contribuir para variações nas propriedades dielétricas do mesmo. Segundo Gupta et al. (2007), a constante dielétrica do ar em condições ambientes é de 1 F/m, sendo considerada, para efeitos práticos, transparente a radiações eletromagnéticas. Assim, ao se incluir ar no material, reduz-se sua densidade aparente, impactando negativamente nas suas propriedades dielétricas, reduzindo-se, conseqüentemente, a habilidade de produção de calor.

c) Temperatura

A influência da temperatura sobre a constante dielétrica do material é uma relação relativamente complexa, podendo essa constante aumentar ou diminuir dependendo da condição e do material. Como lembra Metaxas (1983), em situações de baixa umidade, a constante dielétrica tende a aumentar com a temperatura, uma vez que as ligações físicas são reduzidas e os dipolos passam a ficar livres para se reorientarem. Já em situações com teor de umidade mais alta, a partir de 25%, a constante dielétrica do material tende a diminuir com o aumento da temperatura.

d) Condutividade elétrica

A condutividade elétrica se refere à habilidade de um material em conduzir corrente elétrica através do deslocamento de elétrons e íons. Essas cargas podem representar um efeito maior no aquecimento e em condições de secagem. Como a concentração iônica aumenta à medida que a água é removida, esse efeito pode ser bem complexo (SCHIFFMANN, 2006).

e) Condutividade térmica

Pode-se definir a condutividade térmica como “o parâmetro físico que caracteriza e quantifica a habilidade de um material em conduzir calor” (UHER, 2004). De uma maneira geral, é possível dizer que esse tipo de condutividade apresenta um papel secundário no aquecimento dielétrico quando comparado ao aquecimento convencional. Isso se deve em função da grande velocidade com que o

calor é gerado no interior do material, restando pouco tempo para que a condutividade térmica possa ocasionar algum efeito.

f) Calor específico

O calor específico é uma propriedade que está associada à resistência do material em alterar sua temperatura. Conforme conceitua Hewitt (2002), “o calor específico de qualquer substância é definido como a quantidade de calor requerida para alterar a temperatura de uma unidade de massa da substância em 1 grau”. Segundo Meredith (1998), essa propriedade é geralmente negligenciada pelos pesquisadores e engenheiros que trabalham com aquecimento eletromagnético e que acabam normalmente focando apenas nas propriedades dielétricas. Entretanto, de acordo com o autor, o calor específico pode ter profundos efeitos e, de fato, ser um parâmetro importante ocasionando um aquecimento muito mais rápido aos materiais, impactando nas previsões centradas apenas nas propriedades eletromagnéticas.

g) Nível de penetração da radiação

À medida que a radiação penetra no material, sua amplitude é atenuada em função da absorção de potência e sua consequente transformação em calor. Para representar quantitativamente esse efeito de decaimento exponencial da dissipação de potência, define-se o Nível de penetração da radiação (D_p). Esse nível D_p é definido como a distância no material, a partir da superfície, onde o fluxo de potência decai para $1/e - 0,328$ – de seu valor superficial (HASHISHO, 2007).

O nível de penetração da radiação, embora não seja propriamente uma propriedade dos materiais, é o resultado de várias outras propriedades. É de extrema importância quando se trata de aquecimento por microondas, uma vez que é muito importante que a energia penetre no material o mais profundo possível, evitando que o aquecimento fique limitado a regiões de superfície. Conforme Metaxas (1993), os principais parâmetros que impactam no nível de penetração da radiação são o comprimento da onda eletromagnética, a constante dielétrica e as dimensões físicas do material submetido à radiação.

Se as dimensões do material forem muito maiores do que a distância D_p , então o gradiente térmico ao longo do material irá se assemelhar muito ao gradiente formado durante um processo de secagem convencional. Entretanto, se o tamanho do material for relativamente pequeno comparado ao nível D_p – por exemplo, apenas uma ou duas vezes maior – pode haver um excesso de concentração de campo eletromagnético no interior do material, levando a um sobreaquecimento localizado (GUPTA et al., 2007).

h) Energia Refletida

Levando-se em conta que a energia de microondas direcionada a um sólido é, na verdade, transportada por uma onda eletromagnética, deve-se considerar os fenômenos próprios associados à transmissão desse tipo de onda. Um desses fenômenos diz respeito à reflexão. Conforme explicam Bird et al. (2009), a reflexão de ondas ocorre quando há uma mudança no meio de transmissão. No caso do aquecimento por radiação de microondas, parte da energia aplicada sobre a carga pode ser refletida quando atingir o sólido, já que nesse instante há a mudança do meio de propagação da onda, deixando de ser o ar e passando a ser o corpo do próprio material (METAXAS, 1993).

3.4 Sistemas de aquecimento por microondas

Segundo descreve Meredith (1998), um sistema de aquecimento por microondas pode ser constituído, basicamente, pelos seguintes componentes: gerador de microondas; guia de ondas; aplicador e demais componentes de segurança e controle. Na Figura 6 é mostrado um típico sistema de aquecimento por microondas e seus componentes principais.

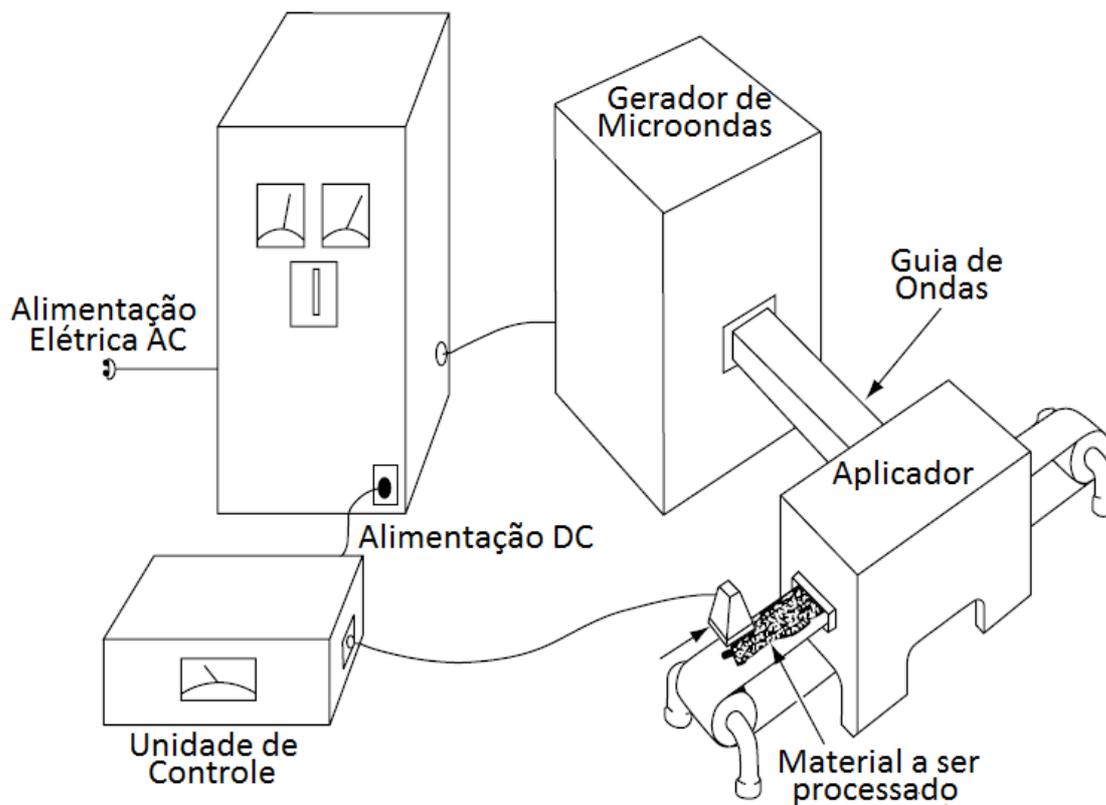


Figura 6 – Típico sistema de aquecimento por microondas
 Fonte: Adaptado pelo autor a partir de Schiffmann, 2006.

3.4.1 Gerador de Microondas

De acordo com Schiffmann (2006), a função básica de um gerador de microondas é converter a energia elétrica, fornecida em corrente alternada de frequência industrial – normalmente 60 Hz, em energia de alta frequência. Para a aplicação em sistemas de aquecimento por microondas, os geradores utilizados são geralmente compostos por uma fonte de potência DC e uma válvula, que pode ser do tipo Klystron ou Magnetron.

Segundo consta na Enciclopédia Britânica Online (2012), o Klystron é basicamente uma válvula eletrônica de tubo utilizada em circuitos osciladores e especialmente projetada para operar em altas frequências, no espectro das microondas. Já os Magnetrons são válvulas diodo feitas a partir de cavidades ressonantes circulares ao redor de um catodo imerso em um campo magnético perpendicular.

3.4.2 Guia de Ondas

Após ser gerada, a energia de microondas deve ser transportada até o aplicador, para que seja direcionada através do material a ser seco. Isso normalmente é feito através de guias de ondas, muito embora cabos coaxiais possam ser utilizados para baixas potências. Um guia de onda é basicamente um duto retangular, geralmente feito de latão ou alumínio. Suas dimensões internas são cuidadosamente escolhidas visando controlar a natureza do campo de microondas presente no aplicador (METAXAS, 1993).

3.4.3 Aplicador

Segundo Schiffmann (2006), a função do aplicador de microondas é concentrar e direcionar a energia das ondas eletromagnéticas e aplicá-las sobre a carga de trabalho, ou seja, sobre o material a ser seco. Os aplicadores podem ser de diversos tipos principais, mas, todos eles, sempre são feitos de metal.

Os próprios guias de onda podem ser utilizados como aplicadores. Considerando-se que o campo elétrico tende a ser máximo no centro do duto, torna-se possível passar um material através desse campo intenso em vias de se obter um aquecimento bem eficiente. Meredith (1998) segmenta os tipos de aplicadores em dois grandes grupos: aplicadores de cavidade e aplicadores de “onda viajante”.

3.4.3.1 Aplicadores de cavidade

Os aplicadores do tipo de cavidade são, na verdade, uma grande classe de aplicadores. É, provavelmente, o tipo mais comum, sendo um forno de microondas residencial um típico exemplo. De acordo com Metaxas (1993), esse tipo de aplicador consiste basicamente de uma caixa de metal, podendo ser utilizada tanto em sistemas contínuos quanto em batelada.

Um grande problema relacionado aos aplicadores de cavidade diz respeito à não-uniformidade do campo eletromagnético sobre a carga de trabalho e

consequente não-uniformidade de aquecimento. Normalmente, algumas medidas são implantadas visando diminuir esse efeito, tais como movimentar ou girar a carga no aplicador através de esteiras ou pratos giratórios. Outra opção é a utilização de múltiplas entradas de microondas, em frequências ligeiramente diferentes, provocando padrões diferentes de aquecimento (SCHIFFMANN, 2006).

3.4.3.2 Aplicadores de “onda viajante”

De acordo com Meredith (1998), os aplicadores de “onda viajante” consistem em dispositivos projetados especialmente para fazer com que a radiação eletromagnética percorra um caminho definido através da carga de trabalho. Esse tipo de aplicador também é conhecido como guia de ondas em serpentina, justamente pelo tradicional formato que adquire.

Conforme Schiffmann (2006), uma fina camada de material, tal como papel ou tecido, pode ser passado através das frestas do aplicador. Com isso, a energia de microondas atravessa diversas vezes a carga, aquecendo-a durante o trajeto. Tratam-se de sistemas de aquecimento de alta eficiência, desenvolvidos para garantir uma melhor distribuição de energia na carga. Mesmo assim, conforme o autor, alguma não-uniformidade lateral pode ainda acabar ocorrendo. Um exemplo de aplicador de “onda viajante” é apresentado na Figura 7.

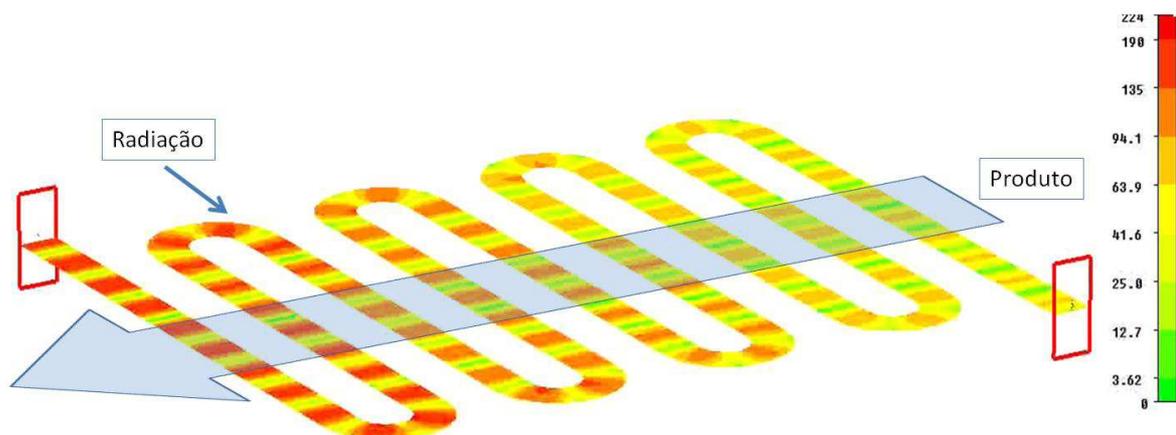


Figura 7 – Caminho da radiação em um aplicador de “onda viajante”
Fonte: Autor, 2012.

3.4.4 Demais componentes de segurança e controle

Meredith (1998) afirma que o nível de radiação que escapa do sistema de aquecimento por microondas deve ser controlado, tanto para conter as eventuais interferências de rádio-frequência (RF) quanto visando a garantir proteção às pessoas ao seu redor. Em sistemas contínuos, onde uma barreira física não pode ser instalada para não interferir no fluxo de produto, medidas especiais tornam-se fundamentais.

Para evitar essa fuga indevida de radiação de microondas, diversos dispositivos, chamados de abafadores ou atenuadores, são utilizados nas aberturas do aplicador. Esses dispositivos abafadores, com geometria específica, têm a finalidade de curto-circuitar qualquer radiação indesejada que tente escapar do equipamento (SCHIFFMANN, 2006).

Metaxas (1993) expõe outra preocupação no que tange à proteção de sistemas de microondas, referindo-se aos eventuais altos níveis de energia refletida pela carga que possam vir a se dissipar na válvula Klystron ou Magnetron. Diversos dispositivos de proteção são utilizados para evitar que essa dissipação aconteça e provoque danos na válvula do gerador.

Um desses sistemas consiste na utilização de um isolador de ferrite, também chamado de circulador. Esse dispositivo, formado a partir de um segmento de guia de ondas com três vias, influencia no campo magnético fazendo com que a energia de microondas siga apenas em uma direção. Com isso, ao retornar ao circulador, a energia refletida pela carga é redirecionada para um caminho alternativo, de maneira que seja dissipada em uma carga específica. Esse tipo de sistema é altamente eficiente e especialmente recomendado para aplicações em potências superiores a 5 kW (MEREDITH, 1998).

3.4.5 Uso de sistemas assistidos por microondas na indústria

O aquecimento por microondas, como um processo industrial, é uma tecnologia que foi originalmente concebida em meados da década de 1940 (METAXAS, 1993). Entretanto, foi somente a partir da grande evolução experimentada pela eletrônica e

pelos sistemas de controle nos últimos decênios que permitiram que essa técnica começasse a ser utilizada comercialmente.

Com o aumento da utilização de microondas industriais, os preços dos equipamentos têm se reduzido ao longo dos anos, abrindo novas perspectivas para o uso dessa tecnologia em processos que tradicionalmente utilizam secadores convencionais. Para essas aplicações, diversos estudos têm sido conduzidos com sucesso, principalmente no que tange à secagem assistida, ou seja, a combinação de sistemas de aquecimento por microondas com sistemas de aquecimento por convecção.

Cunha et al. (2003), conduziram estudos sobre a secagem de café cereja combinando sistemas de microondas e ar quente. Os resultados experimentais indicaram maior eficiência de secagem para o café quando submetido a microondas combinado com ar quente, em comparação quando apenas submetido a ar quente ou somente a microondas. Experimentos de secagem assistida a microondas também foram satisfatoriamente realizadas com amêndoas de castanha do Brasil. Observou-se que a energia de microondas quando combinada com ar quente, acelera o procedimento de secagem, reduzindo substancialmente o tempo de secagem e provendo melhor controle dos parâmetros do processo (SILVA, 2003).

Conclusão similar é apresentada por Rozainee (2010), em seu estudo sobre a desidratação de fatias de peixe utilizando-se sistemas de ar quente assistidos a microondas. Os dados do trabalho mostram que o sistema assistido reduz o tempo de secagem em quase 30 vezes, sem, entretanto, impactar na qualidade do produto final.

3.4.6 Secador Industrial por Microondas

Conforme Schiffmann (2006), embora a tecnologia de secagem por microondas não seja nova, esse ramo industrial ainda é incipiente e a maior parte dos equipamentos é produzida por empresas de pequeno porte. Em função disso, os equipamentos industriais apresentam características de projeto específicas para cada caso e aplicação. Na Figura 8, é apresentado o diagrama de um desses sistemas industriais de secagem por microondas, com aplicadores do tipo “onda

viajante” e especialmente projetado para a secagem contínua de materiais laminares, tais como papéis e tecidos.

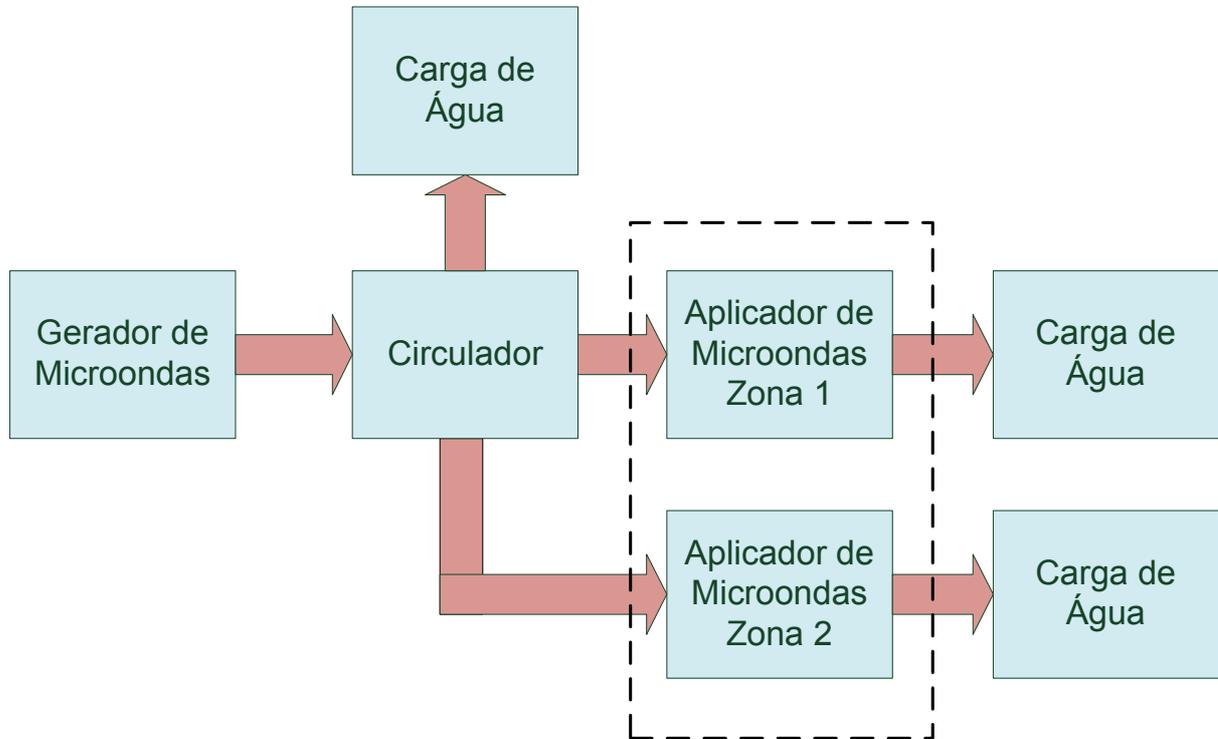


Figura 8 – Diagrama de blocos Equipamento Industrial de Secagem por Microondas
Fonte: Autor, 2012.

Na Figura 8, pode ser visto que radiação de microondas, produzida no gerador, é direcionada para duas zonas de aplicação de microondas. A segregação da energia em múltiplos pontos de aplicação contribui para a melhor distribuição da radiação sobre a carga de trabalho (MEREDITH, 1998). Como medida de proteção ao gerador de microondas, a interconexão dos guias de onda entre os equipamentos se dá através de um dispositivo circulador. Dessa forma, a energia refletida pela carga de trabalho é desviada dos aplicadores diretamente para uma carga intencional de água, não chegando, portanto, a se dissipar na válvula do gerador.

Conforme já estudado anteriormente, a água possui uma elevada constante dielétrica, apresentando grande absorção de radiação de microondas (GUPTA et al., 2007). Em função disso, torna-se a água um excelente material constituinte de cargas intencionais de proteção, uma vez que tende a absorver toda a radiação excedente.

É interessante notar, ainda, que ao final de cada aplicador outra carga intencional de água é colocada. Da mesma forma que dissipa a radiação refletida, as cargas de água no final dos aplicadores do tipo “onda viajante” absorvem a radiação residual ao término do circuito de aplicação. Com isso, a energia não absorvida durante o percurso através da camada de produto acaba se dissipando nesses volumes de água, não sendo refletida em sentido contrário. Essa arquitetura contribui para o controle da secagem, impedindo que a energia não absorvida na primeira passagem sofra reflexão e acabe voltando a atravessar o produto em sentido contrário, ocasionando uma absorção e conseqüente aquecimento não uniforme pelo produto dentro do equipamento (SCHIFFMANN, 2006).

4 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Este estudo refere-se a questões específicas de um setor industrial, onde a bibliografia disponível é bastante limitada, sendo, portanto, realizado a partir de pesquisas experimentais (SANTOS, 2000). Ao mesmo tempo, e também por razões de carência de estudos prévios, possui características exploratórias.

A pesquisa experimental caracteriza-se por manipular diretamente as variáveis relacionadas com o objeto de estudo. Nesse tipo de pesquisa a manipulação das variáveis proporciona o estudo da relação entre as causas e os efeitos de determinado fenômeno. Com a criação de situações de controle, procura-se evitar a interferência de variáveis intervenientes (CERVO et al, 2007, p.63).

O referidos autores acrescentam, ainda, que é feita uma interferência direta na realidade ao manipular-se a variável dependente para observar o que acontece com a variável independente. Para a realização de um experimento, são criadas condições, artificiais ou não, controladas pelo pesquisador (VIEIRA, 2008).

Já a pesquisa exploratória de acordo com Collins e Russey (2006) “é realizada sobre um problema ou questão de pesquisa quando há poucos ou nenhum estudo anterior em que possamos buscar informações sobre a questão ou problema”. Esta idéia é reforçada quando se afirma que os estudos exploratórios têm por objetivo a familiaridade com o fenômeno ou a obtenção de uma nova percepção do mesmo, recomendando-o quando há pouco conhecimento sobre o problema a ser estudado. Em pesquisas exploratórias, o foco é a familiarização com o fenômeno para se obter uma nova percepção e, conseqüentemente, condições de uma investigação mais criteriosa em um estágio posterior (CERVO et al., 2007).

Conforme Mujumdar (2006), todos os processos envolvidos na operação de secagem, em termos matemáticos, são altamente não lineares, tornando-se muito difícil, por isso, sua modelagem em diferentes escalas. Segundo o autor, a experimentação em laboratório associada à experiência e *know-how* de campo são essenciais para o desenvolvimento e aplicação de sistemas de secagem. Já Marinos-Kouris et al. (2006) afirmam que o desenvolvimento de secadores ainda é uma mistura de ciência com experiência prática, sendo necessário um certo grau de empirismo na seleção das condições ótimas de secagem. Assim sendo, a realização

de experimentos em condições produtivas torna-se etapa fundamental. Esse entendimento é corroborado por Barros Neto et al. (2010), que afirmam:

Quando daí se passa à produção, propriamente dita [...] as condições são outras. Em primeiro lugar, há o problema da própria mudança de escala. O efeito de fatores como agitação, transferência de massa [...] varia com o tamanho do equipamento, numa extensão que é difícil prever. Depois, existem os problemas relativos ao dia-a-dia da produção, como variações na matéria-prima ou nas condições de armazenamento, substituição de peças e máquinas, e até mesmo o envelhecimento do equipamento. Tudo isso contribui para que as condições ótimas não sejam a da fábrica piloto e, muito menos, as do laboratório. Se quisermos descobrir quais são essas condições, teremos que partir obrigatoriamente de informações obtidas no próprio processo de produção em larga escala (BARROS NETO et al., 2010, p. 138).

Para o presente trabalho, os experimentos se originaram a partir de um estudo aplicado ao processo de secagem de SBR em uma indústria petroquímica do Rio Grande do Sul, com mensurações adequadas das variáveis envolvidas, enquadrando-se como um estudo quantitativo aplicado. Na pesquisa quantitativa:

o pesquisador busca classificar, ordenar ou medir as variáveis para descrevê-las ou para estabelecer associações e relações entre elas. O conhecimento obtido deve ser generalizável, isto é, deve ser possível, com certa margem de erro, estender o resultado da pesquisa para toda a população de onde proveio o material estudado. Essa generalização se faz com a aplicação da estatística (VIEIRA, 2008, p. 99).

A pesquisa aplicada “é aquela que foi projetada para aplicar suas descobertas a um problema específico”, conforme explicam Colins e Hussey (2006). Assim sendo classifica-se este estudo como do tipo exploratório-experimental, de natureza quantitativa aplicada.

Dada a complexidade e abrangência dos estudos, o correto planejamento e condução dos experimentos tornou-se etapa fundamental para a obtenção de conclusões válidas e objetivas com relação ao tema abordado (MONTGOMERY, 1997). Dessa forma, essa investigação foi conduzida através de cinco etapas principais, conforme os objetivos específicos deste estudo.

4.1 Determinação da eficiência de secagem da borracha sintética por microondas em escala laboratorial

Os ensaios de secagem de amostras de borracha foram realizados no próprio laboratório de produção da fábrica, tendo sido utilizado um forno de microondas de uso doméstico de marca Philco, 18 litros, modelo PMS 18N2, com 700 W de potência máxima. Para o experimento, amostras de aproximadamente 250 g de SBR foram coletadas em duas etapas distintas do processo de secagem industrial. Dessa forma, seis amostras foram coletadas no ponto de entrada da desaguadora mecânica². Outras 15 amostras foram coletadas após esse equipamento, ou seja, no ponto de descarga do mesmo.

As amostras foram submetidas à radiação de microondas por diferentes períodos de tempo, tendo sido monitorada a remoção de umidade ao longo desse processo de aquecimento. Os tempos de exposição variaram de 0 a 21 minutos, tendo sido aplicada, em todas as situações, a potência nominal de 700 W.

4.1.1 Determinação do teor de umidade da borracha

Os ensaios para a determinação da umidade das amostras de borracha foram realizados em triplicata e de acordo com o procedimento ASTM D5668-09, Método A (2009). Basicamente, esse procedimento consiste em se remover por completo a água presente em determinada amostra e, a partir da diferença de massa antes e depois dessa remoção, determinar-se o teor de umidade relativa, em base seca, que essa amostra apresentava.

Em vias de se evitar erros associados à constante evaporação da umidade superficial da borracha, cada ensaio de umidade foi realizado imediatamente após a retirada da amostra do forno de microondas. Para efeito de registro experimental, foi utilizada a média aritmética entre as três medições de umidade.

² Esse equipamento tem por finalidade remover, através de um processo de extrusão mecânica, o excesso de água presente no polímero.

4.2 Determinação de alterações das propriedades físico-químicas, da borracha sintética, quando submetida à radiação de microondas

A avaliação das propriedades físico-químicas das amostras de borracha submetidas à radiação de microondas visou identificar eventuais alterações da borracha em função desse sistema de secagem. Para tanto, as amostras foram enviadas ao laboratório técnico da empresa, localizado no Rio de Janeiro, para a análise de parâmetros referentes às especificações técnicas. Foram determinadas as características de Viscosidade Mooney, conforme norma internacional ASTM D1646 (2007), e os parâmetros de Reometria, segundo formulação ASTM D3185 – Método 1A (2010), em MDR, conforme ASTM D5289 (2007).

4.3 Instalação do equipamento de secagem industrial por microondas

Para a realização dos experimentos, foi selecionado um sistema industrial de aquecimento por microondas do tipo *planar*, fabricado pela empresa IMS – *Industrial Microwave System*. Essa empresa de base tecnológica, localizada em Raleigh no estado americano da Carolina do Norte, e detentora de diversas patentes na área de secagem industrial por microondas, desenvolve produtos para a secagem industrial, com foco principalmente em tecidos e alimentos. Fundamentalmente, os experimentos foram feitos a partir da utilização de equipamentos comerciais já existentes no mercado e que, embora fossem utilizados em outros ramos industriais, poderiam ser facilmente adaptados à indústria de elastômeros.

O sistema industrial de aquecimento por microondas utilizado é composto por um gerador e um conjunto aplicador. O gerador é alimentado eletricamente em 480 V trifásicos e utiliza válvula do tipo Magnetron para gerar microondas em frequência de 915 MHz com potência útil ajustável de até 100 kW.

O conjunto aplicador é formado por dois aplicadores do tipo “onda viajante” conectados em série. Para permitir o uso em operação contínua, os aplicadores apresentam abafadores em suas extremidades, possuindo aberturas de entrada e saída de produto restritas a 7,5 cm (3 in) de altura. A Figura 9 ilustra o equipamento de secagem por microondas da empresa IMS utilizado no experimento.

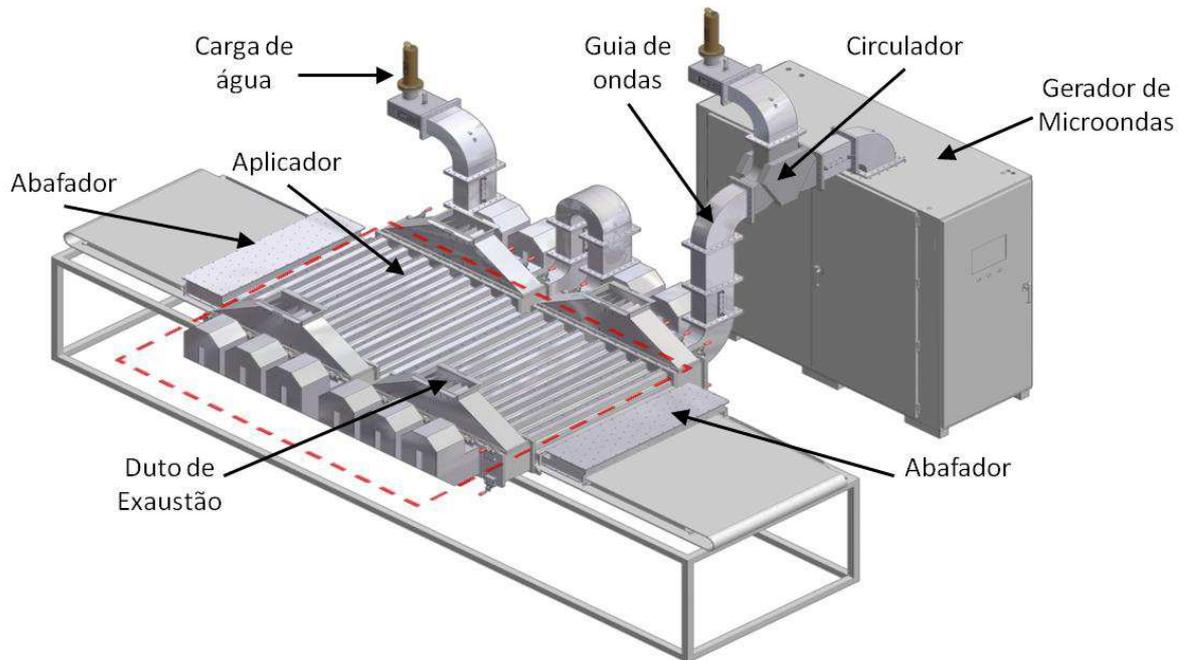


Figura 9 – Secador por Microondas Industrial da IMS
 Fonte: <http://www.ims.com>, acesso em 20 nov. 2010.

Na Figura 9 é possível a visualização do conjunto como um todo. Na cabine à direita, estão instalados os equipamentos de potência, bem como o Magnetron. Pela cavidade superior, as microondas geradas saem diretamente ao circulador, sendo então conduzidas, pelo guia de ondas, até o aplicador. No aplicador, a radiação de microondas segue um caminho pré-determinado através do produto, sendo a energia residual, então, absorvida na carga de água.

Na Figura 9, também, consegue-se identificar a disposição e localização dos abafadores de onda, que impedem que a radiação se propague para fora do equipamento. Nas extremidades superiores do aplicador observam-se, ainda, as saídas dos dutos de exaustão de vapor.

Esse equipamento foi alugado e instalado na linha de produção, passando a ficar em série com o secador convencional. Essa atividade foi realizada entre os dias 28 de abril e 7 de maio de 2011, durante uma parada produção na linha industrial. A Figura 10 apresenta o layout original dessa linha de produção da indústria e, a Figura 11 apresenta as adaptações necessárias nesse sistema para a instalação do secador por microondas.

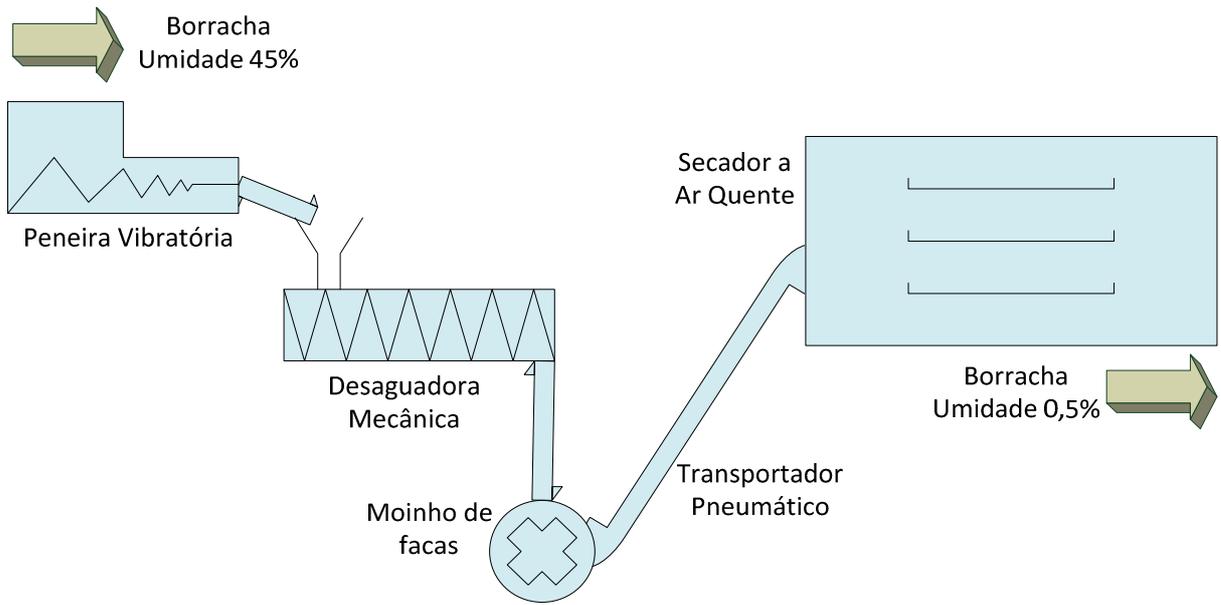


Figura 10 – *Layout* mecânico simplificado da etapa de secagem de SBR
 Fonte: Autor, 2012.

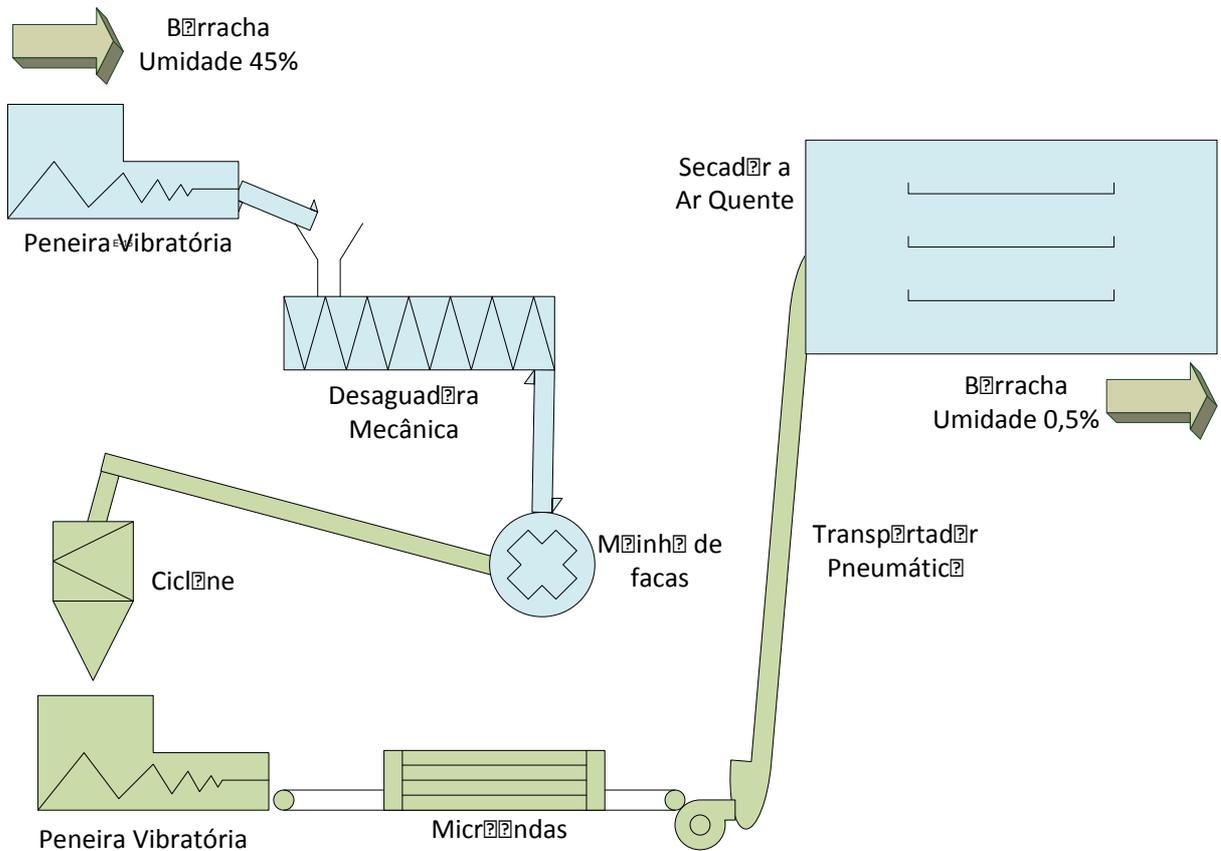


Figura 11 – *Layout* de Secagem com desvio adaptado para secador por Microondas
 Fonte: Autor, 2012.

Como pode ser observado na Figura 11, outros equipamentos mecânicos foram necessários para a conexão do sistema experimental ao processo produtivo da empresa: peneira vibratória, válvula rotativa, ciclone, transportador pneumático e unidade de aquecimento de ar.

4.4 Determinação da eficiência de secagem da borracha sintética em resposta ao estímulo de microondas em escala industrial

Com o conhecimento obtido na fase exploratória, pôde-se delimitar as variáveis a serem consideradas e fazer o planejamento dos experimentos a serem conduzidos diretamente na linha de secagem da empresa. A realização dos testes em linha com um equipamento de microondas industrial foi realizado entre os dias 5 e 7 de julho de 2011, durante uma segunda parada programada da linha “B” de secagem da empresa. No monitoramento do sistema de secagem por microondas foram consideradas as variáveis operacionais apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 – Variáveis do experimento em linha

Variável	Intervalo	Método de determinação
Vazão de borracha	1000 kg/h a 1500 kg/h	Determinado pelo sistema de controle da linha de produção. Trata-se de um valor estimado de borracha seca, calculado a partir da vazão de látex da coagulação e do total de sólidos presentes nessa emulsão.
Velocidade da esteira do aplicador	15 Hz a 55 Hz	Medida indireta, expressa em Hz, referindo-se à leitura do <i>setpoint</i> do painel inversor utilizado para controlar a velocidade da esteira.
Umidade inicial da borracha	-	ASTM D5668-09, Método A (item 4.1.1).
Potência total	30 kW a 100 kW	Sensores de radiação eletromagnética instalados ao longo do guia de ondas (item 4.4.1).
Tamanho da partícula de	8 mm e 24 mm	Referente ao tamanho médio das partículas de borracha após passarem pelo moinho de facas.

borracha		Definido a partir da configuração mecânica de operação do equipamento.
Presença de sais	0 a 1	Indicação se há ou não a adição de $MgSO_4$ no vaso de coagulação.
Umidade final da borracha	Variável dependente	ASTM D5668-09, Método A (item 4.1.1).
Potências refletida e absorvidas	Variáveis dependentes	Sensores de radiação eletromagnética instalados ao longo do guia de ondas (item 4.4.1).
Eficiência energética	Variável dependente	Razão entre a potência absorvida pela borracha (PAR) e a potência total aplicada (PT).

Fonte: Autor, 2012.

4.4.1 Potência de microondas

O sistema industrial de aquecimento por microondas utilizado nos experimentos possui diversos sensores de radiação eletromagnética instalados ao longo do guia de ondas, conforme indicado na Figura 12. Com isso, o próprio controlador do equipamento monitora e registra, em intervalos de um segundo, os fluxos e direções de potência presentes no circuito.

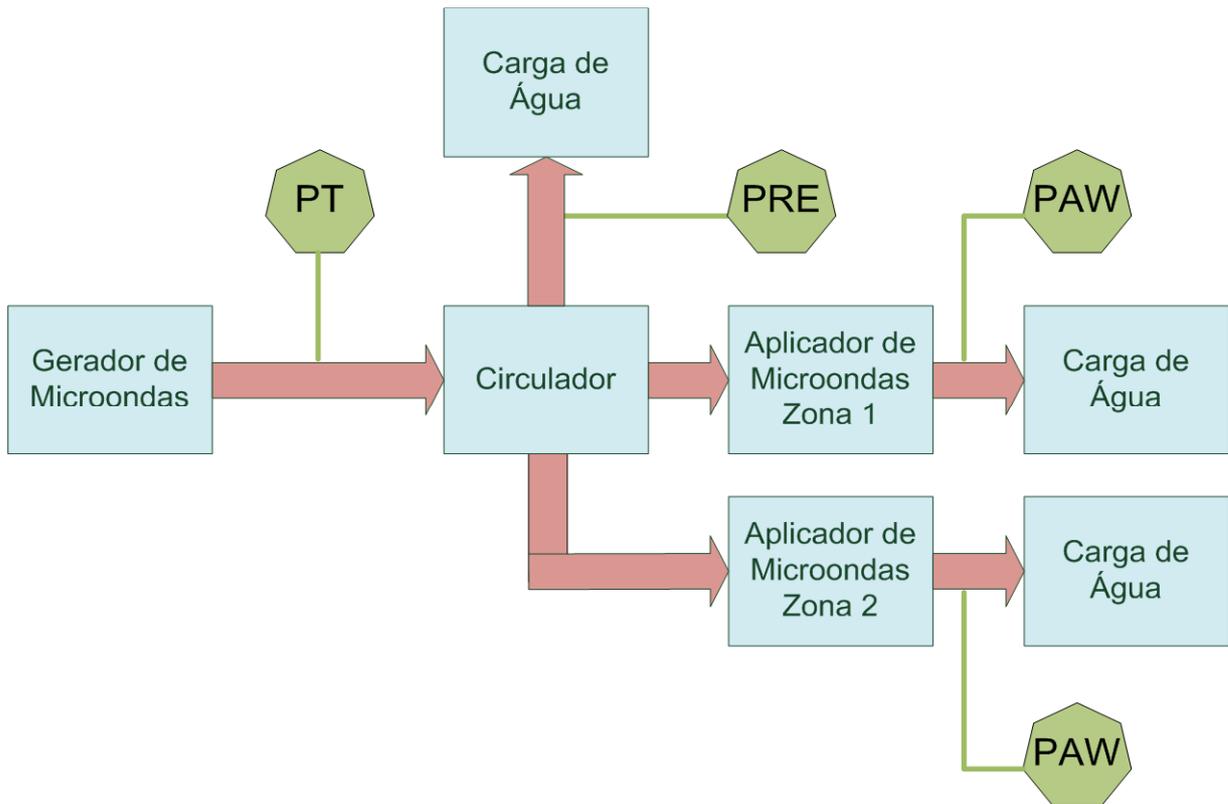


Figura 12 – Pontos de medição de potência
Fonte: Autor, 2012.

Em função disso, é possível conhecer, a partir de leitura direta, a potência total aplicada (PT), a potência refletida (PRE) e as potências não absorvidas pela borracha e dissipadas nas cargas de água (PAW). Conhecendo-se esses valores, pôde-se determinar a potência absorvida pelas cargas de água (eq. 2) e a potência absorvida pela borracha (eq. 3).

$$PAW = PAW_1 + PAW_2 \quad (2)$$

$$PAR = PT - PRE - PAW \quad (3)$$

Por se tratarem de valores bastante dinâmicos, os dados de potência foram obtidos a partir dos registros armazenados na memória do controlador referentes aos últimos três minutos anteriores e três minutos posteriores à coleta de cada amostra. Para fins de registro experimental, foi considerado o valor médio desse período de seis minutos.

4.5 Interpretação de resultados

Para a interpretação dos resultados, além da estatística descritiva para a tabulação dos dados e sua ilustração gráfica, foi utilizada a Análise do Componente Principal (PCA) para análise exploratória dos dados, utilizando o software Solo, versão 6.5.1, da Eigenvector Research Inc.

O objetivo principal do método multivariado é reduzir a dimensão do conjunto de variáveis a partir da obtenção de um pequeno número de combinações lineares das mesmas e que, ao mesmo tempo, preserve o máximo de informação contida nesse conjunto (BARROS NETO et al., 2006). O conjunto de dados foi centrado na média e, posteriormente, auto-escalado. O pré-processamento de centralizar os valores na média teve por objetivo remover o *offset* presente em algumas variáveis. Já o auto-escalamento visou à equalização de grandezas entre as variáveis, evitando-se, assim, que variáveis com valores numéricos maiores recebessem indevidamente um peso maior.

5 RESULTADOS

Os resultados apresentados neste capítulo estão divididos em 4 tópicos principais, sendo o primeiro focado no histórico desta pesquisa, descrevendo os principais problemas que tiveram de ser contornados ao longo deste estudo. Os demais tópicos correspondem a cada uma das macro-etapas da pesquisa proposta.

5.1 Histórico do experimento em linha

Apesar de ser uma ferramenta extremamente útil para a obtenção de dados representativos, nem sempre a realização de experimentos em ambientes não laboratoriais é uma tarefa fácil. Em se tratando, especificamente, de um ambiente industrial essas dificuldades podem ser fatores limitantes para a pesquisa, porém trazem a tona uma série de questões práticas muitas vezes ignoradas no ambiente controlado de laboratório. Dado a riqueza de detalhes e fatores envolvidos com esse tipo nada trivial de experimentação em campo, entende-se ser pertinente um subcapítulo exclusivo para a abordagem do histórico desse experimento em linha.

Por se tratar de uma indústria em regime produtivo de 24 h por dia, 7 dias por semana, a parada de uma linha de produção, por si só, não é algo simples. Para tanto, após complexa negociação com a gerência de produção, foram obtidos dois intervalos distintos de parada da linha de produção “B” para a condução do experimento. O primeiro deles foi dedicado à instalação e teste dos equipamentos necessários ao ensaio e, o segundo, foi reservado para a operação e coleta dos dados experimentais. Entre o primeiro e segundo intervalo, os equipamentos tiveram que ser removidos para não prejudicar a operação diária da linha produtiva.

Durante a fase experimental em campo, deparou-se com uma série de dificuldades práticas que acabaram impactando na condução dos ensaios. Levando-se em conta o cenário experimental, com uma janela temporal fixa e bastante limitada, diversos foram os fatores que consumiram o tempo destinado à execução dos ensaios. A própria realização do experimento em si chegou a ser ameaçada, em função do atraso de liberação do equipamento de microondas junto à Receita Federal brasileira. Embora tenha desembarcado na segunda quinzena de dezembro

de 2010 ao porto de Rio Grande, o container com os equipamentos ficou retido na alfândega até início de abril de 2011.

Os inúmeros percalços técnicos durante a posta em marcha e operação do sistema também foram fatores agravantes em termos de tempo. As diversas quebras das partes mecânicas e os entupimentos que se seguiam acabaram consumindo o tempo destinado ao ensaio. Como nem sempre a peneira conseguia espalhar os grumos de borracha de maneira uniforme, diversas vezes ocorria a formação de camadas com desnível central ultrapassando o tamanho limite de 3 in, fazendo com que a câmara do aplicador ficasse obstruída. E, a cada entupimento, seguia-se um trabalhoso procedimento de limpeza e desobstrução, sendo necessária a abertura de todas as tampas laterais do aplicador. Nos primeiros eventos, chegou-se a demorar 4 h para se conseguir colocar o equipamento novamente em condições de operação.

É importante lembrar, também, que a realização dos experimentos com a fábrica em operação foi outro grande desafio. Enquanto uma linha de produção estava reservada para a condução dos ensaios, a outra linha deveria permanecer em operação normal. Ao se lidar com equipamentos experimentais que, ao instalados, mediam aproximadamente 20 m de comprimento e 4 m de largura, tornava-se árdua a tarefa de impactar o menos possível no processo normal. Além disso, o fator de cansaço físico também deve ser considerado. Em vias de se aproveitar ao máximo a disponibilidade da linha de produção, os experimentos eram conduzidos durante 18h por dia.

O comportamento dinâmico do processo de fabricação e secagem de borracha foi outro fator de impacto no experimento. Cada alteração de parâmetro nas variáveis manipuladas era seguida, muitas vezes, de um longo tempo de estabilização do processo a essas novas condições. Some-se a isso, os cerca de 10 minutos necessários para a determinação do teor de umidade em cada amostra de borracha.

Enfrentou-se problemas, também, na execução dos experimentos em função das restrições técnicas que foram sendo descobertas ao longo dos ensaios. A amplitude de variação da vazão de borracha acabou sendo limitada superiormente pela máxima capacidade mecânica do sistema de microondas, definida pela velocidade máxima da esteira e pelas dimensões físicas do aplicador. A vazão mínima de operação acabou sendo limitada pela vazão inferior de trabalho,

mantendo-se a estabilidade do sistema de controle da linha de produção de borracha.

A baixa eficiência do sistema de aquecimento do ar de exaustão foi outra restrição técnica que limitou a fase experimental. Em função das perdas térmicas identificadas nesse sistema, acabou-se encontrando dificuldades em se manipular as variáveis associadas à evaporação superficial. Por fim, os parâmetros temperatura e velocidade do ar de exaustão, temperatura de entrada e saída da borracha acabaram negligenciados durante esses experimentos.

Foram encontrados problemas, ainda, em se obter as máximas potências disponíveis no gerador. Restrições técnicas do sistema elétrico, como queda de tensão, acabaram impedindo a geração e aplicação dos 100 kW de potência sobre a carga de borracha.

Pode-se dizer, sem dúvida, que uma das maiores dificuldades encontradas durante a fase experimental foi a necessidade de apoio manual para a correta disposição dos grumos de borracha sobre a esteira do aplicador de “onda viajante”. Muito embora houvesse mão-de-obra disponível, a natureza da função tornava complexa a operação contínua por longos intervalos, uma vez que o cansaço inerente à atividade acabava prejudicando a atenção desses ajudantes. E, com a atenção comprometida, desníveis demasiados acabavam se formando sobre a esteira, ocasionando a obstrução mecânica do aplicador.

5.2 Resultados dos ensaios em laboratório

A primeira etapa deste estudo constituiu-se em ensaios laboratoriais para a verificação do comportamento da borracha sintética SBR quanto submetida ao processo de secagem através de radiação de microondas. A Tabela 3 e a Tabela 4 apresentam os resultados dos ensaios laboratoriais para amostras coletadas antes e após a desaguadora mecânica, respectivamente.

Tabela 3 – Resultados laboratoriais de amostras coletadas antes da desaguadora

Amostra	Tempo de Exposição (min)	Massa Amostra (g)	Temperatura Final (°C)	Umidade Final - Média (% - Base seca) (min – max)	Redução Umidade (%)
1	0	256	50	42,77 (42,67 – 42,87)	-
2	4	189	56	26,25 (26,20 – 26,31)	38,63
3	8	160	80	15,57 (15,51 – 15,64)	63,60
4	12	152	80	4,52 (4,50 – 4,54)	89,43
5	16	151	70	0,92 (0,85 – 1,04)	97,85
6	21	148	100	1,59 (0,80 – 1,60)	96,28

Fonte: Autor, 2012.

Tabela 4 – Resultados laboratoriais de amostras coletadas após a desaguadora

Amostra	Tempo de Exposição (min)	Massa Amostra (g)	Temperatura Final (°C)	Umidade Final - Média (% - Base seca) (min – max)	Redução Umidade (%)
1	0	263	45	14,00 (13,90 – 14,10)	-
2	1	259	52	12,74 (12,71 – 12,77)	9,00
3	2	255	56	10,93 (10,90 – 10,96)	21,93
4	3	252	58	9,71 (9,66 – 9,76)	30,64
5	4	249	55	8,72 (8,70 – 8,74)	37,71
6	5	246	56	7,59 (7,57 – 7,61)	45,79
7	6	244	60	6,74 (6,71 – 6,77)	51,86
8	7	242	60	5,88 (5,86 – 5,90)	58,00
9	8	241	60	5,26 (5,21 – 5,31)	62,43
10	9	239	68	4,64 (4,62 – 4,66)	66,86
11	10	237	70	3,93 (3,92 – 3,94)	71,93
12	11	236	73	3,56 (3,53 – 3,59)	74,57
13	12	235	72	3,03 (3,01 – 3,05)	78,36
14	13	234	78	2,70 (2,70 – 2,70)	80,71
15	14	234	70	2,60 (2,59 – 2,61)	81,43

Fonte: Autor, 2012.

As amostras coletadas no ponto de entrada da desaguadora foram submetidas à radiação durante períodos de 0 a 21 minutos, com intervalo incremental de 4 minutos. Já para as 15 amostras coletadas no ponto de descarga da desaguadora, o tempo máximo foi de 14 minutos, com intervalo incremental de um minuto.

Observa-se que a umidade inicial das amostras coletadas antes da desaguadora mecânica apresentam valores de ordem de 43%. Já a umidade das amostras coletadas no ponto de descarga situa-se em 14%. As curvas de secagem

referentes às amostras coletadas após e antes da desaguadora estão apresentadas, respectivamente, na Figura 13 e na Figura 14.

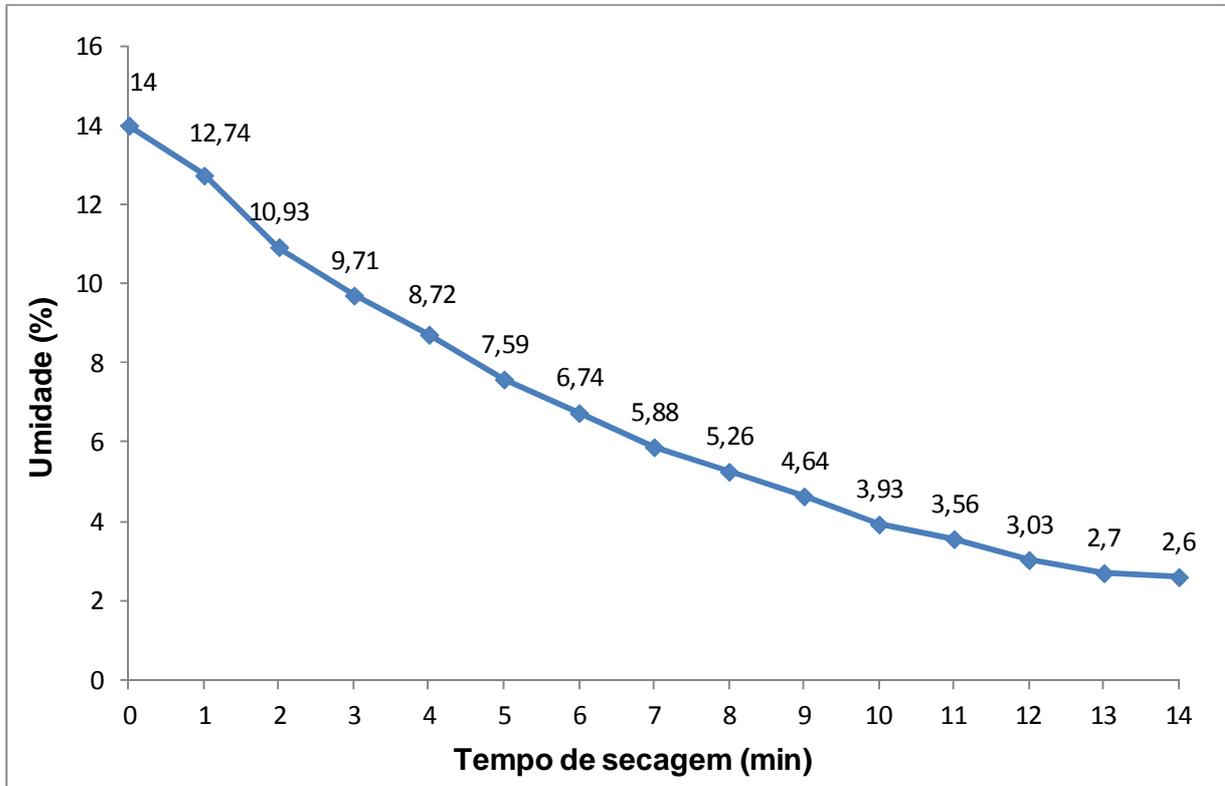


Figura 13 – Curva de secagem SBR em microondas de amostras coletadas após a desaguadora
Fonte: Autor, 2012.

Ao analisar-se a curva de secagem, observa-se que a SBR, quando submetida à radiação de microondas, apresenta um decaimento exponencial do seu teor de umidade. Essa característica fica mais acentuada ao analisar-se a Figura 14, que ilustra o comportamento de secagem de amostras coletadas antes da desaguadora mecânica. Para esse caso, obteve-se uma redução de umidade de aproximadamente 97%, reduzindo-se de 43% na primeira amostra para 1,59% na última.

Já no caso das amostras coletadas no ponto de descarga da desaguadora, essa redução foi da ordem de 81%, havendo a diminuição de 14% para aproximadamente 2,6% na amostra de número 15.

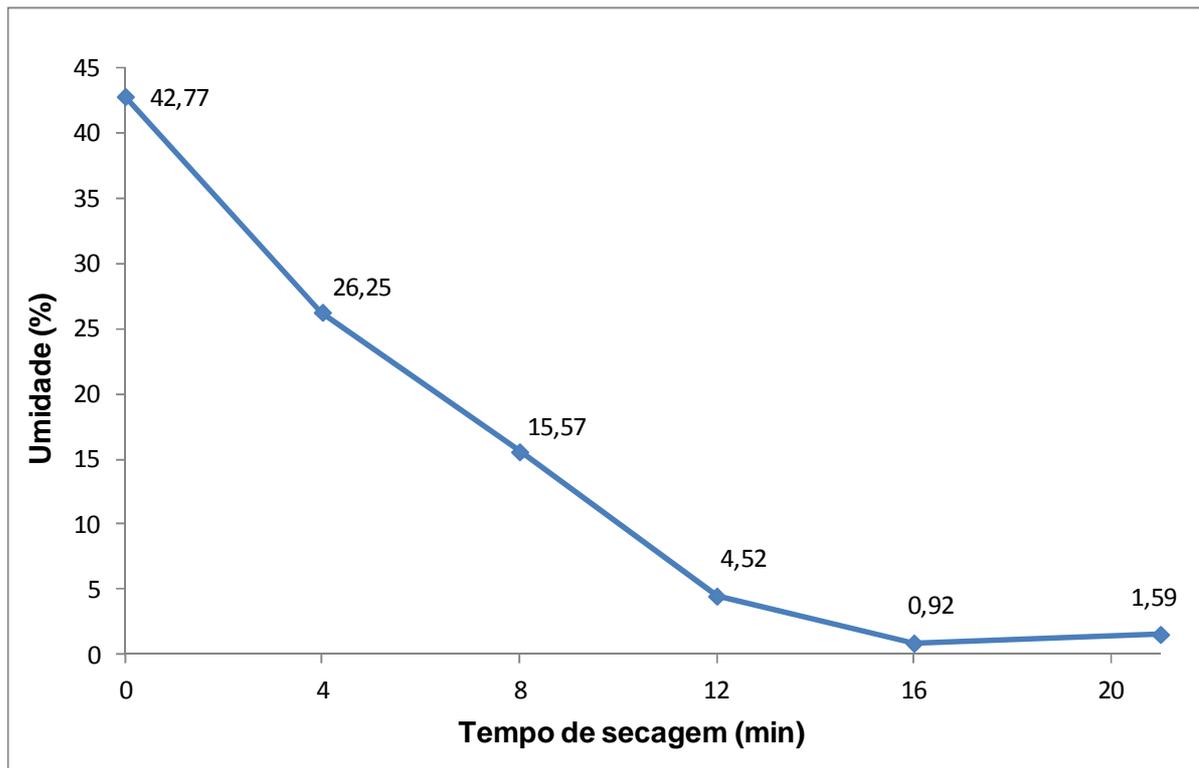


Figura 14 – Curva de secagem SBR em microondas de amostras coletadas antes da desaguadora
Fonte: Autor, 2012.

Na Figura 14, pode-se observar, também, que tempos superiores a 16 minutos de exposição à radiação de microondas praticamente não refletem alterações no teor de umidade da borracha. A pequena diferença entre o teor de umidade apresentado após 16 minutos e após 21 minutos deve-se, provavelmente, ao erro experimental. Essa diferença tanto pode ser oriunda de erro no teste de determinação de umidade quanto pode ser resultado da condensação do vapor presente no forno sobre as amostras de borracha.

Ao se tentar submeter à radiação de microondas amostras com teor de umidade de aproximadamente 1% enfrentou-se problemas com o forno de microondas. Conforme Schiffmann (2006) é justamente nessa faixa que se situa o valor de teor de umidade crítica, com relação à constante dielétrica, para materiais não-higroscópicos, como a borracha sintética. Nessas condições de baixa absorção de energia pela carga de trabalho, o equipamento sobreaqueceu e entrou em *shut-down*, impedindo novas tentativas por cerca de uma hora.

Todas as amostras de borracha utilizadas para os ensaios em laboratório foram analisadas para garantir que a utilização de microondas para secagem não resultaria em alguma alteração das características do produto final. Na

Tabela 5 são apresentados os resultados individuais dos ensaios de viscosidade Mooney e características reométricas das 21 amostras utilizadas neste estudo.

Tabela 5 – Resultados dos ensaios dos parâmetros físico-químicos

Amostra	Tempo de Exposição MW (min)	Viscosidade Mooney	Parâmetros Reométricos					Atende Especificação
			M _L (dNm)	M _H (dNm)	ts1 (min)	tc50 (min)	tc90 (min)	
1	0	53	2,63	18,1	1,7	7	17,5	Sim
2	4	53	2,62	18,1	1,6	7,1	17,5	Sim
3	8	53	2,64	18,1	1,7	7,1	17,5	Sim
4	12	53	2,66	18,5	1,7	7,1	17,7	Sim
5	16	53	2,59	18,1	1,6	7,1	17,5	Sim
6	21	53	2,69	18,1	1,6	7,1	17,5	Sim
7	0	53	2,68	18,1	1,8	7,2	17,5	Sim
8	1	53	2,66	18	1,7	7,1	17,2	Sim
9	2	53	2,66	18,1	1,7	7,1	17,5	Sim
10	3	53	2,63	18,1	1,7	7,2	17,5	Sim
11	4	53	2,70	18,1	1,7	7,1	17,5	Sim
12	5	53	2,59	18,1	1,6	7,1	17,5	Sim
13	6	53	2,71	18,1	1,7	7,1	17,5	Sim
14	7	53	2,66	18,2	1,7	7	17,5	Sim
15	8	53	2,69	18,1	1,7	7,1	17,5	Sim
16	9	53	2,61	18,3	1,8	7,1	17,5	Sim
17	10	53	2,59	18,1	1,7	7,1	17,5	Sim
18	11	53	2,68	18,2	1,7	7,2	17,5	Sim
19	12	53	2,59	18,1	1,8	7,1	17,5	Sim
20	13	53	2,69	18,3	1,7	7,1	17,5	Sim
21	14	53	2,59	18,1	1,7	7,1	17,5	Sim
Especificação	-	53	2,60	18,1	1,7	7,1	17,5	-

Fonte: Autor, 2012.

Na tabela, observa-se que a viscosidade Mooney de todas as amostras ficou em 53, em total conformidade com a especificação, indicando não ter havido alteração nessa propriedade em função da radiação por microondas. Demais características da borracha, puderam ser avaliadas a partir da evolução da vulcanização, analisada através da curva reométrica obtida com um reômetro de disco rotativo.

Nota-se que os parâmetros de torque mínimo (M_L) e torque máximo (M_H), mantêm-se bem próximos dos valores de referência, 2,6 e 18,1, respectivamente. O intervalo de variação foi de 3,85% para o M_L e 2,21% para o M_H, dentro dos limites de 5% normais e aceitáveis para o produto. O parâmetro ts1 indica o tempo limite

para o início da formação de ligações cruzadas, sendo considerado o parâmetro de segurança de processo. Já t_{c50} e t_{c90} indicam, respectivamente, o tempo necessário para a ocorrência de 50% e 90% da vulcanização. Tanto o parâmetro de segurança quanto os de tempo de vulcanização também estão dentro dos 5% de tolerância. A análise laboratorial, portanto, indicou que essas amostras de polímero de SBR não sofreram alterações em suas principais propriedades físico-químicas, mantendo-se dentro das especificações técnicas.

5.3 Resultados dos ensaios em linha

Após ter-se obtido sucesso nas etapas em laboratório com o forno de microondas, foi iniciada a etapa de campo deste estudo, composta das etapas exploratória e experimental.

5.3.1 Instalação do equipamento de secagem industrial por microondas

Para a efetiva realização dos testes, o equipamento de microondas foi instalado junto à linha de produção. Entretanto, conforme já discutido anteriormente, alguns equipamentos adicionais foram necessários para permitir a correta interligação entre o sistema de secagem por microondas e a linha de produção de borracha.

Com exceção do equipamento de microondas, importado dos Estados Unidos, os demais equipamentos mecânicos utilizados para essa conexão com a linha de produção foram especialmente adaptados e/ou fabricados para o teste, tais como a peneira vibratória e o transportador pneumático. Em função do limitado espaço físico junto à área produtiva e das dimensões consideráveis dos equipamentos envolvidos, não houve a possibilidade de instalação desses equipamentos durante o regime normal de operação da linha de produção. Utilizando-se guindastes e duas equipes de oito pessoas, toda a instalação e interconexão puderam ser concluídas em 8 h de trabalho a partir da parada e liberação da linha de produção.

Por questões de espaço físico e fluxo de produção, o equipamento de microondas foi instalado antes do secador a ar quente, fazendo com que a borracha,

ao sair do moinho de facas, passasse primeiramente no secador por microondas. Para tanto, conforme já mencionado na metodologia, algumas modificações foram necessárias, em termos de layout e equipamentos, para que se conseguisse fazer essa adaptação na linha de produção.

Para permitir que a borracha oriunda da linha de produção passasse pelo secador por microondas foi necessário projetar um equipamento que espalhasse a borracha, a partir de um transportador pneumático tubular, sobre uma esteira plástica.

Dessa forma, o fluxo de saída do moinho de facas foi direcionado para um ciclone, cuja função foi de receber a borracha e fazer a separação entre o material sólido, que cai por gravidade, e o ar, que é direcionado para a exaustão. Do ciclone, a borracha foi depositada sobre uma peneira vibratória, de largura compatível com o secador por microondas.

A peneira vibratória, semelhante àquela usada para retirar a água no início do processo, foi instalada de maneira inclinada ao plano horizontal, formando um ângulo de cerca de 10° em sua parte posterior. Isso acabou provocando um espalhamento uniforme dos grumos sobre a mesma, induzindo a formação de uma camada de borracha. Uma calha foi utilizada para fazer a transposição da camada de borracha da peneira até a esteira de entrada do secador por microondas, que estava localizado em um nível mais baixo. Além disso, um limitador mecânico foi instalado junto a essa calha, em vias de se garantir a altura máxima da camada de borracha em 7,5 cm (3 in).

Após passar pelos aplicadores de microondas, a borracha da esteira era despejada na caçamba de coleta de outro transportador pneumático. Esse último transportador tinha a função de conduzir a borracha para o secador a ar quente, fazendo com que a mesma voltasse ao fluxo normal da linha de produção. O *layout* dessa aplicação já está demonstrado na Figura 11.

Esses novos equipamentos foram instalados perpendicularmente à linha de produção, em espaço existente entre o moinho de facas e o início do secador a ar quente. Tanto a peneira vibratória quanto o ciclone se tratavam de equipamentos existentes em depósito e foram adaptados para essa aplicação. Foi necessária a fabricação especial, entretanto, dos dois dutos de transporte pneumático, um utilizado para fazer o desvio da borracha até o ciclone e, o outro, utilizado para

conduzir os grumos de borracha de volta ao fluxo normal de processo. O *layout* detalhado em corte, contendo as dimensões aproximadas e a disposição física dos equipamentos pode ser conferido no anexo A deste trabalho.

Em vias de se otimizar o processo de secagem por microondas, um sistema de exaustão de ar também foi implementado. Para tanto, foi utilizado um aquecedor industrial elétrico para ar, composto também por ventiladores de admissão e exaustão. Esse sistema foi conectado às extremidades de exaustão do aplicador através de dutos circulares flexíveis, com 12 in de diâmetro e resistentes a até 120°C de temperatura. Além disso, foi instalado um circuito de água para a refrigeração dos equipamentos. Na Figura 15 é apresentada uma imagem, com vista parcial, dos equipamentos instalados para a realização do experimento.



Figura 15 – Vista parcial dos equipamentos para o experimento
Fonte: Autor, 2012.

Em primeiro plano, observa-se a esteira plástica. O tubo metálico cortando a figura ao centro trata-se do guia de ondas. É possível identificar, ainda, os dutos circulares utilizados para o circuito de exaustão de ar e as mangueiras plásticas do circuito de água de refrigeração. Já na Figura 16 é apresentada uma vista superior da instalação, sendo possível, ao fundo, identificar-se a peneira vibratória.



Figura 16 – Vista superior do conjunto de equipamentos para o experimento em linha
Fonte: Autor, 2012.

5.3.2 Operação do sistema industrial de secagem por microondas

Por se tratar de um equipamento de tecnologia não usual ao meio industrial, houve inicialmente uma preocupação quanto à operação e manuseio do secador por microondas. Em função disso, técnicos da empresa fabricante da máquina foram enviados para acompanhar e supervisionar os testes, especificamente com relação à operação do equipamento.

Uma vez instalados, todos os equipamentos envolvidos no experimento em campo puderam ser testados e postos em operação. O aplicador de microondas

demonstrou ser extremamente sensível a variações de altura na camada de borracha, em função de possuir uma abertura de apenas 7,5 cm.

A única maneira estável de se operar o conjunto como um todo foi com a colaboração de dois auxiliares, posicionados ao lado da esteira, que controlaram, a partir de um nivelador manual, a altura máxima para a camada de borracha. Apesar de permitir uma operação contínua, esse procedimento não ficou livre de falhas e erros. Duas equipes tiveram que ser selecionadas para, em revezamento, ficar espalhando manualmente os grumos de borracha, ininterruptamente, durante a condução dos testes. Na Figura 17 é possível visualizar esse dispositivo espalhador de borracha, bem como, a posição de trabalho do ajudante. Já na Figura 18, pode ser observada, na saída do aplicador de microondas, a aparência da camada de borracha formada sobre a esteira. Demais imagens da instalação podem ser conferidas no anexo B deste documento.



Figura 17 – Detalhe do dispositivo para espalhar a borracha
Fonte: Autor, 2012.



Figura 18 – Camada de borracha na saída do aplicador
Fonte: Autor, 2012.

5.3.3 Avaliação das condições de operação

Durante os testes de operação do sistema de secagem por microondas, diversos fatores e limitações práticas foram observados. Cabe aqui, portanto, algumas considerações acerca dessas observações obtidas durante a primeira etapa em linha, que visava à avaliação do comportamento do processo como um todo.

Conforme Shreve (1980), durante o processo de fabricação a borracha da emulsão é precipitada em forma de grumos a partir da adição de um coagulante. Nas condições normais de processo, a emulsão aquosa onde ocorre essa coagulação da borracha praticamente não possui sais, apresentando a água livre presente na borracha, portanto, baixa constante dielétrica. O impacto prático dessa carga de íons na borracha foi um dos aspectos importantes identificados.

A partir disso, seguindo formulações homologadas pela empresa para o processo, fez-se uma alteração no coagulante, adicionando-se sulfato de magnésio ($MgSO_4$), auxiliar de coagulação, à taxa de 40 kg/h, no vaso de coagulação. Em função do aumento da carga iônica e conseqüente aumento da constante dielétrica da água livre, pôde-se observar uma melhora na absorção pela camada de borracha.

Esse fato pôde ser observado, de forma dinâmica, nos valores de potência absorvida pela borracha em que a presença de sais aumentou em até 57% a absorção média de radiação pela borracha.

Outro aspecto referente à absorção de energia diz respeito à influência da geometria da camada de borracha na reflexão das microondas. Quanto mais densa e mais homogênea a formação da camada, menor a reflexão e, conseqüentemente, maior a absorção de energia pela borracha. Por se tratar de um processo em linha, a formação dessa camada era totalmente dinâmica e não uniforme, produzindo alta variabilidade nos valores de reflexão e absorção. Ao se implantar uma alteração no moinho de facas, obteve-se um grumo de menor tamanho, facilitando a distribuição do mesmo sobre a esteira do aplicador.

Também foram avaliadas condições relacionadas à vazão da linha, que produz cerca de 7200 kg/h de borracha durante operação normal. Para este experimento, observou-se não ser possível operar de forma estável em vazões abaixo de 1000 kg/h, em função da limitação dos equipamentos de processo da linha de produção. Além disto, não foi possível operar o equipamento de microondas em vazão superior a 2000 kg/h, uma vez que dificultava a manutenção de uma camada uniforme de borracha por parte da equipe. Assim, a maior parte dos ensaios foi conduzida com vazão constante de 1500 kg/h de borracha.

Uma deficiência técnica no sistema utilizado para fornecer ar quente ao interior do aplicador de microondas também foi observada. Os dispositivos utilizados apresentavam, como um todo, um isolamento térmico insuficiente. Com isso, a elaboração de diferentes cenários de exaustão de ar não foi factível, impossibilitando, portanto, a observação de eventuais alterações no comportamento da secagem. Optou-se, então, por trabalhar com valores constantes, tanto de temperatura quanto de vazão de ar de exaustão, visando a apenas garantir a remoção do vapor de água do interior do aplicador de microondas.

Levando-se em conta que o principal fator limitante da experimentação e coleta de dados em linha seria o tempo, atenção especial foi dada ao planejamento experimental. Assim, ao se observar que algumas variáveis, por motivos diversos, seriam de difícil controle e manipulação optou-se por desistir de se conduzir cenários experimentais com a variação das mesmas. Para outras variáveis, decidiu-se por limitar o intervalo de variação. Todas as informações operacionais do sistema de

secagem definidas nesta etapa da pesquisa foram incluídas na Tabela 2 na metodologia.

5.3.4 Custos envolvidos no experimento

Para a realização dos experimentos de secagem por microondas em linha, diversos foram os valores financeiros gastos, desde o aluguel do equipamento industrial da IMS, incluindo taxas de importação, até a fabricação e montagem do sistema como um todo, incluindo os demais equipamentos necessários para a conexão do aplicador ao restante da linha de produção. A Tabela 6 apresenta, de forma aproximada, os custos envolvidos nesse experimento em linha.

Tabela 6 – Custos do experimento em linha

Item	Valor
Aluguel do Equipamento de Microondas	R\$ 58.900,00
Fabricação dos equipamentos adicionais, montagem e instalação	R\$ 160.000,00
Serviços de Engenharia	R\$ 10.000,00
Apoio Operacional para execução dos testes em linha	R\$ 10.000,00
Total	R\$ 238.900,00

Fonte: Autor, 2012.

No total apresentado, estão considerados somente àqueles custos decorrentes de desembolso direto. Não estão computados nesses valores, portanto, os custos associados à interrupção da linha de produção em si, bem como, os gastos de insumos decorrentes da produção de borracha fora de especificação durante a condução dos experimentos.

5.4 Eficiência de secagem industrial por microondas

Uma vez obtidas condições estáveis de operação do equipamento de microondas, pôde-se concentrar as atenções à realização dos ensaios de campo. A partir dos experimentos realizados em linha conseguiu-se obter 21 cenários de combinações distintas entre as 5 variáveis independentes, com resultados refletidos sobre as outras 5 variáveis dependentes do estudo em questão. No total, uma matriz de dados 21x10 perfazendo 210 informações a respeito do comportamento dinâmico do sistema foi produzida. Os dados experimentais obtidos estão apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 – Dados experimentais

#	Data	Hora	Variáveis Independentes						Variáveis Dependentes				
			Vazão (kg/h)	Velocidade Esteira (Hz)	Umidade Inicial (%)	Potência Total (kW)	Tamanho Partícula (mm)	Presença Sais (S/N)	Umidade Final (%)	Potência Refletida (kW)	Potência Absorvida Água (kW)	Potência Absorvida Borracha (kW)	Eficiência Energética (%)
1	01/05/2011	15:55:00	1000	20	15,8	52,35	24	0	13,00	3,31	27,17	21,86	41,8%
2	01/05/2011	16:15:00	1000	20	15,04	50,71	24	0	12,37	2,88	26,29	21,55	42,5%
3	01/05/2011	16:55:00	1000	15	15,8	67,57	24	0	12,24	4,11	29,60	33,86	50,1%
4	01/05/2011	17:40:00	1000	15	15,5	46,79	24	0	12,10	2,44	21,40	22,94	49,0%
5	01/05/2011	18:00:00	1000	15	15,5	43,14	24	0	12,24	2,55	22,36	18,24	42,3%
6	05/07/2011	15:20:00	1500	45	12,25	34,18	24	1	11,95	2,67	13,21	18,30	53,5%
7	05/07/2011	15:40:00	1500	45	12,1	66,10	24	1	10,40	3,63	19,65	42,81	64,8%
8	05/07/2011	16:15:00	1500	45	12,1	74,29	24	1	9,85	1,47	20,90	51,92	69,9%
9	05/07/2011	17:40:00	1500	55	16,9	71,90	24	1	15,77	2,26	13,98	55,67	77,4%
10	05/07/2011	20:50:00	1500	38	11,38	61,24	24	1	9,65	2,92	17,96	40,36	65,9%
11	05/07/2011	21:35:00	1500	35	11,38	59,24	24	1	8,83	1,07	16,73	41,44	70,0%
12	06/07/2011	17:30:00	1500	25	9,66	67,88	8	1	8,08	1,50	19,16	47,22	69,6%
13	06/07/2011	17:57:00	1500	25	10,16	81,60	8	1	7,21	1,51	19,03	61,05	74,8%
14	06/07/2011	18:22:00	1500	25	10,16	84,76	8	1	6,83	1,54	19,03	64,19	75,7%
15	06/07/2011	19:12:00	1500	20	10,07	86,40	8	1	6,58	1,65	17,93	66,83	77,3%
16	06/07/2011	20:06:00	1500	24	10,07	87,21	8	1	7,60	1,71	20,69	64,82	74,3%
17	07/07/2011	14:50:00	1500	35	11,27	71,07	8	1	8,61	0,75	18,24	52,08	73,3%
18	07/07/2011	15:00:00	1500	35	11,27	83,07	8	1	8,27	0,81	22,81	59,45	71,6%
19	07/07/2011	16:15:00	1500	35	11,27	81,95	8	1	8,50	1,45	23,36	57,14	69,7%
20	07/07/2011	23:11:00	1500	35	13,4	83,14	8	1	11,13	1,84	19,64	61,67	74,2%
21	07/07/2011	23:32:00	1500	45	13,4	83,02	8	1	11,32	1,43	20,30	61,29	73,8%

Fonte: Autor, 2012.

A partir dos dados constantes na matriz de resultados, a Análise de Componentes Principais (PCA) foi utilizada para o auxílio da interpretação e exploração dos dados, conforme descrito na metodologia. Ao analisar-se a variância acumulada ao longo das componentes principais, pode-se observar que nas duas primeiras componentes – PC1 e PC2 – já estão descritas grande parte das informações experimentais do estudo, totalizando uma variância acumulada de 80,23%. Considerando-se a PC3, essa variância acumulada atinge 90,19%. Em função disso, pode-se fazer a análise do conjunto de dados a partir do estudo de suas primeiras componentes principais, podendo-se desconsiderar, sem prejuízo à avaliação, as informações residuais constantes nas demais PCs.

5.4.1 Análise dos Loadings

Na Figura 19 estão representados os *loadings* do PCA a partir de suas duas primeiras componentes principais, sendo apresentado PC1 (com 60,74% da variância) *versus* PC2 (com 19,49% da variância).

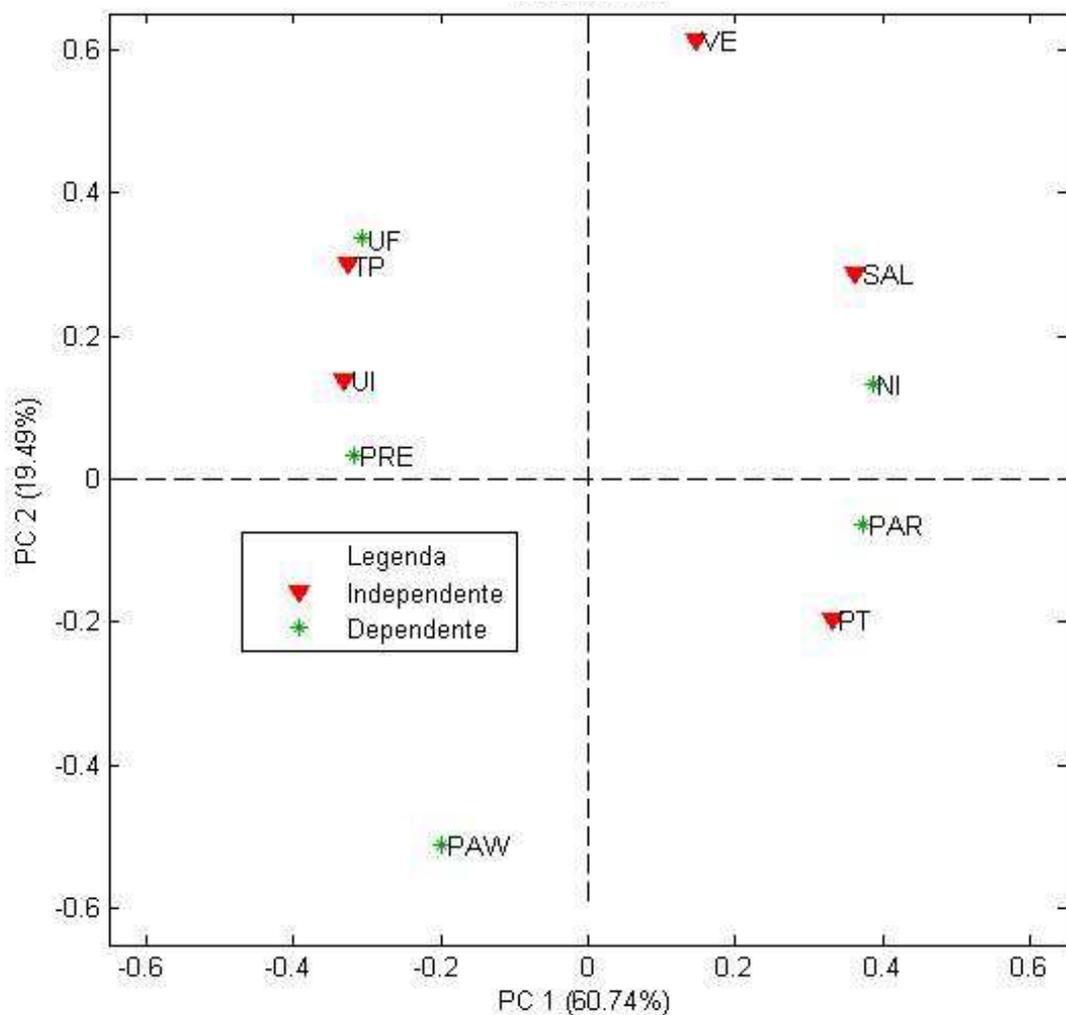


Figura 19 – Gráfico de Loadings PC1xPC2

Onde: NI – Eficiência energética, PAR – Potência absorvida pela borracha, PAW – Potência absorvida pelas cargas de água, PRE – Potência refletida, PT – Potência total, SAL – Presença de $MgSO_4$, TP – Tamanho das partículas, UF – Umidade final, UI – Umidade inicial, VE – Velocidade da esteira

Fonte: Autor, 2012.

No primeiro quadrante, observam-se as variáveis independentes Velocidade da esteira (VE) e Presença de sal (SAL), bem como a variável dependente Eficiência energética (NI). As variáveis independentes Tamanho de Partícula (TP) e Umidade Inicial (UI) aparecem juntamente com as variáveis dependentes Potência Refletida (PRE) e Umidade Final (UF) no segundo quadrante do gráfico.

A variável dependente que descreve a Potência Absorvida pelas cargas de água (PAW) aparece isolada no terceiro quadrante cartesiano. Já na quarta parte do

gráfico, podem ser vistas a variável independente Potência Total (PT) e a variável dependente Potência Absorvida pela Borracha (PAR).

De uma forma geral, dois grupos distintos de variáveis podem ser observados no gráfico, fortemente separados pela primeira componente principal (PC1). Os parâmetros SAL, NI, PAR e PT apresentam uma contribuição positiva para PC1. Por sua vez, as variáveis UI, UF, TP, PRE e PAW contribuem de forma negativa para a composição de PC1.

A segunda componente principal (PC2) também descreve uma segregação das variáveis envolvidas no estudo. Em um grupo tem-se PAW, PAR e PT. No outro grupo identifica-se NI, SAL, VE, PRE, UI, TP e UF. O primeiro conjunto de variáveis contribui de forma negativa com PC2, enquanto que o segundo tem um impacto de valor positivo nessa mesma componente.

Analisando-se PC2, percebe-se que essa componente é fortemente influenciada por duas variáveis em específico, VE e PAW. A primeira de forma positiva e a segunda de forma negativa. É possível observar, ainda, que essas duas variáveis, apesar de apresentarem, relativamente, uma pequena contribuição para PC1, praticamente definem a segregação dada por PC2.

Essas segregações impostas pelas componentes PC1 e PC2 permitem observar, também, o comportamento de certas variáveis em função de sua localização cartesiana. Observa-se, por exemplo, que tanto a variável TP quanto PRE possuem crescimento negativo em PC1. Isso é explicado pelo fato de que, quanto maior as partículas de borracha, maior a dificuldade de obtenção de uma distribuição uniforme de borracha sobre a esteira. Da mesma forma, quanto mais irregular a geometria da camada, maior a reflexão das microondas, impedindo sua absorção efetiva sobre a borracha.

Esse entendimento também é reforçado pelas variáveis PAR e NI, que possuem sentido de crescimento oposto a TP e PRE em PC1. Se há um aumento na potência refletida, conseqüentemente, deve haver uma diminuição na potência útil absorvida pela borracha. E, se mais potência é perdida por reflexão, há uma redução da eficiência energética do sistema.

Além da potência refletida, PAW é outra que contribui de forma negativa, oposta à contribuição NI, para PC1, confirmando mais uma vez a expectativa experimental. Na verdade, a eficiência (NI), conforme corrobora PC1, é impactada positivamente

pela potência absorvida pela borracha (PAR) e negativamente pela potência refletida (PRE) e potência absorvida pelas cargas de água (PAW).

Outra correlação importante apresentada pelo gráfico é justamente a proximidade entre a variável eficiência (NI) e a variável que representa a adição de sais na água de coagulação (SAL). Isso se justifica pelo fato de que a dissolução de íons durante o processo de coagulação provoca um aumento na constante dielétrica da emulsão água/borracha, facilitando a absorção de microondas e aumentando sua eficiência de secagem.

Apesar de estarem em um mesmo quadrante, não se pode associar uma forte correlação direta entre a Velocidade da esteira (VE) e a eficiência energética (NI). Na verdade, VE apresenta uma contribuição positiva muito pequena à PC1, destacando-se, entretanto, sua contribuição para PC2. As posições antagônicas, sobre o eixo da segunda componente, de VE e PAW apresentam certa lógica. Quanto maior a velocidade da esteira, maior a quantidade de borracha úmida entrando no equipamento, facilitando, portanto, a absorção de potência pela borracha e a redução de potência absorvida pelas cargas de água (PAW). E, através desse impacto em PAW, VE acaba se relacionando indiretamente com o aumento de eficiência.

Analisando-se especificamente as variáveis do segundo quadrante, em especial TP e UF, observa-se que nem PC1 nem PC2 foram capazes de separar essas duas variáveis. Em um primeiro momento, isso indicaria uma fortíssima correlação entre essas variáveis. Entretanto, embora alguma correlação fosse esperada, o agrupamento muito grande entre esses dois parâmetros carece de explicação. Nesse caso, vale a pena recorrer à terceira componente principal do conjunto de dados, associando-a às demais componentes.

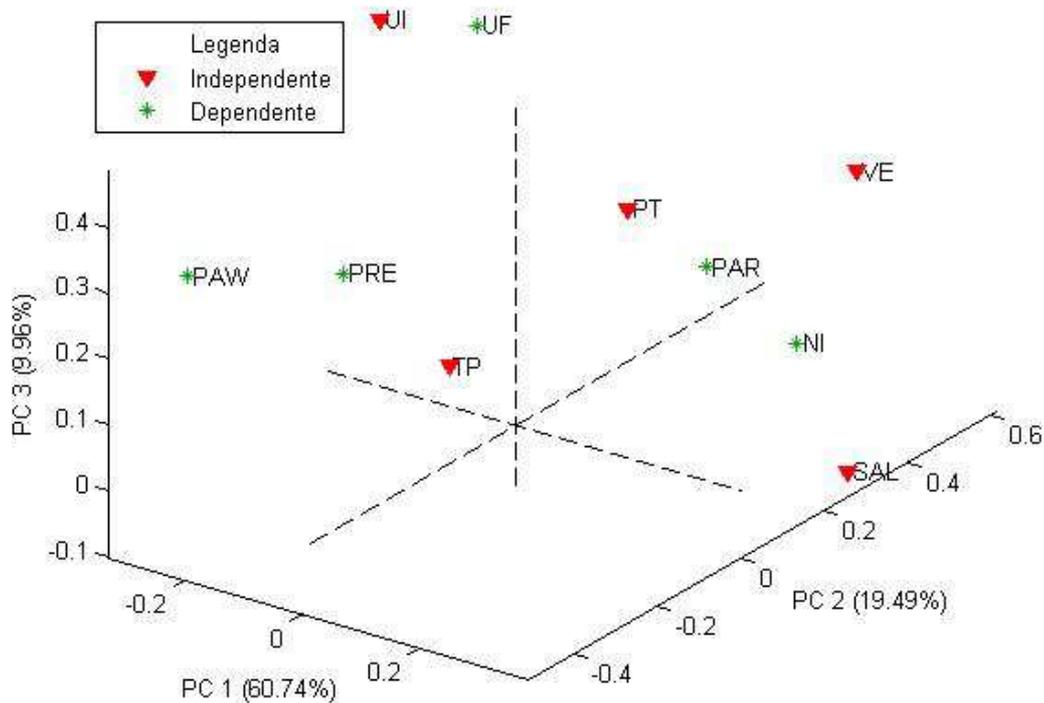


Figura 20 – Gráfico de Loadings PC1xPC2xPC3

Onde: NI – Eficiência energética, PAR – Potência absorvida pela borracha, PAW – Potência absorvida pelas cargas de água, PRE – Potência refletida, PT – Potência total, SAL – Presença de $MgSO_4$, TP – Tamanho das partículas, UF – Umidade final, UI – Umidade inicial, VE – Velocidade da esteira

Fonte: Autor, 2012.

A Figura 20 apresenta os *loadings* das três primeiras componentes principais, PC1, PC2 e PC3, totalizando 90,19% da variância dos dados. Estudando-se o gráfico, observa-se que PC3 promoveu uma separação bem clara entre as variáveis TP e UF, minimizando a possibilidade de agrupamento dessas variáveis. A análise conjunta das três componentes deixa mais evidente a correlação entre a variável independente UI e a variável dependente UF, que apresentam grande contribuição positiva à PC3.

Essa correlação pode ser explicada uma vez que a umidade de saída (UF) vai sempre depender, de uma forma ou de outra, da umidade de entrada (UI). Em um cenário de Potência total aplicada relativamente constante, a eficiência da absorção da energia das microondas é que tende a determinar em quanto a umidade da borracha será reduzida durante esse curto processo.

5.4.2 Análise dos Scores

De forma análoga à análise dos *loadings*, pode-se estudar o comportamento e a correlação entre as amostras estudadas em função de seus parâmetros específicos. Na Figura 21, é apresentado um gráfico do tipo biplot de PC1 *versus* PC2, contendo além dos *loadings*, os *scores* referentes às amostras estudadas. A Figura 22, por sua vez, traz a segregação dos dados a partir de PC1 *versus* PC3.

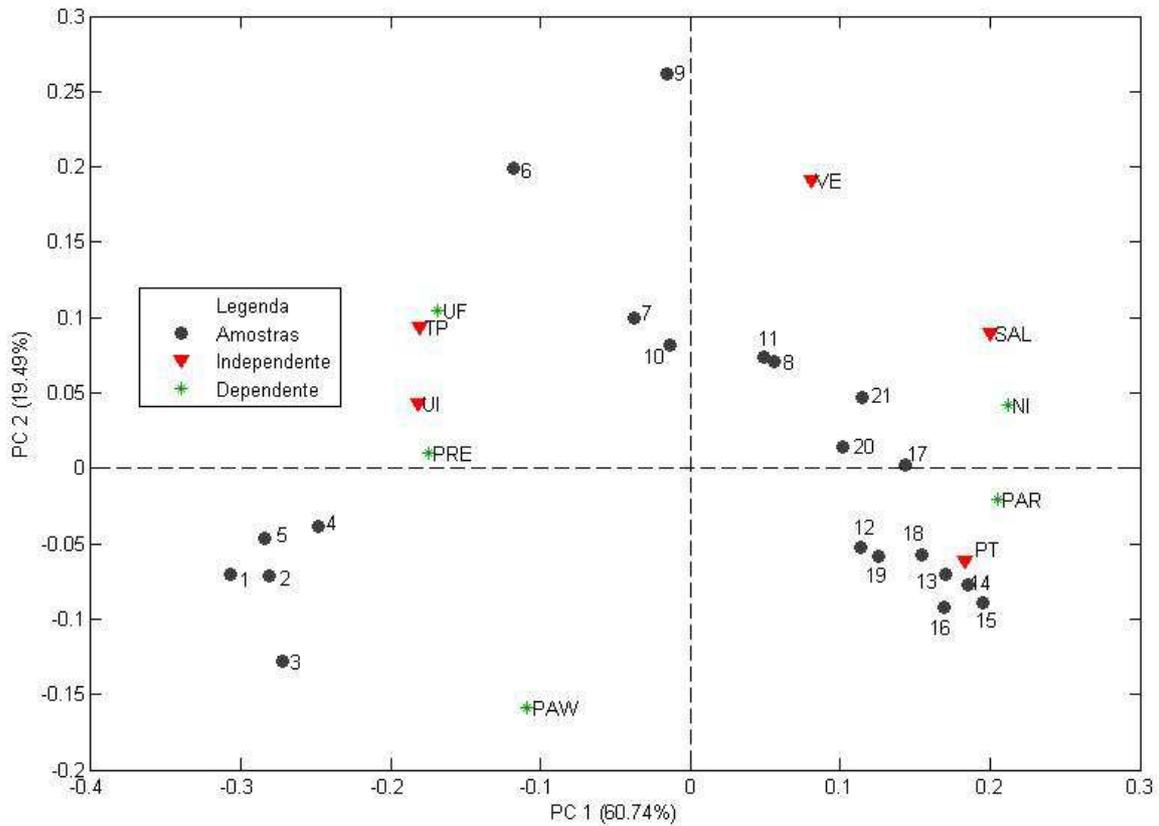


Figura 21 – Gráfico Biplot PC1xPC2

Onde: NI – Eficiência energética, PAR – Potência absorvida pela borracha, PAW – Potência absorvida pelas cargas de água, PRE – Potência refletida, PT – Potência total, SAL – Presença de $MgSO_4$, TP – Tamanho das partículas, UF – Umidade final, UI – Umidade inicial, VE – Velocidade da esteira

Fonte: Autor, 2012.

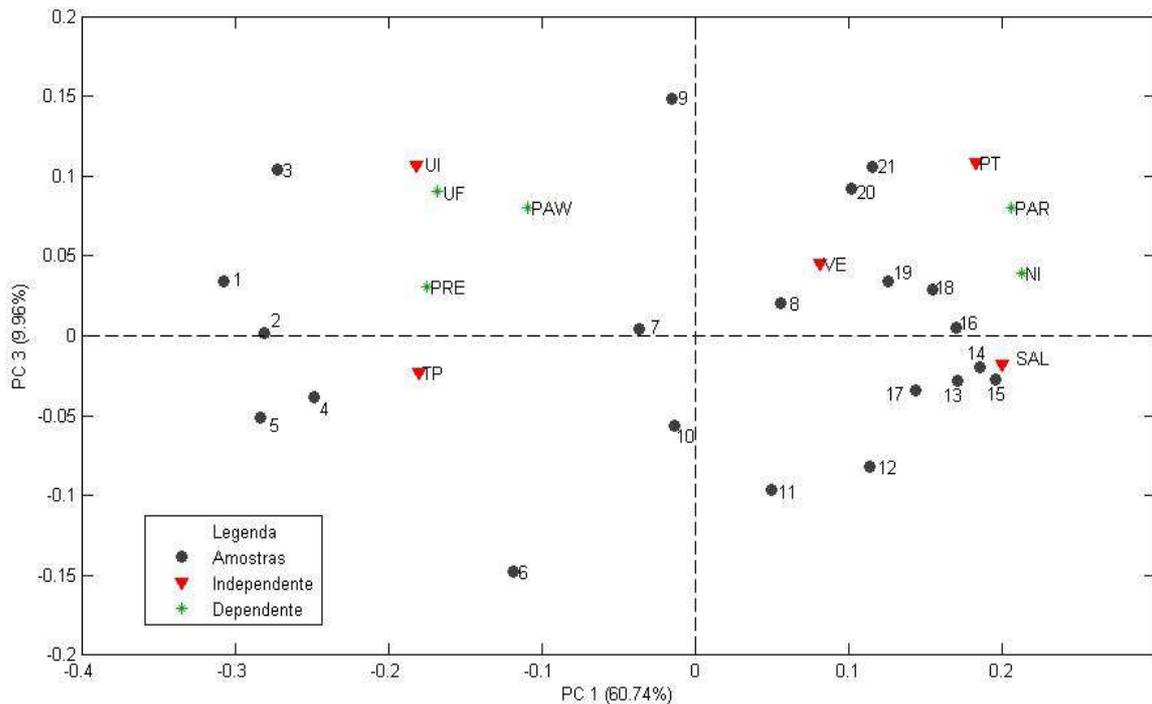


Figura 22 – Gráfico Biplot PC1xPC3

Onde: NI – Eficiência energética, PAR – Potência absorvida pela borracha, PAW – Potência absorvida pelas cargas de água, PRE – Potência refletida, PT – Potência total, SAL – Presença de $MgSO_4$, TP – Tamanho das partículas, UF – Umidade final, UI – Umidade inicial, VE – Velocidade da esteira

Fonte: Autor, 2012.

As amostras 1, 2, 3, 4 e 5 aparecem agrupadas no terceiro quadrante, sob influência do tamanho das partículas e da menor eficiência obtida nesses experimentos. A terceira componente principal segmenta um pouco esse grupo em função das diferenças com relação à umidade inicial da borracha.

Já as amostras 12, 13, 14, 15, 16, 18 e 19 apresentam alta similaridade, sob forte influência da primeira componente principal. Ao se analisar PC3, pode-se observar uma segregação desse conjunto, provavelmente em função da variação da potência total aplicada.

Os experimentos identificados como 9 e 10 aparecem em destaque sobre a segunda e terceira componentes principais. O posicionamento da amostra 9 é altamente influenciada pela velocidade da esteira, tendo sido esse o experimento onde se atingiu o limite da velocidade operacional.

Tanto na Figura 21 quanto na Figura 22 é possível observar que as amostras 20 e 21 são as que mais se aproximam da variável NI, indicando uma maior eficiência obtida nesses dois experimentos. Ambas as amostras apresentaram baixa

potência refletida e baixa potência absorvida pelas cargas de água, evidenciando o aumento de eficiência energética. Essas amostras foram coletadas durante ensaios com vazão de 1500 kg/h de borracha com maior carga iônica, sendo submetidas à potência máxima de radiação de microondas, aproximadamente 83 kW. A velocidade da esteira e o menor tamanho dos grumos, 8 mm, contribuíram para melhorar a distribuição da camada sobre a esteira.

5.5 Análise das condições físico-químicas das amostras

As amostras coletadas durante os experimentos em linha com o equipamento de microondas industrial foram também submetidas a ensaios laboratoriais dos parâmetros de viscosidade Mooney e reometria. Os resultados dos testes foram similares aos resultados dos testes das amostras do experimento em laboratório, não tendo sido possível identificar alterações nos parâmetros de especificação técnica do produto.

Durante alguns dos eventos de obstrução e consequente limpeza do aplicador de microondas, foram encontrados, dentro dos guias de onda, grumos de borracha em visível estado de ciclização, conforme Figura 23. Esse efeito é possível quando o polímero é submetido a temperaturas superiores a 130 °C. Entretanto, no processo de desidratação a partir de microondas, não se espera atingir temperaturas superiores ao ponto de ebulição da água, não havendo condições, portanto, de ocorrência de tal efeito.



Figura 23 – Grumos de borracha ciclizada
Fonte: Autor, 2012.

Porém, com relação específica a esses grumos de borracha, é provável que eles tenham caído da esteira durante a operação do equipamento, acabando por ser submetidos à intensa radiação durante um elevado período de tempo. Cabe lembrar, ainda, que o polímero de SBR contém uma série de resíduos de componentes orgânicos utilizados em sua fabricação. E, justamente esses componentes orgânicos, podem ter sofrido, em função da radiação, um sobreaquecimento além dos 100 °C, provocando o efeito de ciclização nesses grumos de borracha.

6 CONCLUSÃO

A fabricação de borracha sintética envolve uma série de etapas, sendo que ao final das mesmas se dá o processo de secagem onde os grumos do látex coagulado têm seu nível de unidade reduzido consideravelmente. Embora a tecnologia de secagem venha sofrendo diversas transformações com o decorrer do tempo, um dos mais renomados³ pesquisadores na área secagem industrial afirma que o desenvolvimento de sistemas de secagem, antes de se tratar de uma ciência, ainda pode ser considerado uma espécie de “magia negra”. Dessa forma, este estudo, inovador no que se refere a sua escala, pode contribuir para se agregar alguns pontos a mais a favor da ciência em relação à “magia negra”.

A partir dos resultados obtidos pode-se afirmar que o objetivo geral deste estudo, direcionado à avaliação da utilização de sistema de aquecimento por microondas no processo industrial de secagem de borracha sintética SBR em uma linha de produção contínua, foi plenamente alcançado. Essa avaliação se tornou possível a partir do desdobramento, em cinco etapas específicas, do objetivo principal desse trabalho.

O primeiro desses objetivos específicos se propunha a determinar o comportamento de secagem da borracha sintética por microondas em escala laboratorial, o que se mostrou viável. Nos experimentos com um forno de microondas doméstico foi possível a redução de umidade da borracha, obtendo-se um curva de secagem do polímero com característica nitidamente exponencial.

Tão importante quanto a primeira, a segunda etapa foi direcionada à determinação de possíveis modificações das propriedades físico-químicas do produto, quando submetido à radiação de microondas. Eventuais alterações nos parâmetros técnicos de especificação poderiam inviabilizar a utilização dessa tecnologia no processo de secagem. Entretanto, as análises laboratoriais não constataram alterações dessa natureza, indicando a conformidade das amostras quanto à sua especificação técnica.

Uma vez constatada a viabilidade da tecnologia, o próximo passo da pesquisa se constituiu da instalação e operação de um sistema de secagem por microondas em uma linha industrial de produção de borracha sintética. Para tanto, foi necessário

³ Professor Arun Mujumdar, 2011a.

o desenvolvimento e implantação de equipamentos e técnicas especiais para possibilitar a interconexão do sistema produtivo existente ao aplicador de microondas. Apesar dos diversos percalços durante essa etapa, pôde-se concluir com êxito a instalação e identificação de condições estáveis para a operação do equipamento de secagem por microondas. Além disso, por constituir-se também de etapa exploratória, essa fase permitiu a identificação de diferentes fatores operacionais referentes ao estudo, tais como a granulometria da borracha, a presença de íons na emulsão, o impacto da geometria da camada na reflexão das microondas, entre outras.

O objetivo seguinte foi a determinação, em escala industrial, da eficiência de secagem da borracha sintética em resposta ao estímulo de microondas. A experimentação em linha e coleta de dados possibilitou a observação e avaliação do comportamento desse sistema, permitindo a identificação de condições eficientes de secagem. Esses resultados, por fim, conduziram à etapa final do trabalho, constituindo-se como descrição das características técnicas de instalação e operação de sistemas de aquecimento por microondas para a secagem de borracha sintética.

De maneira específica, respondendo ao problema de pesquisa que norteou o presente estudo, pode-se afirmar que foi constatada a possibilidade da utilização de sistemas industriais de aquecimento por microondas no processo de secagem da borracha sintética em uma linha de produção contínua. Deve-se salientar, entretanto, que a efetiva aplicação industrial desses sistemas, ao ramo de fabricação de elastômeros, ainda depende de melhorias mecânicas nos equipamentos envolvidos.

Fica evidente, também, que essa tecnologia de microondas não pode ser utilizada como único método no processo de secagem de SBR, dado a sua limitação de redução de umidade a valores inferiores 1%. Para tanto, os resultados experimentais corroboram a necessidade de uma configuração mista, a partir de um processo de secagem assistido por microondas.

Ao se lidar com processos industriais específicos, geralmente depara-se com restrita bibliografia sobre o tema, em função principalmente da não documentação das implantações e desenvolvimentos e da própria preocupação com a proteção das tecnologias fabris. Essa carência de fontes de referência sobre alguns dos assuntos abordados causou dificuldades no embasamento teórico deste estudo. Para alguns dos tópicos tratados, como por exemplo, o processo de produção de borracha

sintética, foi praticamente impossível conduzir a um referencial onde se pudesse buscar e apresentar conceitos e idéias de diferentes autores, uma vez que todas as fontes de pesquisa existentes remeteram, direta ou indiretamente, a um mesmo autor.

Embora as conclusões a que se tenha chegado não tenham caráter definitivo, um experimento deste porte servirá, sem dúvida, de ponto de partida para que novos estudos tenham continuidade. Deverá contribuir, também, como fonte de referência para outros pesquisadores que pretendam adentrar pelo mesmo tema.

A realização deste estudo constituiu-se em um grande desafio, contribuindo de forma bastante significativa tanto para minha vida acadêmica quanto profissional. O processo durou mais de um ano, desde a preparação de todos os experimentos, passando, entre outros, pela fase exploratória, pela confecção de materiais e procura de equipamento industrial de microondas que pudesse ser adaptado à indústria de elastômeros, até chegar aos testes em linha e análise de resultados.

A empresa onde foram desenvolvidos os estudos teve uma contribuição primordial, sem a qual teria sido impossível a realização dos mesmos. Além de arcar com a totalidade dos custos do processo, por dois momentos diferentes a empresa autorizou a parada, por até sete dias consecutivos, de uma das duas linhas de secagem, para que os experimentos fossem realizados. Sabe-se que a parada de uma linha de produção em uma organização multinacional deste porte incorre em perdas bastante significativas, uma vez que, neste caso, cada uma das linhas produz, por hora, várias dezenas de toneladas de SBR, significando muitos milhares de reais de faturamento.

É importante frisar, ainda, que a empresa também arcou com todas as demais todas as despesas referentes à locação do equipamento industrial de microondas, trazido dos Estados Unidos, das taxas alfandegárias e transporte até a sede da empresa e, ainda, após a conclusão dos experimentos, com os trâmites para o despacho do mesmo de volta ao local de origem. Somem-se a isso, os valores referentes à confecção dos equipamentos necessários para colocar o experimento em linha bem como da mão de obra utilizada, e, ainda, das duas viagens que foram necessárias à Raleigh, nos EUA, local onde se situa a fábrica do equipamento utilizado no experimento.

Um engenheiro americano, da área corporativa de novas tecnologias, esteve presente durante toda a etapa experimental de campo. Após isso, em conjunto com ele, um relatório técnico completo, contendo um relato descritivo da totalidade dos dados e resultados dos experimentos, foi elaborado e apresentado à direção da empresa para posterior avaliação.

6.1 Sugestões para futuros trabalhos

Para a condução de pesquisas dessa natureza e porte, muitas vezes a abrangência do estudo acaba por ser limitada. Além disso, os resultados obtidos permitem, diversas vezes, novos olhares sobre o tema, tornando mais amplo o leque de possibilidades.

Durante o presente estudo, alguns tópicos não puderam ser aprofundados, quer seja por limitação de tempo, quer seja pela abrangência da pesquisa. Entretanto, cabe aqui listá-los, os de maior relevância, para que restem como sugestão de trabalhos futuros para outros pesquisadores.

- Implementação e avaliação da secagem de elastômeros assistida por microondas;
- Determinação do balanço de massa em operações de secagem assistida;
- Estudo do impacto das diferentes formulações químicas da borracha sintética sobre as propriedades de condutividade e absorbância eletromagnética.

REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *ASTM D1646: Standard Test Methods for Rubber Viscosity, Stress Relaxation, and Pre Vulcanization Characteristics (Mooney Viscometer)*. West Conshohocken, EUA, 2007.

_____. *ASTM D3185: Standard Test Methods for Rubber Evaluation of SBR (Styrene Butadiene Rubber) Including Mixtures With Oil*. West Conshohocken, EUA, 2010.

_____. *ASTM D5289: Standard Test Method for Rubber Property Vulcanization Using Rotorless Cure Meters*. West Conshohocken, EUA, 2007.

_____. *ASTM D5668: Standard Test Methods for Rubber From Synthetic Sources – Volatile Matter*. West Conshohocken, EUA, 2009.

ANANTHARAMAN, N., BEGUM, K. M. M. S., *Elements of Mass Transfer – Part I*. Nova Déli: Prentice-Hall of India, 2005.

BAKER, C., *Dryer selection*. In: _____, *Industrial Drying of Foods*. Londres: Chapman & Hall, 1997. p 242-271.

BARLOW, C., JAYASURIYA, S., TAN, C., *The World Rubber Industry*. Londres: Routledge, 1994.

BARROS NETO, B., SCARMINIO, I. S., BRUNS, R. E., *Como fazer experimentos: Pesquisa e desenvolvimento na ciência e na indústria*. 4ª ed. Porto Alegre: Bookman, 2010.

BIRD, J., *Circuitos elétricos: Teoria e tecnologia*. 3ª ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2009.

BLACKADDER, D. A., NEDDERMAN, R. M., *Manual de Operações Unitárias*. Hemus Editora, 2004.

CERVO, A. L., BERVIAN, P. A., SILVA, R., *Metodologia científica*. 6ª ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2007.

COLLINS, J., Hussey, R., *Pesquisa em administração: Um guia prático para alunos de graduação e pós-graduação*. 2ª ed. Porto Alegre: Artmed, 2006.

COPSON, D., *Microwave Heating in Freeze-Drying, Electronic Ovens, and Other Applications*. Westport: Avi Publishing Company, 1962.

COSTA, E., *Secagem Industrial*. São Paulo: Blücher, 2007.

CUNHA, M., CANTO, M., MARSAIOLLI, A., *Secagem de café cereja descascado por ar quente e microondas*. Ciência e Tecnologia de Alimentos, Campinas, v.23, n. 3, p. 381, 2003.

ENCYCLOPAEDIA BRITANNICA ONLINE, *Electron tube*.

Disponível em: < <http://www.britannica.com/EBchecked/topic/183692/electron-tube>>.

Acesso em: 13 jan de 2012.

GUPTA, M., WONG, E., *Microwave and Metals*. Cingapura: Wiley, 2007.

HASHISHO, Z., *Microwave-swing adsorption for the capture and recovery, or destruction for a more sustainable use of organic vapors*. Dissertação de Doutorado (Programa de Doutorado em Engenharia Civil). Universidade de Illinois, 2007.

HEWITT, P., *Física Conceitual*. Porto Alegre: Bookmann, 2002.

KAPPE, C. O., STADLER, A., *Microwaves in Organic and Medicinal Chemistry*. Weinheim: Wiley-VCH, 2005.

KHALID, K., ZAIDAN, B., RAMAHN, K., *Microwave Drying of Hevea Rubber Latex and Total Solid Content (TSC) Determination*. *Pertanika*, Malásia, v. 11, n. 2, p. 289-297, 1988.

KU, H., SIORES, E., TAUBE, A., BALL, J., *Productivity improvement through the use of industrial microwave technologies*, *Journal of Computers and Industrial Engineering*, v. 42, p. 281-291, 2002.

MAKUL, N., RATTANADECHO, P., *Microwave pre-curing of natural rubber-compounding using a rectangular wave guide*. *Journal of International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2010.

MARINOS-KOURIS, D., MAROULIS, Z. B., *Transport Properties in the Drying of Solids* In: MUJUMDAR, A.S., *Handbook of Industrial Drying*. 3ª ed. Cingapura: CRC/Taylor & Francis, 2006. p. 82-114.

MENÉNDEZ, J., ARENILLAS, A., FIDALGO, B., et al, *Microwave heating processes involving carbon materials*, *Journal of Fuel Processing Technology*, 2010.

MEREDITH, R., *Engineers' Handbook of Industrial Microwave Heating*. Londres: The Institution of Electrical Engineers, 1998.

METAXAS, A., MEREDITH, R., *Industrial Microwave Heating*. Londres: Peter Peregrinus, 1993.

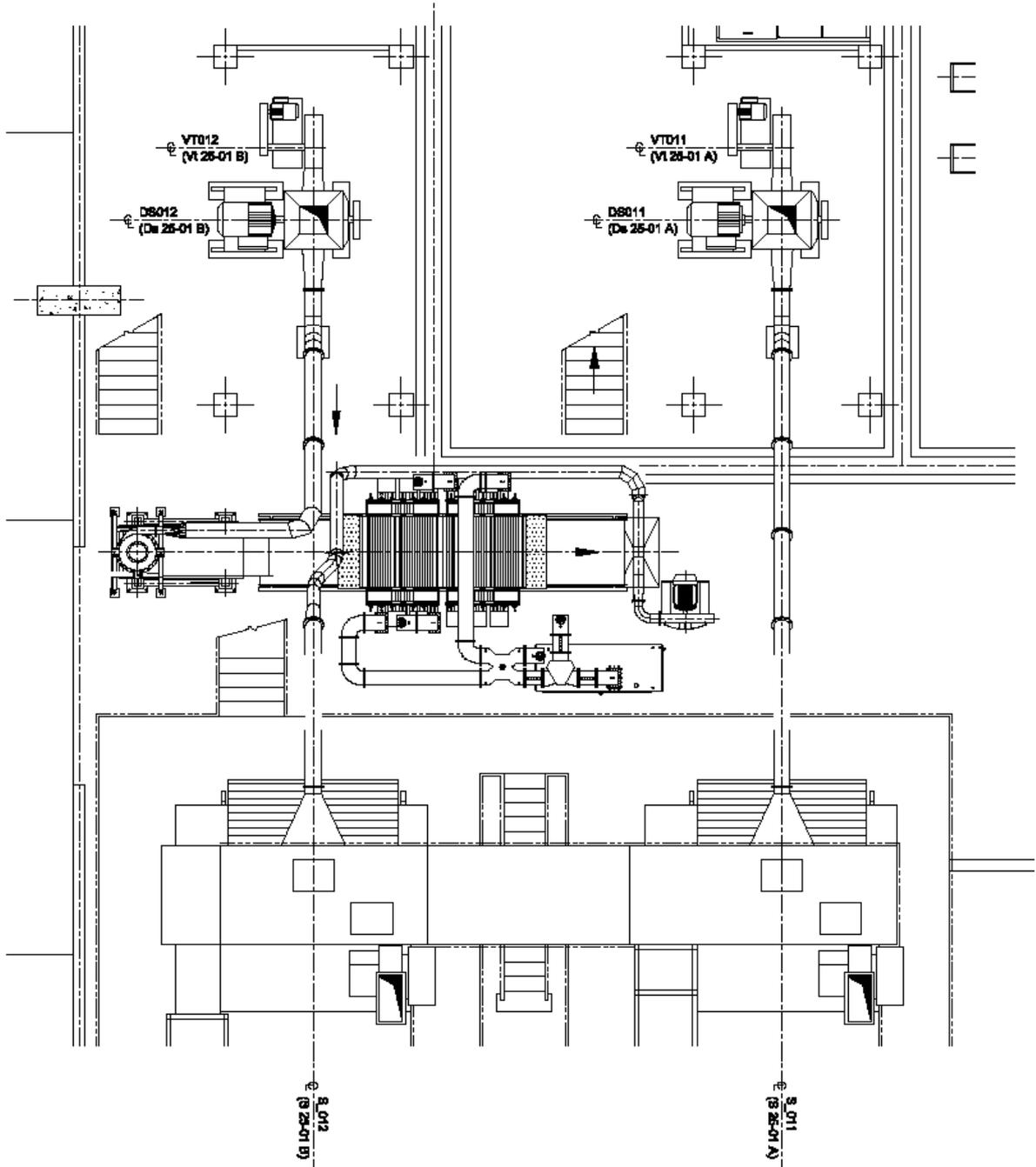
MONTGOMERY, D., *Design and Analysis of Experiments*. 4ª ed. Arizona: John Wiley & Sons, 1997.

MUJUMDAR, A. S., *Drying Fundamentals*. In: BAKER, C., *Industrial Drying of Foods*. Londres: Chapman & Hall, 1997. p 7-30.

MUJUMDAR, A. S., *Introduction to Drying Principles*. In: JANGAM, S. V., _____, *Industrial Drying – Principles and Practice*. Lecture Notes. Cingapura, 2011a.

- MUJUMDAR, A. S., *Principles, Classification, and Selection of Dryers*. In: _____, *Handbook of Industrial Drying*. 3ª ed. Cingapura: CRC/Taylor & Francis, 2006. p. 4-32.
- MUJUMDAR, A. S., *Selection and Classification of Dryers*. In: JANGAM, S. V., _____, *Industrial Drying – Principles and Practice*. Lecture Notes. Cingapura, 2011b.
- NONHEBEL, G., MOSS, A., *Drying of Solids in the Chemical Industry*. Londres: Butterworths, 1971.
- PACHECO, C. R. F., *Conceitos Básicos de Secagem*. Apostila. São Paulo, 2002. Disponível em: <http://www.poli.usp.br/d/pqi2530/alimentos/pacheco_secagem_cap_1.pdf>
- PARK, K. J., ANTONIO, G. C., OLIVEIRA, R. A., PARK, K. J. B., *Conceitos de Processo e Equipamentos de Secagem*. Manual Técnico. Campinas, 2007. Disponível em <<http://www.feagri.unicamp.br/ctea/projpesq.html>>
- ROCHA, E. C., LOVISON, V. H., PIEROZAN, N. J., *Tecnologia de transformação dos elastômeros*. 2ª ed. São Leopoldo: Centro Tecnológico de Polímeros SENAI, 2007.
- ROZAINEE, M., NG, P., *Microwave assisted hot air convective dehydration of fish slice: drying characteristics, energy aspects and colour assessment*. World Engineering Congress, Malaysia, p.41, 2010.
- SANTOS, A., *Metodologia Científica: a construção do conhecimento*. 3ª ed. Rio de Janeiro: DP&A, 2000.
- SCHIFFMANN, R., *Microwave and Dielectric Drying*. In: MUJUMDAR, A.S., *Handbook of Industrial Drying*. 3ª ed. Cingapura: CRC/Taylor & Francis, 2006. p. 286-305.
- SILVA, F., MARSAIOLLI, A., *Aspecto econômico de um processo de secagem de amêndoas de castanha do Brasil (Bertholletia excelsa) assistida a microondas*. Revista Ciências Exatas e Naturais, Campinas, v. 5, n. 2, p. 157, 2003.
- SHREVE, R., BRINK, J., *Indústrias de Processos Químicos*. 4ª ed. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1980.
- UHER, C., *Thermal Conductivity of Metals*. In: TRITT, T. M., *Thermal conductivity: theory, properties, and applications*. Nova York: Kluwer Academic, 2004. p. 1-20
- VAN BRACKEL, J., *Mass transfer in convective drying*. In: MUJUMDAR, A.S., *Advances in Drying*. Nova York: Hemisphere, 1980. p. 217–268.
- VIEIRA, S., *Como escrever uma tese*. 6ª ed. São Paulo: Atlas, 2008.
- WHITE, J. R., DE, S. K., *Rubber technologist's handbook*. Shawbury: Rapra, 2001.
- WILLIAMS-GARDNER, A., *Industrial Drying*. Londres: Leonard Hill, 1971.

ANEXOS

ANEXO A: Layout do teste em linha de produção

ANEXO B: Fotos Sistema de Secagem



