



JONATAS MICAEL VIEIRA DE LIMA

**SECADOR DE MINÉRIOS NÃO FERROSOS À MICRO-ONDAS:
ALTERNATIVA PARA REDUÇÃO DE UMIDADE DE CAULIM E
BENTONITA EXPLORADAS NA PARAÍBA**

**JOÃO PESSOA – PB
Março de 2018**



JONATAS MICAEL VIEIRA DE LIMA

**SECADOR DE MINÉRIOS NÃO FERROSOS À MICRO-ONDAS:
ALTERNATIVA PARA REDUÇÃO DE UMIDADE DE CAULIM E
BENTONITA EXPLORADAS NA PARAÍBA**

Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, como requisito necessário à obtenção do grau de Mestre em Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Eletromagnetismo Aplicado

Joabson Nogueira de Carvalho, Dr
Orientador

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Biblioteca Nilo Peçanha do IFPB, *campus* João Pessoa

L732s Lima, Jonatas Micael Vieira.

Secador de minérios não ferrosos à micro-ondas : alternativa para redução de umidade de caulim e bentonita exploradas na Paraíba / Jonatas Micael Vieira de Lima. – 2018.

96 f. : il.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba / Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, 2018.

Orientação : D.r Joabson Nogueira de Carvalho.

1. Eletromagnetismo – micro-ondas. 2. Exploração de minério – Paraíba. 3. Secagem de minério não ferroso. 4. Caulim. 5. Bentonita. I. Título.

CDU 537.8 :622(043)

Lucrecia Camilo de Lima
Bibliotecária
CRB 15/132

JONATAS MICAEL VIEIRA DE LIMA

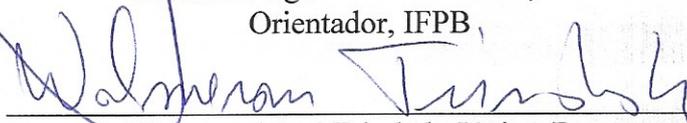
**SECADOR DE MINÉRIOS NÃO FERROSOS À MICRO-ONDAS:
ALTERNATIVA PARA REDUÇÃO DE UMIDADE DE CAULIM E
BENTONITA EXPLORADAS NA PARAÍBA**

Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Instituto Federal da Paraíba, como requisito necessário à obtenção do grau de Mestre em Ciências no domínio da Engenharia Elétrica.

BANCA EXAMINADORA



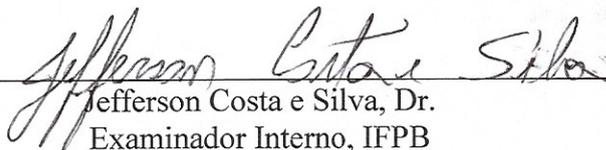
Joabson Nogueira de Carvalho, Dr.
Orientador, IFPB



Walmeran José Trindade Júnior, Dr.
Examinador Externo, IFPB



Alfrêdo Gomes Neto, Dr.
Examinador Interno, IFPB



Jefferson Costa e Silva, Dr.
Examinador Interno, IFPB

22/03/2018
João Pessoa - PB

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, obrigado a minha mulher, Kamilla Kafran França de Vasconcelos, por estar sempre ao meu lado me ajudando nos mínimos detalhes a percorrer meus caminhos. Esse trabalho é para ela que me mostrou a oportunidade do mestrado e insistiu. Sem ela não estaria aqui.

Agradeço aos professores do mestrado pelos conhecimentos passados. Em especial aos professores Alfrêdo Gomes Neto e Joabson Nogueira de Carvalho. Pelo apoio e palavras de incentivo que me fortaleceram e não me deixaram desistir quando era difícil conciliar trabalho e mestrado tendo de viajar longas distâncias entre Patos e João Pessoa. Por toda a ajuda e compreensão que me fizeram crer que eram não só professores, mas também amigos.

“They can call me whatever they want, but that won't change me. I just don't care what the world says. I'm gonna make it.”

(Lost Frequencies)

RESUMO

Este estudo apresenta uma proposta de melhoria no processo de beneficiamento de minérios não ferrosos como o caulim e bentonita explorados no estado da Paraíba, mais especificamente a etapa de secagem. O processo de secagem adotado hoje nas mineradoras é extremamente prejudicial ao meio ambiente, tendo em vista que são utilizados fornos à lenha para redução de umidade. Dessa forma, visando principalmente reduzir o impacto ambiental, este trabalho apresenta um estudo de viabilidade do ponto de vista energético e econômico do uso da secagem utilizando ondas eletromagnéticas na faixa de micro-ondas, alimentados a partir de uma planta de geração com painéis fotovoltaicos, avaliando dados e realizando medições para subsidiar o projeto de um forno secador de minério assistido por micro-ondas. Os resultados mostram que não apenas é possível realizar a secagem, como também o uso de forno de micro-ondas no processo traz diversos benefícios tais como velocidade, eficiência, segurança, controle sobre o processo e redução dos impactos ambientais.

Palavras-chave: Caulim; Bentonita; Secagem; Secador; Aquecimento; Micro-ondas;

ABSTRACT

This study brings a proposal to improve the processing of non-ferrous ores such as kaolin and bentonite in the state of Paraíba, Brazil, specifically the drying processing's step. The way that drying is done today in the mining companies is a process extremely harmful to the environment, considering that they use wood stoves to reduce humidity from the ores. In this way, aiming mainly to reduce the environmental impact, this work presents a feasibility study from energetic and economic point of view of the drying process using electromagnetic waves in the range of microwaves, fed from a generation plant with photovoltaic panels, evaluating data and making measurements to subsidize the project of a microwave oven. The results show that not only is possible to perform drying, but also the use of microwave oven in the process brings several benefits such as speed, efficiency, safety, control over the process and reducing environmental impact.

Key Words: Kaolin; Bentonite; Drying; Dryer; Heating; Microwave

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	iv
RESUMO	vi
ABSTRACT	vii
LISTA DE ILUSTRAÇÕES	x
LISTA DE TABELAS	xiii
LISTA DE SIGLAS	xiv
LISTA DE SIMBOLOS	xv
1 INTRODUÇÃO	17
1.1 OBJETIVOS	23
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	25
2.1 GENERALIDADES E PROCESSAMENTO DOS MINÉRIOS	25
2.1.1 Caulim	25
2.1.2 Bentonita	25
2.1.3 Beneficiamento do minério	26
2.2 SECADORES À MICRO-ONDAS	32
2.3 PRINCÍPIO DE AQUECIMENTO POR MICRO-ONDAS	35
2.3.1 Condução iônica	35
2.3.2 Rotação dipolar	36
2.3.3 Propriedade eletromagnética dos materiais	37
2.3.4 Profundidade de penetração	40
2.4 REGULAMENTAÇÃO DO USO DE FREQUÊNCIA DE ONDAS ELETROMAGNÉTICAS	41
2.5 A SECAGEM	42
2.6 VANTAGENS DA UTILIZAÇÃO DE MICRO-ONDAS NO PROCESSO DE SECAGEM	43
2.6.1 Resposta rápida	44
2.6.2 Automação e controle do processo	44
2.6.3 Segurança operacional e de ambiente de trabalho	44

2.6.4	Energia limpa e eficiente	44
2.7	GERAÇÃO FOTOVOLTAICA – ALTERNATIVA ENERGÉTICA	45
3	MATERIAIS E MÉTODOS	47
3.1	LEVANTAMENTO DO MATERIAL BIBLIOGRÁFICO SOBRE A TEMÁTICA DO TRABALHO E VISITAS TÉCNICAS ÀS MINERADORAS	48
3.2	CARACTERIZAÇÃO ELETROMAGNÉTICA DO MATERIAL	49
3.3	DISTRIBUIÇÃO DE POTÊNCIA	52
3.4	CURVA DE SECAGEM DO MATERIAL	53
3.5	POTÊNCIA ÚTIL DE MICRO-ONDAS	57
3.6	DIMENSIONAMENTO DE UM SFCR	61
4	RESULTADOS	64
4.1	CARACTERIZAÇÃO ELETROMAGNÉTICA DOS MATERIAIS	64
4.1.1	Caulim	64
4.1.2	Bentonita	70
4.2	CURVA DE SECAGEM	75
4.3	TAXA DE SECAGEM	76
4.4	ENERGIA CONSUMIDA E VIABILIDADE ECONÔMICA	78
4.4.1	Potência absorvida pelo material	78
4.4.2	Energia e custo de secagem por micro-ondas	81
4.4.3	Planta fotovoltaica	84
5	CONCLUSÃO	86
	REFERÊNCIAS	89
	ANEXOS	92
	ANEXO A – Mapa de recursos minerais do estado da Paraíba	93
	ANEXO B – Mapa de insolação média anual em horas diárias.	95
	ANEXO C – Mapa de radiação solar média anual em MJ/m ²	96

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.1: Comparativo de saldos do Setor Mineral x Brasil.	17
Figura 1.2: Produção Mineral Brasileira (não incluído extração de petróleo e gás).	18
Figura 1.3: Destaque das regiões da Borborema e Agreste paraibano, principais regiões produtoras de minério do estado.	18
Figura 1.4: Imagem de satélite da região do Seridó. O solo exposto aparece em amarelo. As linhas cinzas representam os limites estaduais RN/PB (área em rosa ainda não classificada).	20
Figura 1.5: Lenha estocada para ser utilizada nos fornos da Mineradora São João em Junco do Seridó - PB.	20
Figura 1.6: Destaque das principais áreas de exploração de caulim e bentonita no estado da Paraíba.	22
Figura 2.1: Fluxograma típico do tratamento do minério.	27
Figura 2.2: Britagem e moagem do caulim bruto. Mineradora Incomgel em Juazeirinho - PB.	28
Figura 2.3: Caulim misturado a água em tanques de separação para retirada de impurezas. Mineradora Incomgel em Juazeirinho - PB.	29
Figura 2.4: Processo de filtragem do caulim puro por decantação. Mineradora Incomgel em Juazeirinho - PB.	29
Figura 2.5: a) O caulim sendo prensado para retirada do excesso de água. b) O resultado é uma massa úmida em forma de torta. Mineradora São João em Junco do Seridó – PB.	30
Figura 2.6: Secagem das “tortas” de caulim ao ar livre. Mineradora Incomgel em Juazeirinho - PB.	30
Figura 2.7: Utilização de fornos a lenha para secagem do caulim. Mineradora São João em Junco do Seridó - PB.	31
Figura 2.8: Os pedaços de caulim seco são peneirados e embalados. Mineradora Incomgel em Juazeirinho - PB.	31
Figura 2.9: a) Sistema de aquecimento por micro-ondas, b) equipamento tipo batelada e c) equipamento tipo contínuo.	33
Figura 2.10: Magnetron, válvula comumente utilizada para geração das micro-ondas[13].	34
Figura 2.11: Secagem de madeira em forno de micro-ondas a) tipo contínuo e b) tipo batelada.	35
Figura 2.12: Condução iônica em um a) campo elétrico fixo causa migração dos ions e em uma b) onda eletromagnético variável causa a vibração dos ions.	35
Figura 2.13: Estrutura de uma molécula de água e representação por um vetor de dipolo.	36
Figura 2.14: Dipolos com a) orientação aleatória e b) alinhados quando expostos ao campo elétrico.	36
Figura 2.15: Oscilação dos dipolos com aplicação de micro-ondas.	37
Figura 2.16: Interação de micro-ondas com tipos de materiais.	38

Figura 2.17: Tangente de perdas de amostra de água em temperaturas diferentes. Medição feita no laboratório de micro-ondas do IFPB.	40
Figura 2.18: Curva de secagem de amostra de bauxita em chapa aquecida, estufa e forno de micro-ondas.	43
Figura 2.19: Insolação média anual em horas diárias.	45
Figura 3.1: Laboratório de testes e misturas. Mineradora Ummio em Soledade - PB.	48
Figura 3.2 Medição de permissividade e tangente de perdas usando o VNA E5071C.	50
Figura 3.3: Irregularidades na superfície da amostra devido à perda de umidade	51
Figura 3.4: Fluxo do processo para medição de permissividade e tangente de perdas para amostras com percentual de umidade diferentes. Caso o VNA não consiga fazer medições corretas devido a irregularidade da superfície das amostras, o processo é finalizado.	51
Figura 3.5: a) Processo de preparação da amostra a ser aquecida. b) Câmera térmica registrando os contrastes de temperatura.	52
Figura 3.6: Imagem térmica a) antes do aquecimento, b) após 1 minuto de aquecimento e c) após 2 minutos de aquecimento.	53
Figura 3.7: Layout de montagem para medição de massa durante o processo de secagem.	54
Figura 3.8: Estrutura montada para medição de massa instantânea durante o processo de secagem.	55
Figura 3.9: Pinagem para adaptação do cabo de comunicação entre a balança de precisão (padrão DB25M) e o computador (Padrão DB9F).	55
Figura 3.10: Fluxo do procedimento para medição da curva de secagem.	56
Figura 3.11: Amostras de caulim e bentonita a) antes do processo, b) 100% de umidade e c) após secagem com 0% de umidade.	56
Figura 3.12: Processo para obtenção de dados para cálculo da potência útil do forno micro-ondas.	59
Figura 3.13: Medição de massa e temperatura da amostra de água.	59
Figura 3.14: Potência de micro-ondas absorvida pela água em relação a quantidade de inicial da amostra.	60
Figura 3.15: Esquema de um forno micro-ondas convencional.	61
Figura 3.16: Produtividade anual do inversor em função do FDI em Petrolina-PE [37].	63
Figura 4.1: Parte real da permissividade elétrica do caulim em função da frequência.	65
Figura 4.2: Tangente de perdas do caulim em função da frequência.	67
Figura 4.3: Perdas do caulim em função do percentual de umidade em diferentes frequências.	68
Figura 4.4: Tangente de perdas e constante dielétrica na frequência de 2,45 GHz.	69
Figura 4.5: Parte real da permissividade elétrica da bentonita em função da frequência.	71
Figura 4.6: Tangente de perdas da bentonita em função da frequência.	72
Figura 4.7: Perdas da bentonita em função do percentual de umidade.	73
Figura 4.8: Tangente de perdas e constante dielétrica na frequência de 2,45 GHz.	74

Figura 4.9: Percentual de umidade de amostras de caulim em função do tempo de secagem em forno de micro-ondas.	75
Figura 4.10: Percentual de umidade de amostras de bentonita em função do tempo de secagem em forno de micro-ondas.	76
Figura 4.11: Taxa de secagem de amostras de caulim em função do tempo de secagem.	77
Figura 4.12: Taxa de secagem de amostras de bentonita em função do tempo de secagem.	77
Figura 4.13: Potência de micro-ondas, convertida em mudança de fase da água para retirada de umidade de caulim.	79
Figura 4.14: Potência de micro-ondas, convertida em mudança de fase da água para retirada de umidade de bentonita.	80
Figura 4.15: Relação entre as grandezas. O tempo de secagem é diretamente proporcional a quantidade de produto a ser secado e inversamente proporcional à potência de micro-ondas disponível.	81

LISTA DE TABELAS

Tabela 2-1: Medida de tangente de perdas efetuada a 3GHz.	39
Tabela 3-1: Especificações técnicas do forno micro-ondas utilizado nos experimentos, marca Electrolux, modelo MEF-41.	47
Tabela 4-1: Valores de referência de secagem de caulim e bentonita a 40% de umidade.	79
Tabela 4-2: Cálculo do tempo de secagem para caulim e bentonita a 40% de umidade.	82
Tabela 4-3: Tarifa de energia elétrica da modalidade tarifária verde, demais classes [39].	83
Tabela 4-4: Cálculo do custo de energia elétrica para utilização de secador à micro-ondas de capacidade de 30t.	83
Tabela 4-5: Quadro resumo de secagem.	84
Tabela 4-6: Cálculo do custo de energia elétrica para utilização de secador à micro-ondas de capacidade de 1t.	84

LISTA DE SIGLAS

IBRAM	Instituto Brasileiro de Mineração
DNPM	Departamento Nacional de Produção Mineral
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
ISM	<i>Industrial, Scientific and Medical</i>
UIT	União Internacional de Telecomunicações
ANATEL	Agência Nacional de Telecomunicações
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
SFCR	Sistema Fotovoltaico Conectado a Rede
FDI	Fator de Dimensionamento de Inversor

LISTA DE SIMBOLOS

ϵ	Permissividade elétrica
ϵ_r	Permissividade elétrica relativa
ϵ_0	Permissividade elétrica no vácuo
ϵ_r'	Constante dielétrica (parte real da permissividade elétrica relativa)
ϵ_r''	Fator de perda (parte imaginária da permissividade elétrica relativa)
$\text{tg}\delta$	Tangente de perda ou perda dielétrica
h	Percentual de umidade
h_i	Percentual de umidade no instante atual
$h_{(i-1)}$	Percentual de umidade no instante anterior
A	Massa da amostra com umidade
A_s	Massa da amostra sem umidade
T_s	Taxa de secagem
t	Tempo de secagem
Δt	Intervalo de tempo
C	Calor específico
Q	Energia
m	Massa
Δm	Variação de massa
ΔT	Variação de temperatura
L	Calor latente ou calor de transformação
P	Potência
P_t	Potência consumida para elevação da temperatura
P_f	Potência consumida na mudança de estado
$P_{\text{útil}}$	Potência total consumida pela amostra
m_r	Massa inicial de referência
t_r	Tempo de secagem de referência
p_r	Potência absorvida na secagem de referência
m_f	Massa de quantidade de produto a ser processado
t_f	Tempo de secagem de produto a ser processado
p_f	Potência disponível para secagem de produto a ser processado

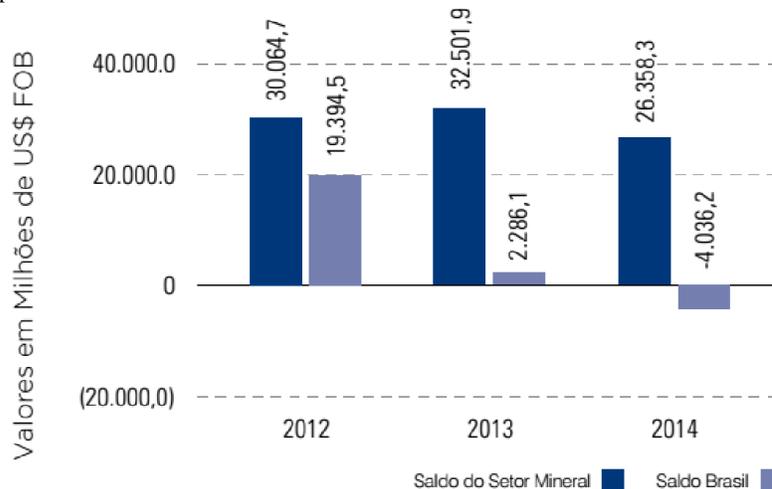
n	Quantidade de válvulas de micro-ondas
$t_{\text{CAULIM40\%}}$	Tempo de secagem de amostra de caulim a 40% de umidade
$t_{\text{BENTONITA40\%}}$	Tempo de secagem de amostra de bentonita a 40% de umidade
E_D	Energia demandada para a planta de geração fotovoltaica
H_I	Horas de insolação diária
$P_{\text{MÁX}}$	Potência de pico do painel fotovoltaico
E_P	Energia máxima gerada pelo painel fotovoltaico
f_s	Fator de segurança de dimensionamento de painel fotovoltaico
N	Número de painéis fotovoltaicos

1 INTRODUÇÃO

Os recursos naturais são usados exaustivamente, cada vez mais em um ritmo mais acelerado se comparado aos processos de renovação do ecossistema. Por esse motivo se intensificaram os problemas relacionados ao meio ambiente diante da exploração desenfreada e inconsequente. O problema se agrava quando se leva em consideração os recursos não renováveis como os minérios, que não só tem recursos escassos como também o próprio processo de extração e beneficiamento é prejudicial ao meio ambiente.

Porém, a economia brasileira depende da mineração. Segundo o Instituto Brasileiro de Mineração (IBRAM) em seu último relatório anual de 2015, o saldo da balança mineral brasileira em 2014 atingiu US\$ 26.358,3 milhões enquanto que a soma dos demais setores produtivos do Brasil o saldo foi deficitário em US\$ 4.036,2 milhões. O gráfico da Figura 1.1 comprova o quão significativo é o setor de mineração na economia brasileira [1].

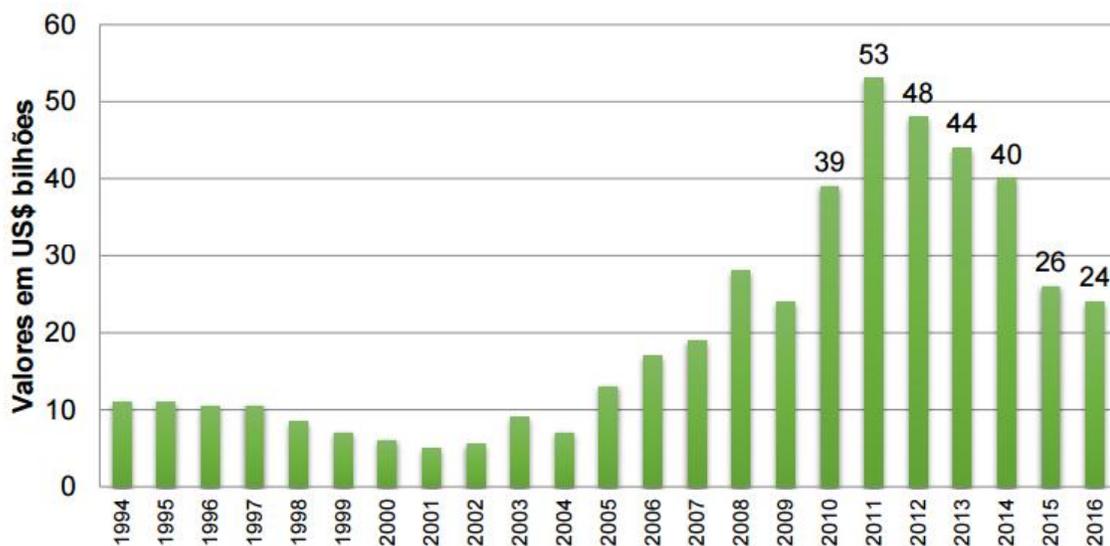
Figura 1.1: Comparativo de saldos do Setor Mineral x Brasil.



Fonte: IBRAM (2015) [1]

A importância do setor é grande mesmo com queda na produção mineral nos últimos anos, mostrado no gráfico da Figura 1.2. O decréscimo é reflexo de uma redução nos preços internacionais das commodities minerais e da queda da atividade mineral no país e no mundo [1].

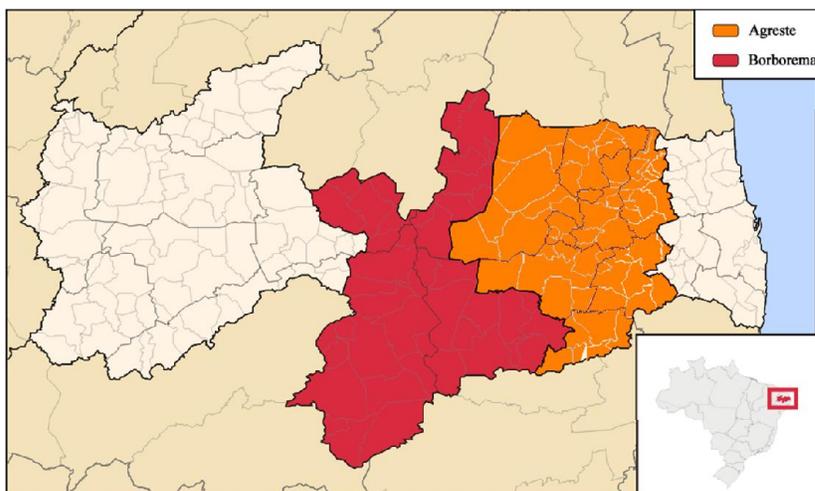
Figura 1.2: Produção Mineral Brasileira (não incluído extração de petróleo e gás).



Fonte: IBRAM (2017) [2]

No Nordeste brasileiro, apenas na década de 40 é que se iniciou a exploração de minerais, após descoberta de materiais estratégicos para a indústria, o que ofereceu alternativas de sobrevivência para o sertanejo por meio da garimpagem. Desde então, a exploração mineral ocorre também no estado da Paraíba, em especial, na região da Borborema e Agreste paraibano (mostrados na Figura 1.3), tornando-se uma importante alternativa de desenvolvimento do estado.

Figura 1.3: Destaque das regiões da Borborema e Agreste paraibano, principais regiões produtoras de minério do estado.



Fonte: O autor (2017)

A estimativa do Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM) é de que a atividade de mineração deve movimentar em torno de R\$ 200 milhões por ano no estado da Paraíba [3]. O montante do negócio chama atenção, mas os ganhos só não são maiores por falta de qualificação e de utilização de novas tecnologias na extração e processamento dos minerais.

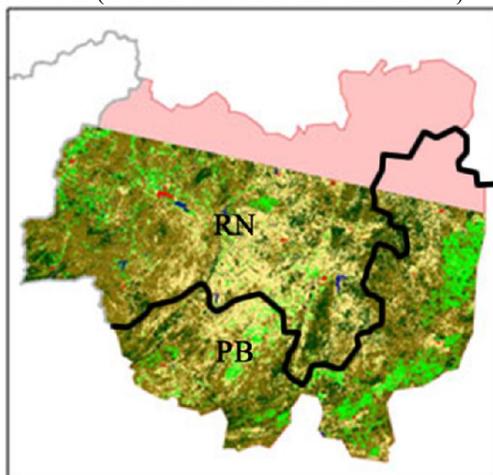
Atualmente são explorados na Paraíba rochas ornamentais, quartzitos, bentonitas, feldspatos, caulim, argilas e granitos e que escoam principalmente para a construção civil, indústria de porcelanato, indústria química e de petróleo [3]. O Anexo A traz o mapa de recursos minerais da Paraíba, no qual podem ser visualizadas as principais ocorrências de minério no estado.

Apesar de a mineração paraibana ser de longa data, até hoje ainda são utilizadas técnicas rudimentares para a extração e beneficiamento do minério. São aplicados procedimentos que utilizam pouca ou nenhuma tecnologia atual, e são considerados prejudiciais para o meio ambiente. A falta de novas tecnologias também acaba por limitar a produtividade e lucros, tendo em vista que são utilizados processos lentos, pouco eficientes e em muitos casos não há sequer o beneficiamento e tratamento da matéria extraída.

Não é novidade e diversos artigos relacionados à mineração já denunciaram os vários impactos ambientais oriundos da exploração no interior da Paraíba [4]-[7], no qual apontavam problemas em praticamente todas as etapas do processo. Uma dessas etapas em especial é a secagem do material refinado, no qual se faz uso de fornos para retirada da umidade.

O processo de secagem, adotado atualmente, é um incentivo ao desmatamento da mata nativa (como a Caatinga, no cariri paraibano), tendo em vista que grande parte das instalações de secagem faz uso dos fornos à lenha, cujo combustível é a vegetação extraída da região. Segundo o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), em um estudo de 2016 revelou que 40% da Caatinga está degradada e que entre os principais motivos está o desmatamento para fabricação de lenha e carvão vegetal para utilização nas indústrias de cerâmica, de gesso e de mineração [8]. A Figura 1.4 mostra a região do Seridó (da Paraíba e do Rio Grande do Norte), onde as áreas em cor amarela mostram o solo exposto e propenso à desertificação.

Figura 1.4: Imagem de satélite da região do Seridó. O solo exposto aparece em amarelo. As linhas cinzas representam os limites estaduais RN/PB (área em rosa ainda não classificada).



Fonte: Modificado de INPE (2016) [4]

A Figura 1.5 mostra a fotografia do estoque de lenha da empresa Mineradora São João em Junco do Seridó, para ser utilizado em seus fornos, revelando o tamanho do impacto que é causado por apenas uma das mineradoras em todo o estado.

Figura 1.5: Lenha estocada para ser utilizada nos fornos da Mineradora São João em Junco do Seridó - PB.



Fonte: O autor (2017)

O desmatamento da caatinga é um sério problema ambiental na região Nordeste, causando impactos como o aumento da exposição do solo que perde suas qualidades, contribui para o assoreamento dos rios e processo de desertificação, perda da biodiversidade, além de contribuir para o aquecimento global por meio da emissão do CO₂ oriundos da queima do combustível.

Apesar dos problemas, o processo de secagem é essencial para o beneficiamento do produto com objetivo de aumentar a rentabilidade da exploração. Segundo o IBRAM (2010), o beneficiamento em alguns casos pode aumentar em mais de 50% o valor do minério comparado com o produto bruto [3]. Porém se faz necessário uma solução mais eficiente, rápida, segura e com menor impacto ambiental com o uso de tecnologias alternativas disponíveis atualmente.

Para estudos da melhoria do processo de secagem foram escolhidos a bentonita e o caulim, ambos com participação importante na economia paraibana. A maioria das mineradoras estão instaladas numa área de elevada insolação [9], sugerindo a possibilidade do uso de energia fotovoltaica no processo de secagem.

Segundo o DNPM, a bentonita explorada na Paraíba representa 90% de toda a produção nacional, fazendo o estado figurar como o principal produtor do país com a comercialização de aproximadamente R\$ 65 milhões em 2010 [10].

Já a produção do caulim na Paraíba é discreta e não chega a 1% da produção nacional, porém, devido suas aplicações em produtos mais nobres, tem uma boa rentabilidade comparado com os demais produtos explorados. Enquanto a rentabilidade do caulim chegou a R\$ 25,00 por tonelada em 2010 a bentonita ficou em R\$ 16,47 por tonelada, considerando apenas o minério bruto, sem beneficiamento [10]. Se levar em consideração o produto beneficiado, a tonelada do caulim é vendida por até R\$ 400,00 enquanto que a tonelada da bentonita é comercializada por R\$ 250,00, podendo chegar a R\$ 350,00 quando utilizado aditivos químicos.

A Figura 1.6 mostra um recorte do mapa das regiões produtoras de minérios na Paraíba. O destaque da região mostra as principais áreas de exploração do caulim na área X e da bentonita na área XI.

Diante do exposto, podemos concluir que o beneficiamento dos minérios é um ponto importante para a melhoria dos processos produtivos e rentabilidade, porém é responsável por parte da contribuição aos impactos ambientais, em especial a etapa de secagem. Dessa forma, este trabalho busca trazer uma alternativa ao processo de secagem, com utilização de energia eletromagnética na frequência de micro-ondas, com o uso de fornos industriais, alimentados a partir de uma planta de geração de energia fotovoltaica, em substituição ao processo de secagem com forno a lenha.

1.1 OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo geral apresentar um estudo de eficiência energética do processo de secagem de minérios não ferrosos utilizando fornos industriais de micro-ondas, bem como a viabilidade do uso de energia proveniente de uma planta de geração fotovoltaica. O sistema estudado considera a secagem de dois tipos de minérios explorados no estado da Paraíba, a bentonita e o caulim, e as instalações situadas na região do cariri paraibano, onde se encontram instaladas a maioria das mineradoras. O estudo pretende subsidiar futuras pesquisas para projeto de um secador do minério não ferroso utilizando forno de micro-ondas.

Dentro do contexto geral este trabalho traz os seguintes objetivos específicos:

- Realizar a caracterização eletromagnética do minério, com a determinação da permissividade elétrica e tangente de perdas para a faixa de frequências de micro-ondas, especificamente nas frequências destinadas às Aplicações Industriais, Científicas e Médicas (ISM – Industrial, Scientific and Medical).
- Determinar a curva de secagem e taxa de secagem assistida por micro-ondas dos minérios na frequência de 2450 MHz.
- Estimar a potência eletromagnética necessária para o processamento dos minérios utilizando o forno de micro-ondas doméstico para este fim.
- Indicar a utilização da energia solar fotovoltaica como alternativa para viabilizar o projeto de um secador à micro-ondas.
- Dimensionar a planta solar fotovoltaica necessária para o processamento do minério. Utilizar a localização na região do cariri paraibano, preferencialmente em um local onde esteja instalada uma das mineradoras.
- Realizar o estudo de viabilidade econômica da utilização de micro-ondas no processo de secagem.

Este trabalho está dividido em cinco capítulos. O Capítulo 2 apresenta a fundamentação teórica, incluindo o processo de secagem aplicado à minérios, revisão da teoria eletromagnética e os demais aspectos relacionados ao processo de secagem assistida por micro-ondas. O Capítulo 3 apresenta a metodologia aplicada no presente trabalho para realizar o estudo da secagem da bentonita e do caulim com o uso de um forno de micro-ondas. No Capítulo 4 são apresentadas as discussões dos resultados obtidos para a secagem, além de apresentar os aspectos de dimensionamento da planta de geração fotovoltaica a ser utilizada no

processo de secagem sugerido, bem como as discussões sobre a viabilidade do uso dos recursos apresentados no presente trabalho. Finalmente, no Capítulo 6 são apresentadas as conclusões finais do trabalho.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 GENERALIDADES E PROCESSAMENTO DOS MINÉRIOS

2.1.1 Caulim

O termo caulim, também conhecido como *china clay*, é utilizado para denominar a rocha que contém a caulinita e também o produto resultante de seu beneficiamento. O nome caulim deriva da palavra chinesa *kauling*, que significa cume alto [11].

Dependendo de algumas características específicas, o caulim tem aplicações variadas, podendo ser utilizado como: pigmento e base para tintas, carga e cobertura na indústria de papel, matéria-prima para a indústria cerâmica (porcelana, azulejo, esmalte), matriz para catalisadores (craqueamento de petróleo e dispositivo para exaustão de gases em automóveis), isolante elétrico, agente fortalecedor de borrachas e concretos, cobertura digestiva de remédios (fármacos), fabricação de cimento branco, pesticidas, vidros, adesivos, cosméticos, plásticos [11].

Segundo o Ministério de Minas e Energia Brasileiro, existem 14 depósitos de caulim no estado da Paraíba, localizados na região da Borborema, principalmente nos municípios de Junco do Seridó (o principal polo produtor), Juazeirinho e Pedra Lavrada, visualizados na Figura 1.6, onde ocorrem diversos depósitos de caulins associados à alteração de pegmatitos¹ [12].

A lavra do caulim é feita por meios manuais a céu aberto e, em menor dimensão, por meio de trabalhos subterrâneos. O seu beneficiamento consta de fases de peneiramento, decantação e secagem em forno a lenha [12].

2.1.2 Bentonita

O termo bentonita foi derivado da localização do primeiro depósito comercial de argila plástica na cidade de *Fort Benton* nos Estados Unidos. Essa argila apresenta a propriedade de

¹ PEGMATITOS são rochas ígneas composta de materiais cristalinos que apresentam, pelo menos em parte, uma granulação muito grosseira, contendo como maiores constituintes minerais àqueles encontrados tipicamente em rochas ígneas comuns: Feldspato, Caulim, Mica, Turmalina, Berilo e outros [14].

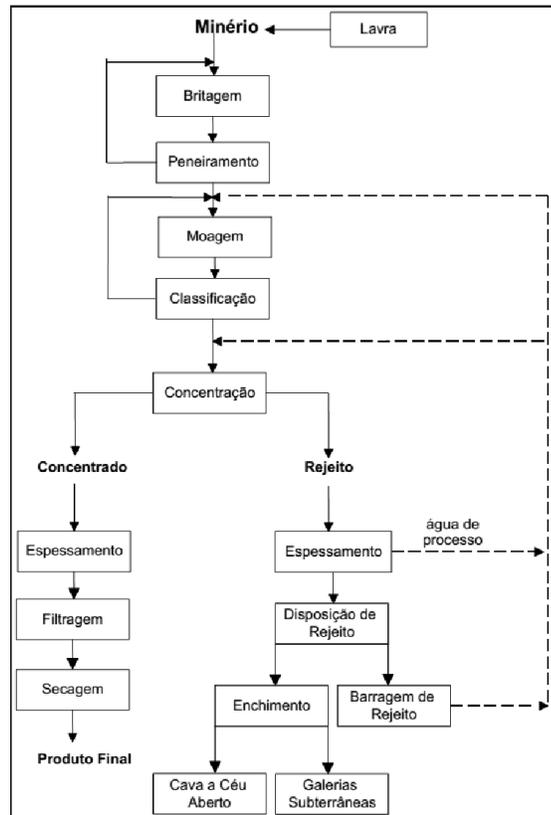
aumentar várias vezes o seu volume inicial na presença de umidade [13]. Suas características podem ser modificadas durante o beneficiamento no qual é misturada a aditivos, a depender do tipo de aplicação exigida, sendo utilizada principalmente na construção civil e indústria do petróleo.

As maiores reservas de argila bentonítica do Brasil estão localizadas no estado da Paraíba, que é responsável por mais de 90% da produção de bentonita bruta do país, a qual se destina basicamente para os mercados do Sudeste. As ocorrências e minas de bentonita na Paraíba estão nas regiões de Boa Vista e Cubati. Os depósitos de bentonita são formados essencialmente por camadas com mais ou menos 10m de espessura de argilas de cores verde, roxa e creme, com nível de pequena espessura de arenitos finos argilosos ou sílticos, na base [12].

2.1.3 Beneficiamento do minério

Tratamento ou beneficiamento consiste em operações aplicadas ao minério bruto visando modificar a granulometria, a concentração ou a forma, sem modificar a identidade química ou física [15]. A Figura 2.1 mostra o fluxograma das operações de tratamento do minério bruto extraído após a lavra de uma mina.

Figura 2.1: Fluxograma típico do tratamento do minério.



Fonte: Sampaio (2010) [15]

Na etapa de britagem ocorre a fragmentação de grandes pedaços do material que é peneirado, podendo o produto passar várias vezes por essa etapa. Em seguida, na etapa de moagem, esses fragmentos menores são reduzidos a partículas, depois classificado e podendo passar mais uma vez pela moagem se necessário. Tanto o processo de britagem quanto o de moagem tem o objetivo de reduzir a granulação do material, mostrado na Figura 2.2.

Figura 2.2: Britagem e moagem do caulim bruto. Mineradora Incomgel em Juazeirinho - PB.



Fonte: O autor (2017)

O minério reduzido é misturado com água para que seja separado das demais impurezas agregadas, no qual passa por processos de filtragem (decantação, peneiramento, flotação) até chegar na concentração desejada. Essa parte do processo é mostrada nas imagens da Figura 2.3 e Figura 2.4. No caso da bentonita, nessa etapa ainda há adições de componentes químicos desejáveis, dependendo da aplicação, e após isso, com cerca de 30 a 40% de umidade, é enviada para secagem e depois comercializada.

A secagem da bentonita é feita apenas ao ar-livre, no qual o material é revolvido de tempos em tempos para acelerar o processo que pode demorar de 2 a 3 dias, até chegar a um percentual de umidade de cerca de 10 a 14%, suficiente para comercialização.

Figura 2.3: Caulim misturado a água em tanques de separação para retirada de impurezas. Mineradora Incomgel em Juazeirinho - PB.



Fonte: O autor (2017)

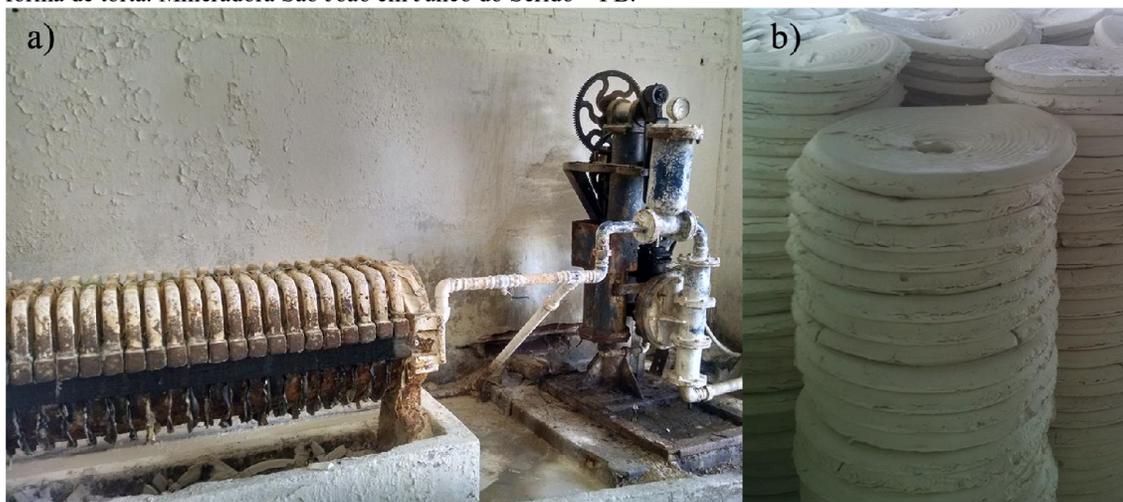
Figura 2.4: Processo de filtragem do caulim puro por decantação. Mineradora Incomgel em Juazeirinho - PB.



Fonte: O autor (2017)

O caulim, após a filtragem, é enviado para prensadoras (Figura 2.5a) que retiram o excesso de água, deixando o material em uma espécie de massa no formato de tortas, porém ainda bastante úmidas, com cerca de 30 a 40% de umidade, mostrado na Figura 2.5b.

Figura 2.5: a) O caulim sendo prensado para retirada do excesso de água. b) O resultado é uma massa úmida em forma de torta. Mineradora São João em Junco do Seridó – PB.



Fonte: O autor (2017)

O material é então levado para estantes de secagem no sol ao ar livre. O tempo de secagem pode chegar a 1 semana, dependendo das condições do tempo. O processo de secagem convencional é mostrado na Figura 2.6.

Figura 2.6: Secagem das “tortas” de caulim ao ar livre. Mineradora Incomgel em Juazeirinho - PB.



Fonte: O autor (2017)

Quando é necessário acelerar o processo de secagem, a opção é a utilização de fornos, geralmente à lenha, onde as tortas de caulim são dispostas em uma chapa de alvenaria que é aquecida pelo fogo alimentado abaixo, mostrado na Figura 2.7. A secagem utilizando forno a lenha é mais rápida, necessita de 12h de pré-aquecimento (para um forno de dimensões 4x30m), com capacidade para secar 30 toneladas de caulim em 24h, totalizando 36h. Porém esse

processo é mais dispendioso devido à elevação dos custos pela compra da 40m³ de lenha para o pré-aquecimento mais 1m³ para cada 1 tonelada de caulim. Segundo os profissionais das mineradoras visitadas, a secagem por forno a lenha só é utilizada em casos quando o prazo de entrega do produto é muito curto ou em períodos de chuva e pouco sol.

Figura 2.7: Utilização de fornos a lenha para secagem do caulim. Mineradora São João em Junco do Seridó - PB.



Fonte: O autor (2017)

Após a secagem, os pedaços das tortas de caulim com cerca de 1 a 3% de umidade, que se esfrelam facilmente, são enviados para uma peneiradora cujo produto final é um pó fino que é embalado e comercializado (Figura 2.8).

Figura 2.8: Os pedaços de caulim seco são peneirados e embalados. Mineradora Incomgel em Juazeirinho - PB.



Fonte: O autor (2017)

Segundo Luz (2010), os grandes desenvolvimentos na área de beneficiamento de minérios ocorreram séculos XIX, XX e XXI, porém as principais inovações tecnológicas foram apenas nas etapas de *Moagem*, *Classificação*, *Concentração* e principalmente *Filtração*. O processo de *Secagem* nunca passou por melhorias significativas até hoje [15].

2.2 SECADORES À MICRO-ONDAS

Descoberto acidentalmente por Percy Spencer e desenvolvido a partir da tecnologia de radar utilizado na Segunda Guerra Mundial em 1945, o forno de micro-ondas foi fabricado primeiramente para fins comerciais em 1951, sendo utilizado pela primeira vez para propósitos domésticos nos anos 1960, o qual corresponde hoje sua maior fatia do mercado. Não demorou muito para a indústria colocá-lo como solução prática nos processos de produção [16], [17].

A utilização de micro-ondas para elevação da temperatura e/ou redução do teor de umidade de produtos dielétricos em processos industriais passou a ter uma vasta aplicação na indústria de diversos segmentos, complementando e, em muitos casos, até substituindo totalmente o aquecimento convencional. Dentre as diversas aplicações, podem ser citadas [17], [18]:

- Borracha, fibra de vidro, espuma, polímeros, celulose, madeira, dentre outros;
- Indústria alimentícia;
- Esterilização de resíduos ou produtos;
- Indústria têxtil;
- Indústria de plásticos;
- Cerâmica, minérios não ferrosos em geral;

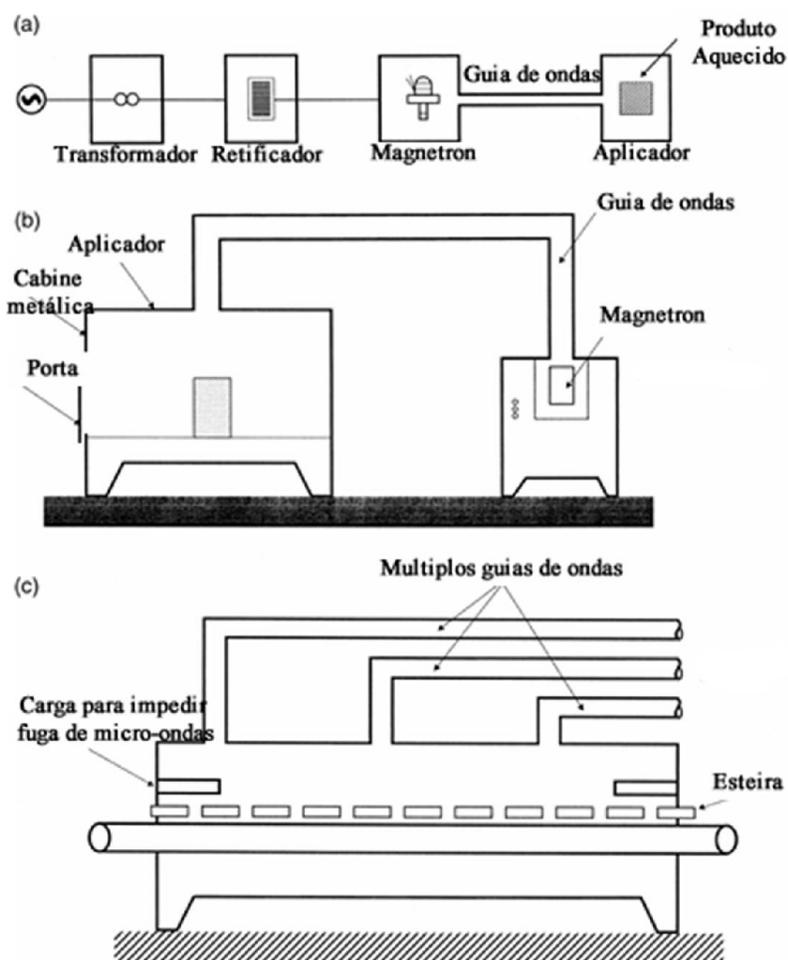
Tudo isso visando eficiência proveniente do fato de que não há necessidade do contato com o produto a ser aquecido, de uma transferência de energia com rapidez, aquecimento rápido e volumétrico, além do alto nível de segurança e possibilidade de automação do processo, com inicialização e finalização rápidas do aquecimento [19].

O sistema é composto basicamente por um transformador para elevação da tensão, um circuito retificador, a válvula geradora de micro-ondas (Magnetron, Klystron, TWT, Gyrotron, dentre outras) e o aplicador, como mostrado na Figura 2.9a. Em sistemas de altas potências recomenda-se o uso de retificadores de onda completa, aproveitando os dois semi ciclos da onda de entrada para geração de micro-ondas na válvula geradora. A escolha do tipo de válvula geradora depende de fatores como potência desejada, disponibilidade e eficiência. Em geral,

pode-se combinar várias válvulas geradoras usadas em fornos domésticos, do tipo magnetron (Figura 2.10), que torna o sistema de geração de alta potência mais econômico, devido à popularidade desse tipo de componente [17].

O aplicador é responsável pela exposição do material à radiação produzida pela válvula geradora. Os aplicadores podem ser do tipo aberto, como antenas ou guia fendido ou do tipo cavidade. Os sistemas de alta potência utilizam geralmente cavidades ressonantes fechadas, devido ao alto risco de exposição humana ao se utilizar aplicadores abertos.

Figura 2.9: a) Sistema de aquecimento por micro-ondas, b) equipamento tipo batelada e c) equipamento tipo contínuo.



Fonte: Modificado de Haque (1998) [15]

Figura 2.10: Magnetron, válvula comumente utilizada para geração das micro-ondas[13].



Fonte: Disponível em: <https://www.casaeletopecas.com.br/magnetron-forno-microondas-brastemp>. Acesso em 2017.

Existem dois tipos de aplicadores de cavidade que diferenciam os fornos industriais de micro-ondas em fornos batelada e contínuo, mostrados na Figura 2.9b e Figura 2.9c respectivamente.

Nos fornos tipo batelada o aplicador é uma câmara na qual a produto a ser aquecido é inserido por uma porta que dá acesso ao seu interior. Já nos fornos tipo contínuo, o aplicador tem aberturas laterais por onde o produto tem acesso ao seu interior, conduzido por uma esteira. Essas aberturas laterais são especificamente projetadas para que suas dimensões sejam menores que o comprimento da micro-onda guiada, de forma a não permitir a fuga de radiação eletromagnética para o ambiente externo. Outro método adotado para prevenir a fuga de radiação, nos fornos tipo contínuo, é a adição de uma carga de água para absorvê-las nas duas extremidades. É importante salientar que devido sua construção, o forno tipo contínuo geralmente faz uso de uma maior quantidade de magnetrons, uniformemente distribuídos ao longo do aplicador por onde passa a esteira.

Na Figura 2.11 é ilustrada a aplicação de secagem de madeira utilizando os dois tipos de fornos à micro-ondas, tipo contínuo em 'a' e tipo batelada em 'b'.

Figura 2.11: Secagem de madeira em forno de micro-ondas a) tipo contínuo e b) tipo batelada.



a)

b)

Fonte: GRANDETEC (2017) [15]

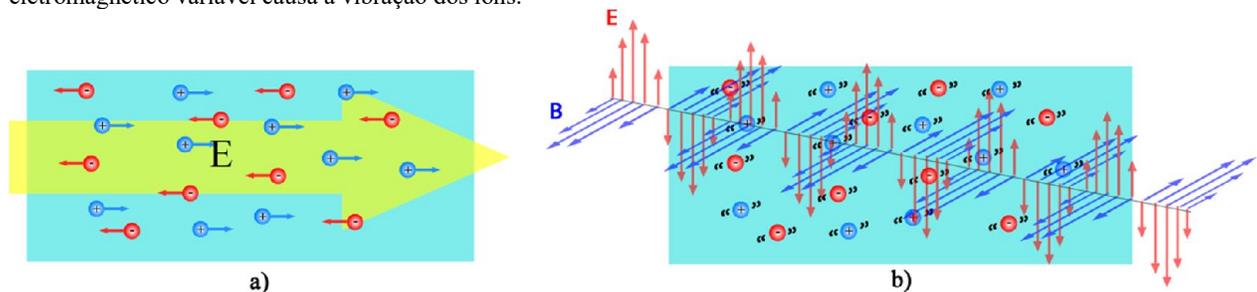
2.3 PRINCÍPIO DE AQUECIMENTO POR MICRO-ONDAS

O mecanismo de aquecimento por micro-ondas ocorre por dois processos que podem acontecer simultaneamente ou não: condução iônica e rotação de dipolos.

2.3.1 Condução iônica

A condução iônica ocorre quando existem íons dissolvidos em uma solução, como por exemplo o cloreto de sódio (NaCl) dissolvido em água. Sob ação do campo elétrico os íons positivos (por exemplo o Na^+) tendem a migrar para regiões onde aponta o campo elétrico e os íons negativos (por exemplo Cl^-) se deslocam em sentido oposto, como mostra a Figura 2.12a. Na incidência de uma onda eletromagnética de alta frequência, ilustrado na Figura 2.12b, esses deslocamentos são variáveis e em velocidade, assim os íons começam a vibrar a fim de acompanhar a variação do campo. Dessa forma, o atrito, resultante da resistência ao deslocamento dos íons oferecidos pelas moléculas da solução, acabam por aquecer o material [21], [22].

Figura 2.12: Condução iônica em um a) campo elétrico fixo causa migração dos ions e em uma b) onda eletromagnético variável causa a vibração dos ions.



a)

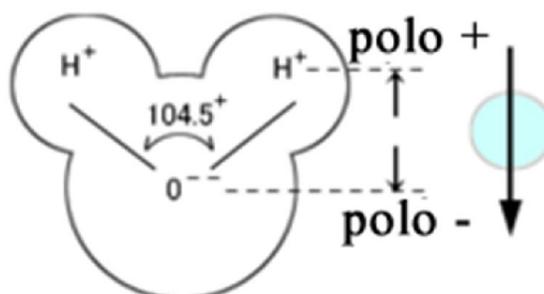
b)

Fonte: O autor (2017)

2.3.2 Rotação dipolar

O mecanismo de rotação dipolar é o principal meio responsável pelo aquecimento utilizando micro-ondas e ocorre em materiais que possuem moléculas polares, como a água. A molécula de água (H_2O) possui uma geometria espacial no formato de ‘V’ no qual, devido à diferença de eletronegatividade² de cada elemento, é formada uma extremidade positiva, os átomos de hidrogênio, e outra negativa, o átomo de oxigênio. Esse dipolo é representado por um vetor que aponta para a extremidade que concentra maior eletronegatividade, mostrado na Figura 2.13 [22].

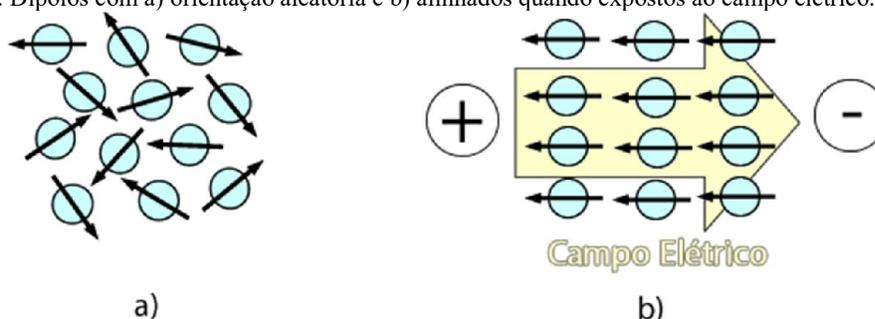
Figura 2.13: Estrutura de uma molécula de água e representação por um vetor de dipolo.



Fonte: Modificado de MICROESHI CO. (2017) [22]

Naturalmente os dipolos não apresentam orientação definida e apontam para direções completamente aleatórias. Porém, ao serem expostos ao campo elétrico os dipolos tendem a se alinhar na direção oposta do campo, como mostrado na Figura 2.14b.

Figura 2.14: Dipolos com a) orientação aleatória e b) alinhados quando expostos ao campo elétrico.

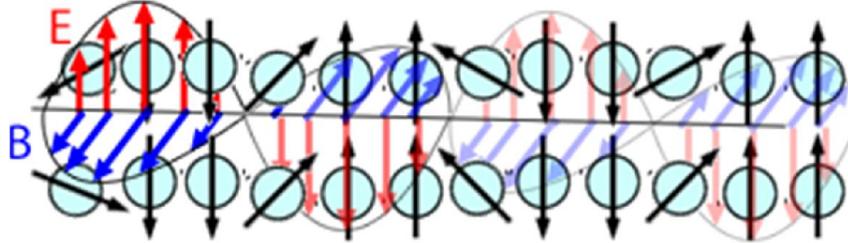


Fonte: O autor (2017)

² A eletronegatividade é definida como a força que determinado átomo possui de atrair os elétrons de uma ligação covalente para si.

Quando é aplicada uma onda eletromagnética variável, os dipolos se alinham de acordo com a direção do campo elétrico, o seguindo. Essa oscilação dos dipolos, mostrada na Figura 2.15, causa atrito entre as moléculas, e caso a radiação eletromagnética tenha uma frequência alta suficiente (faixa de frequência de micro-ondas) irá causar o aquecimento do material [21], [22].

Figura 2.15: Oscilação dos dipolos com aplicação de micro-ondas.



Fonte: O autor (2017)

2.3.3 Propriedade eletromagnética dos materiais

A extensão desses efeitos moleculares causados pelas ondas eletromagnéticas é medida pela permissividade elétrica de um material (ϵ), definida pela Equação (1), no qual ' ϵ_r ' é a permissividade relativa e ' ϵ_0 ' é a permissividade do espaço livre que vale aproximadamente $8,854 \times 10^{-12}$ F/m [23], [24].

$$\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0 \quad (1)$$

A permissividade relativa ' ϵ_r ' é uma grandeza física intrínseca ao material e descreve a resposta a um campo elétrico aplicado, ou seja, mede o quanto uma onda é afetada ao atravessar esse material. Entretanto essa resposta muitas vezes não é instantânea e possui uma defasagem, o que faz com que essa medida tenha uma natureza complexa, descrita na Equação (2) [23], [24].

$$\epsilon_r = \epsilon_r' - j\epsilon_r'' \quad (2)$$

A parte real (ϵ_r'), ou **constante dielétrica**, determina o quanto da energia eletromagnética aplicada é refletida pelo material e quanto é armazenada. A parte imaginária (ϵ_r'') é chamada de **fator de perda** que é a propriedade relacionada a energia que é perdida no

material e acaba sendo dissipada em forma de calor [25]. A perda de energia na forma de calor está relacionada à condutividade elétrica do material, sendo esta inversamente proporcional ao fator de perdas.

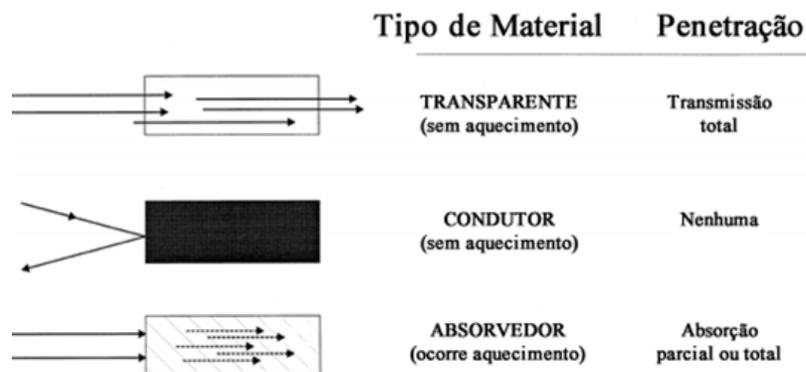
Um indicador que mede as perdas no material é chamado de **tangente de perdas** ou **perdas dielétricas**, que é bastante importante para mensurar a eficiência do aquecimento por micro-ondas, determinada pela Equação (3).

$$tg\delta = \frac{\epsilon_r''}{\epsilon_r'} \quad (3)$$

Sendo assim, um bom material que permite a conversão de energia das micro-ondas em energia térmica deve possuir um alto fator de perda e uma moderada constante dielétrica, ou seja, uma alta tangente de perdas.

As características eletromagnéticas dos materiais podem ser analisadas a partir da sua constante dielétrica. A Figura 2.16 apresenta três tipos de material, diferentes por suas propriedades dielétricas. No primeiro tipo, a condutividade se aproxima de zero e a onda atravessa o mesmo, praticamente sem perdas. Esse é o tipo do material transparente. No segundo tipo, considera-se a condutividade muito elevada. Nesse caso nenhum campo penetra no material e toda a energia é refletida na superfície ou transformada em corrente no material. Este é o efeito da propagação em condutores. Por fim, no terceiro caso, considera-se a condutividade finita e a onda eletromagnética atravessa o material com perdas. Este tipo de material é conhecido como sendo absorvente a ondas eletromagnética [19].

Figura 2.16: Interação de micro-ondas com tipos de materiais.



Fonte: Modificado de Haque (1998) [19]

Entretanto materiais com baixa perda podem ser aquecidos por micro-ondas utilizando a técnica de adição de um “facilitador”, um bom absorvedor como a água, que irá aquecer e consequentemente, por condução, aquece o material transparente ou condutor.

A Tabela 2-1 apresenta valores de tangente de perdas de alguns materiais medidos a uma frequência de 3 GHz [26], onde é possível observar que a água se destaca por ter perdas bastante elevadas. Os valores, entretanto, podem sofrer variações dependendo da concentração e impurezas contidas em cada material.

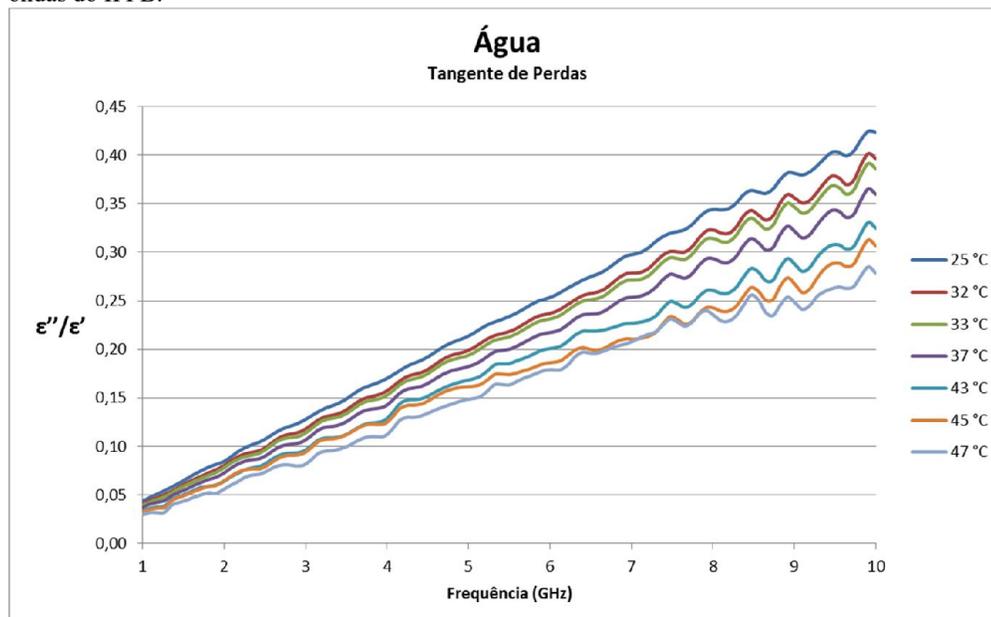
Tabela 2-1: Medida de tangente de perdas efetuada a 3GHz.

Material	Temperatura (°C)	Tangente de Perdas ($\text{tg}(\delta) \times 10^4$)
Água	25	1570
Quartzo fundido	25	0,6
Cerâmica F-66	25	5,5
Vidro borossilicato	25	10,6
Vidro fosfatado	25	46
Sílica	25	0,6
Porcelana nº 4462	25	11
Plexiglass	27	57
Nylon 66	25	128
Cloreto de polivinila	20	55
Polietileno	25	3,1
Polipropileno	25	2
Poliestireno	25	3,3
Teflon PTFE	25	1,5
Teflon PFA	25	1,5

Fonte: Nogueira (2004) [26]

As propriedades eletromagnéticas dos materiais variam com outros fatores, como frequência, densidade e temperatura. Em geral, os materiais apresentam um aumento da tangente de perdas com o aumento da frequência. Este comportamento não corresponde ao observado para a constante dielétrica para o mesmo material, podendo esta diminuir com o aumento da frequência. A Figura 2.17 mostra a variação da tangente de perdas para água, para frequências entre 1 e 10 GHz e variando a temperatura entre 25 a 47°C. Pode ser verificado o aumento do valor da tangente de perda com a frequência e a redução da mesma com a elevação da temperatura. Os valores foram medidos com auxílio do conjunto de medições 85070 da Keysight, usando o VNA E5071C do mesmo fabricante.

Figura 2.17: Tangente de perdas de amostra de água em temperaturas diferentes. Medição feita no laboratório de micro-ondas do IFPB.



Fonte: O autor (2017) [27]

2.3.4 Profundidade de penetração

Em aplicações industriais de micro-ondas, não basta um material ser um bom absorvente ou que possua bastante umidade para que haja um bom aquecimento. Um importante fator que influencia a eficiência desse aquecimento é a profundidade de penetração das micro-ondas. A profundidade de penetração do campo varia de forma inversamente proporcional a sua condutividade elétrica (e conseqüentemente a tangente de perdas).

Em altas frequências existe uma alta velocidade de aquecimento, no entanto a absorção das micro-ondas ocorre em sua maior parte na superfície mais externa do material, não chegando a aquecer o interior. Isso gera um aquecimento localizado, o que é interessante para outras aplicações que exigem um aquecimento seletivo como corte, perfuração e demolição de materiais dielétricos duros, para os quais o aquecimento de micro-ondas localizado é usado para gerar tensões térmicas [17].

Na secagem o importante é haver um aquecimento no material como um todo. Para tanto, são usadas frequências menores da faixa de micro-ondas, de forma que a onda tenha um comprimento que seja capaz de atravessar a espessura dos materiais que usualmente são processados, gerando um aquecimento volumétrico e uniforme em todo o material. Isso justifica

a utilização da frequência de 2,45 GHz em fornos micro-ondas tanto domésticos quanto industriais [17], [26].

2.4 REGULAMENTAÇÃO DO USO DE FREQUÊNCIA DE ONDAS ELETROMAGNÉTICAS

A banda de micro-ondas compreende a faixa de frequências do espectro radioelétrico entre 1 e 300 GHz. Esta faixa é utilizada no Brasil para alocação de diversos serviços de telecomunicações, incluindo os sistemas de comunicações móveis, comunicação via satélite, links de rádio digital, dentre outros. Assim, se faz necessário determinar frequências específicas para uso em aplicações que incluem secagem e outros processos industriais, evitando interferências nas comunicações. Dessa forma, a Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL), responsável pela regulação do uso do espectro de rádio frequências, publicou em 2016 o Plano de Atribuição e Distribuição de Faixas de Frequência, no qual define quais faixas são destinadas às Aplicações Industriais, Científicas e Médicas (ISM – Industrial, Scientific and Medical) [28]:

- 6,77-6,80 MHz
- 13,55-13,57 MHz
- 26,96-27,28 MHz
- 40,66-40,70 MHz
- 433,05-434,79 MHz
- 902-928 MHz na Região 2³
- 2,4-2,5 GHz
- 5,725-5,875 GHz
- 24-24,25 GHz
- 61-61,5 GHz
- 122-123 GHz,
- 244-246 GHz

Dentro do rol de frequências ISM, as mais comumente utilizadas em aplicações para aquecimento por micro-ondas estão entre 1 e 10 GHz [17]. Tendo em vista o perfil e a finalidade

³ A União Internacional de Telecomunicações (UIT) divide o globo terrestre em três regiões para fins de administração do espectro de radiofrequências. A Região 2 é constituída pelas administrações dos países das Américas, entre os quais está a do Brasil [28].

deste trabalho, estas serão então as faixas de frequências que poderão ser utilizadas para as medições feitas ao longo deste trabalho.

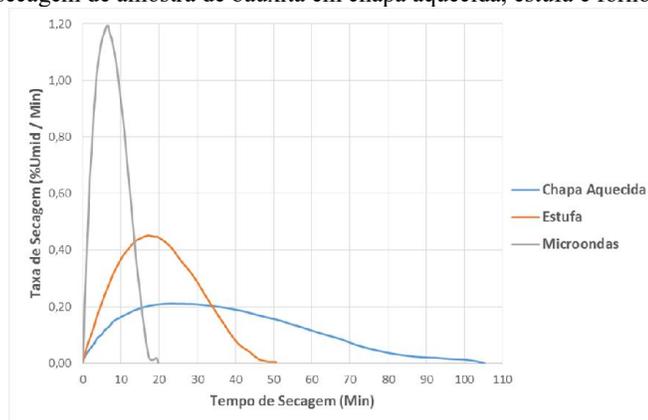
2.5 A SECAGEM

A secagem tem a finalidade de eliminar um líquido volátil, no caso a água, contido num corpo não volátil, no caso caulim e bentonita, através de evaporação. Durante a secagem é necessário um fornecimento de calor para evaporar a umidade do material. No processo convencional de aquecimento, a energia é transferida para o material por convecção, condução ou por radiação de algum material externo, o que caracteriza uma lenta transferência de energia. No aquecimento por micro-ondas a energia é entregue diretamente ao material por meio de interações moleculares, como visto no item 2.3, em um processo de aquecimento muito mais rápido que o convencional, como comprovado por Magalhães (2002) em um estudo no qual avalia diferentes processos de secagem de bauxita, mostrado no gráfico da Figura 2.18 [29].

Os principais mecanismos de aquecimento dielétrico incluem a radiação (como no interior de uma estufa), condução (como uma chapa aquecida) e convecção (transporte de matéria devido a diferença de densidade). Em alguns processos são usados dois ou mais desses mecanismos para aquecer o material. No caso em tela, a secagem dos minérios é efetuada em fornos a lenha, que transfere calor por radiação a uma chapa quente que, por condução, transfere o calor ao material.

O gráfico da Figura 2.18 mostra o comportamento da secagem de bauxita utilizando 3 métodos diferentes: Chapa aquecida, estufa e micro-ondas. É possível perceber que a velocidade de secagem em micro-ondas cresce muito mais rapidamente no início do processo, se comparado com as demais. Em seguida, ocorre um trecho em que ela cai rapidamente [29].

Figura 2.18: Curva de secagem de amostra de bauxita em chapa aquecida, estufa e forno de micro-ondas.



Fonte: Magalhães (2002) [29]

Na secagem, a profundidade de penetração das micro-ondas e sua taxa de aquecimento dependem de propriedades dielétricas do sistema, as quais podem variar significativamente com a quantidade de água e o formato do conteúdo. Quando a umidade é baixa ou quando se encontra localizada mais internamente, maior é a dificuldade para o aquecimento.

No estudo de Magalhães (2002), o aquecimento por micro-ondas mostrou-se ser o processo mais rápido de secagem, entretanto quando a quantidade de água diminui, ou quando ela se encontra menos na região superficial, a taxa de secagem se torna muito mais baixa que os demais métodos. Outro ponto que contribui para a redução da eficiência no caso do uso de micro-ondas é a queda da tangente de perdas da água assim que ocorre elevação das temperaturas, constatados no item 2.3.3 desse trabalho. Nesse caso, a utilização de outro método na fase final do processo tornaria o processo ainda mais eficaz.

2.6 VANTAGENS DA UTILIZAÇÃO DE MICRO-ONDAS NO PROCESSO DE SECAGEM

Como visto no item 2.5 desse trabalho, a secagem por micro-ondas proporciona um processo de aquecimento rápido, isso porque a energia é entregue diretamente a carga a ser aquecida, na velocidade da luz, iniciando na carga e não de fora para a carga. O aquecimento direto reduz perdas e faz com que o trabalho seja mais eficiente que o aquecimento convencional. Além disso, podem ser destacados outros benefícios elencados a seguir [22], [30].

2.6.1 Resposta rápida

Nos fornos a lenha, até que se alcance uma temperatura alta suficiente para a secagem do material é demandado muito tempo, se tornando um dos grandes problemas no aquecimento convencional. Na utilização de micro-ondas, a inicialização do processo é instantânea, assim como também sua finalização.

2.6.2 Automação e controle do processo

Uma vez iniciado o aquecimento nos fornos a lenha, ele só é finalizado quando o combustível é esgotado. Diferentemente, com utilização de micro-ondas o processo é finalizado a partir do momento em que o comando de desligamento é acionado. Isso traz total controle sobre o processo de secagem, podendo haver inclusive controle de temperatura do sistema evitando a queima do material, incidente esse totalmente indesejado pois interfere diretamente na sua qualidade.

2.6.3 Segurança operacional e de ambiente de trabalho

Além da falta de segurança inerente a falta de controle do processo, os métodos convencionais de aquecimento aumentam a temperatura não só do objeto, mas também do forno inteiro e conseqüentemente do ambiente externo por radiação do combustível utilizado, trazendo riscos operacionais para os trabalhadores e também de condições insalubres para o trabalho. Tendo em vista que os fornos de micro-ondas utilizam apenas energia elétrica para tal fim, apenas a temperatura do objeto cresce e não do forno como um todo.

2.6.4 Energia limpa e eficiente

Considerando que não há emissão de gases, pois é consumido apenas energia elétrica, a utilização de micro-ondas é um processo limpo e que não agride o meio ambiente. Somando isso à excepcional eficiência dos geradores de micro-ondas (aproximadamente 80% dependendo da frequência), torna os secadores a micro-ondas em um potencial substituto aos convencionais métodos de aquecimento [17].

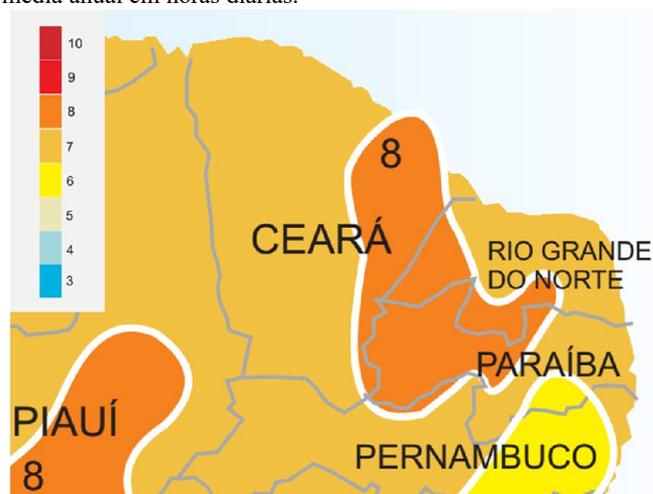
2.7 GERAÇÃO FOTOVOLTAICA – ALTERNATIVA ENERGÉTICA

Apesar das vantagens citadas até este ponto, a utilização de micro-ondas como solução tecnológica da secagem apresenta um empecilho que pode torná-la pouco atraente. O consumo de energia elétrica das válvulas de micro-ondas em geral é grande devido à alta potência. Um problema que poderá dificultar sua implantação.

A Resolução Normativa da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) nº 482/2012 permite que o consumidor brasileiro gere sua própria energia elétrica a partir de fontes renováveis e inclusive fornecer o excedente para a rede de distribuição de sua localidade. Trata-se da micro e da mini geração distribuídas⁴ de energia elétrica [31]

Uma excelente alternativa para geração própria é a energia fotovoltaica. Pesquisas conduzidas por Ricardo Rütther (2004) [32] apontam que o local com menor potencial de geração de energia fotovoltaica no Brasil gera 30% mais energia quando comparado com a área de maior potencial da Alemanha, reconhecida como exemplo de utilização dos recursos renováveis, o que mostra um potencial disponível bastante satisfatório. A Paraíba, mais especificamente na região de localização das mineradoras de caulim e bentonita, apresenta uma insolação média anual de 8 horas diárias, as maiores do Brasil segundo o atlas solarimétrico brasileiro [9], como mostra o recorte do Anexo B na Figura 2.19.

Figura 2.19: Insolação média anual em horas diárias.



Fonte: Modificado de CEPTEL/ELETRONBRAS (2000) [9]

⁴ Geração distribuída é a geração em pequena escala, próxima ao centro de carga com opção de comprar ou vender com a rede. A geração próxima à carga permite a diminuição das perdas associadas ao transporte de energia elétrica, além de uma maior diversificação das tecnologias empregadas para produção de energia, contribuindo para desafogar o sistema elétrico e barateando os custos.

Além da disponibilidade do recurso na Paraíba, os sistemas fotovoltaicos praticamente não requerem manutenção e funcionam por décadas, no qual a vida útil dos painéis chega a ser superior a 30 anos. A facilidade de instalação é outro ponto a ser destacado, pois os sistemas fotovoltaicos requerem menos componentes quando comparado com a geração eólica influenciando inclusive no custo do investimento [33].

A tecnologia fotovoltaica para geração de energia elétrica pode ter aplicações em sistemas isolados, fazendo uso de baterias para armazenar a energia (como por exemplo, em comunidades rurais não atendidas pela rede elétrica), ou conectado diretamente na rede elétrica, são os Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede (SFCR)

Um SFCR permite que o consumidor, nesse caso denominado de acessante ao sistema, possa gerar sua própria energia com a vantagem de que não há necessidade de armazenar o excesso gerado, pois o mesmo é injetado na rede elétrica. Essa energia trocada com a rede é contabilizada num sistema de compensação do consumo através de um medidor bidirecional. O sistema de compensação define que a energia ativa injetada pela unidade consumidora é cedida, como um empréstimo gratuito, à distribuidora local e posteriormente compensada com o consumo de energia elétrica ativa dessa mesma unidade consumidora ou de outra unidade de mesma titularidade. Caso a geração seja maior que o consumo, são atribuídos créditos ao acessante com validade definida que poderão ser utilizados quando a geração for menor que o consumo.

Neste trabalho, será adotada a aplicação de um SFCR para alimentar as instalações das mineradoras, funcionando em paralelo com a alimentação da concessionária. Isso significa que mesmo que o secador não esteja sendo utilizado a energia gerada estará sendo injetada na rede, produzindo créditos que compensarão o seu uso posteriormente, inclusive a noite, quando não haverá geração fotovoltaica.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este estudo envolve o levantamento de informações, com a finalidade de contribuir para o desenvolvimento do projeto para um secador de minérios não ferrosos como o caulim e bentonita assistido por micro-ondas. A pesquisa foi desenvolvida no Laboratório de Medidas em Telecomunicações do GTEMA/IFPB – Campus João Pessoa, envolvendo o estudo calorimétrico da secagem dos minérios, caracterização experimental dos parâmetros eletromagnéticos dos minérios estudados e estudo do balanço energético do processo de secagem, de forma a verificar a eficiência do processo de secagem assistida por micro-ondas e contribuir para o dimensionamento de um secador industrial.

As medições da constante de dielétrica relativa (ϵ_r') e da tangente de perdas ($\tan\delta$) foram realizadas com auxílio do Analisador de Redes Vetorial (VNA), modelo E5071C, e do conjunto de medições de dielétricos do 85070, ambos fabricados pela Keysight. Para o estudo do balanço energético do processo de secagem foi utilizado o forno micro-ondas convencional marca Electrolux, modelo MEF41 (mesmo aparelho utilizado em todos os testes e operação de secagem ao longo de todo o trabalho), cujas especificações técnicas estão descritas na Tabela 3-1.

Tabela 3-1: Especificações técnicas do forno micro-ondas utilizado nos experimentos, marca Electrolux, modelo MEF-41.

Capacidade (L)	41
Tensão Nominal (V)	220 ~60Hz
Corrente (A)	7,9
Potência de Consumo (W)	1500
Frequência de micro-ondas (MHz)	2450

Fonte: Manual do equipamento.

Toda a metodologia visou coletar dados que contribuíssem para o projeto e comprovação de seus benefícios. Dessa forma, o estudo seguiu mediante as seguintes etapas operacionais:

3.1 LEVANTAMENTO DO MATERIAL BIBLIOGRÁFICO SOBRE A TEMÁTICA DO TRABALHO E VISITAS TÉCNICAS ÀS MINERADORAS

Essa etapa consistiu na separação e seleção de materiais relacionados à temática proposta a partir de uma busca na literatura em geral. Para tanto, foram utilizados como fonte da pesquisa: legislações, documentos normativos, livros, periódicos, artigos, monografias, dissertações e teses, disponíveis inclusive on-line. Foram extraídas citações diretas e indiretas de acordo com cada tópico a ser explorado e suas respectivas referências.

Nesse momento, também foram realizadas visitas técnicas em 3 grandes mineradoras do estado da Paraíba visando coleta de amostras, imagens e também de informações sobre o processo de produção e beneficiamento dos minérios em estudo. No laboratório da mineradora Ummio, mostrado na Figura 3.1, foram obtidas informações relevantes como percentuais de umidade, tempo de secagem, quantidade de lenha e outras referências para esse trabalho.

Esses dados foram importantes para que se pudesse ter um entendimento sobre como a tecnologia de micro-ondas poderá ser utilizada e balizar a fundamentação teórica já abordada nesse trabalho.

Figura 3.1: Laboratório de testes e misturas. Mineradora Ummio em Soledade - PB.



Fonte: O autor (2017)

3.2 CARACTERIZAÇÃO ELETROMAGNÉTICA DO MATERIAL

Os minérios estudados no presente trabalho foram caracterizados eletromagneticamente, na frequência usada nos fornos industriais de micro-ondas. Também foram efetuadas as medições do comportamento das amostras coletadas sob aplicação de ondas eletromagnéticas de 2,45GHz em um forno de micro-ondas convencional.

A caracterização da constante dielétrica e tangente de perda das amostras foi efetuada através das medições, com o objetivo principal de determinar a capacidade de absorção pelo material da potência de micro-ondas. Essa medição das propriedades eletromagnéticas do material a ser analisado tem um papel importante para prevermos o seu comportamento diante da aplicação das micro-ondas. Praticamente todas as aplicações de aquecimento por micro-ondas atuais, tanto para cozimento quanto para secagem, utilizam as frequências mais baixas da micro-ondas (916 MHz e 2,45 GHz) pois por sua boa profundidade de penetração resulta em um volumétrico e uniforme aquecimento do material. Além disso, essas frequências são reservadas para aplicações industriais (ISM).

Dessa forma, foram utilizadas as frequências de 1 à 10GHz para medições da permissividade elétrica de três amostras coletadas em três grandes mineradoras da Paraíba:

- Amostra 1: Caulim coletado na mineradora São João em Junco do Seridó – PB.
- Amostra 2: Caulim coletado na mineradora Incongel em Juazeirinho – PB.
- Amostra 3: Bentonita coletada na mineradora Ummio em Soledade – PB.

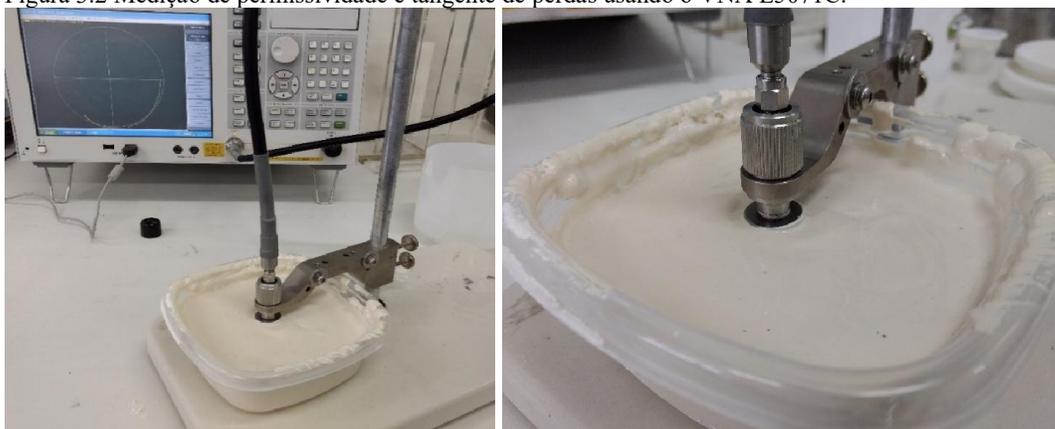
Para as medições iniciais, foram compactadas amostras de caulim e bentonita à 0% de umidade, no qual ambos revelaram valores de permeabilidade baixíssimos, próximos a do ar. Entretanto, na prática, o forno micro-ondas será utilizado com o objetivo único de reduzir a umidade do material, o que implica que os materiais sempre estarão em presença de água.

Portanto, os experimentos foram conduzidos de forma a investigar a forma como a molécula de água está ligada às moléculas de cada minério em particular, de forma a medir a energia necessária para reduzir a umidade do minério quando do seu processamento. Partindo desta premissa, iniciou-se com uma amostra completamente seca, que foi hidratada com uma quantidade medida de água, tornando a amostra com 100% de umidade. O percentual de umidade ‘h’ é calculado pela Equação (4), no qual ‘A_s’ é a massa da amostra seca (0% de umidade), ou “base seca” e ‘A’ é a massa da amostra que se deseja determinar o percentual (base úmida).

$$h = \frac{A - A_S}{A_S} \quad (4)$$

Os parâmetros eletromagnéticos da amostra, constante dielétrica e tangente de perdas são medidas com auxílio do VNA E5071C e conjunto de medições de dielétricos 85070 (Figura 3.2), iniciando com a amostra com 100% de umidade.

Figura 3.2 Medição de permissividade e tangente de perdas usando o VNA E5071C.



Fonte: O autor (2017)

Em seguida, a amostra com 100% de umidade é colocada no forno micro-ondas para secagem durante o tempo de 1 a 2 minutos, apenas para redução da umidade que é constatada pela medição de sua nova massa. Novamente são feitas medições de permissividade e tangente de perdas, repetindo o processo seguidas vezes até que o equipamento não consiga registrar medições perfeitas, devido as irregularidades na superfície da amostra gerada pela própria perda de umidade, como mostra a imagem da Figura 3.3. Isto correu tanto com o caulim, quanto com a bentonita. Ressalta-se que para as amostras completamente secas, o material apresentava constituição enrijecida, apresentando dificuldades de medições, uma vez que a sonda é recomendada para medições de materiais líquidos ou semissólidos, ou ainda materiais sólidos com superfície plana.

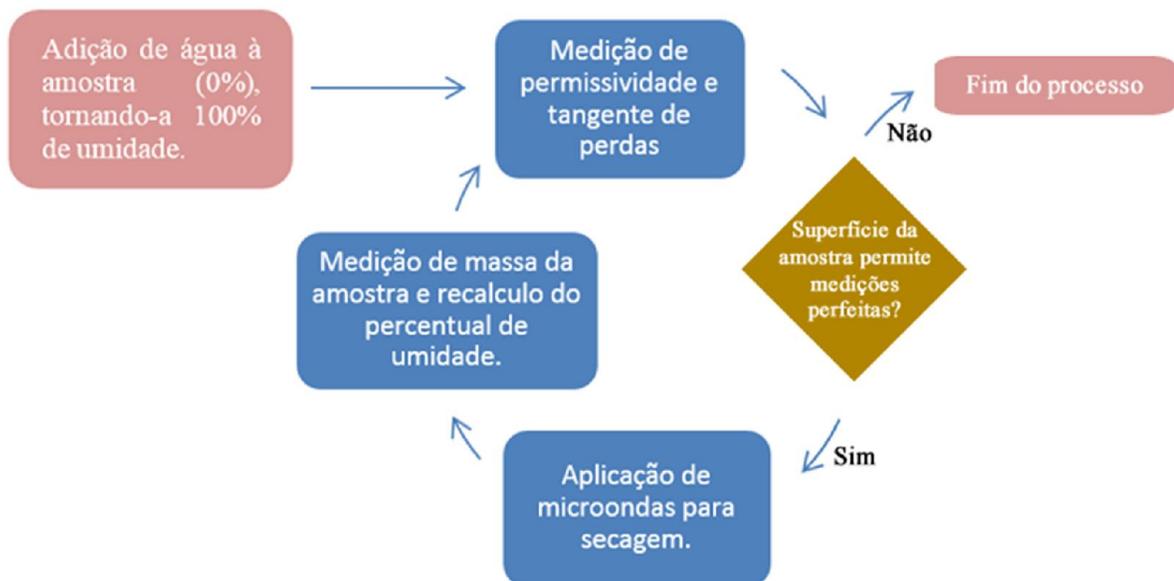
Figura 3.3: Irregularidades na superfície da amostra devido à perda de umidade



Fonte: O autor (2017)

Dessa forma, seguiu-se o processo mostrado no fluxograma da Figura 3.4, no qual foi possível obter medições de permissividade e tangente de perdas das amostras com percentuais de umidades diferentes.

Figura 3.4: Fluxo do processo para medição de permissividade e tangente de perdas para amostras com percentual de umidade diferentes. Caso o VNA não consiga fazer medições corretas devido a irregularidade da superfície das amostras, o processo é finalizado.



Fonte: O autor (2017)

3.3 DISTRIBUIÇÃO DE POTÊNCIA

Esta parte do trabalho consistiu em identificar as regiões, dentro do forno micro-ondas, de maior e menor potência eletromagnética que é irradiada pela válvula. A determinação distribuição de potência tem o objetivo principal de mostrar, de forma espacial, como a irradiação de micro-ondas é aplicada. Isso é importante para que se possa definir melhor a localização das amostras, dentro do forno, de forma a visar um melhor desempenho.

O método consiste em dispor o material a ser aquecido pelo forno em um prato (nesse caso foi utilizado caulim) e umedecê-lo em toda sua superfície uniformemente conforme mostrado na Figura 3.5a, sendo colocada no forno com prato estático por tempo suficiente para aquecê-la. Após o aquecimento foi feita uma imagem com auxílio de uma câmera térmica, para registrar o gradiente de temperaturas da amostra, processo mostrado na Figura 3.5b.

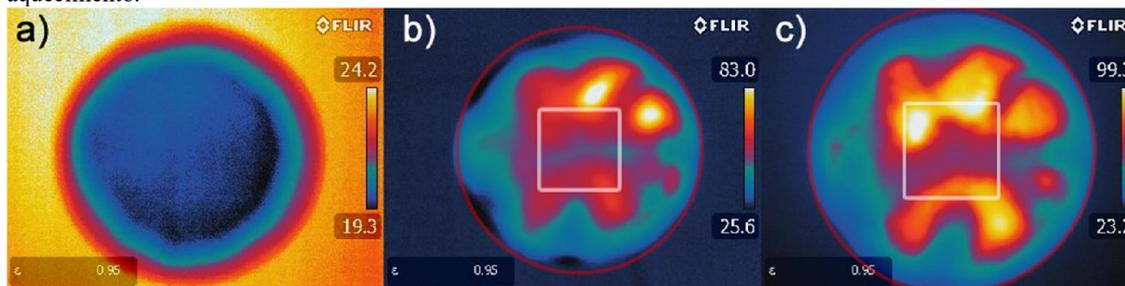
Figura 3.5: a) Processo de preparação da amostra a ser aquecida. b) Câmera térmica registrando os contrastes de temperatura.



Fonte: O autor (2017)

A Figura 3.6 mostra as imagens feita com a câmera térmica antes e após o aquecimento no forno micro-ondas, no qual os pontos mais quentes (cores mais amareladas) correspondem aos locais onde houve maior potência irradiada e os pontos menos quentes (cores azuis) os locais com menor potência irradiada. A escala de cores indicativa de temperatura está à direita de cada foto.

Figura 3.6: Imagem térmica a) antes do aquecimento, b) após 1 minuto de aquecimento e c) após 2 minutos de aquecimento.



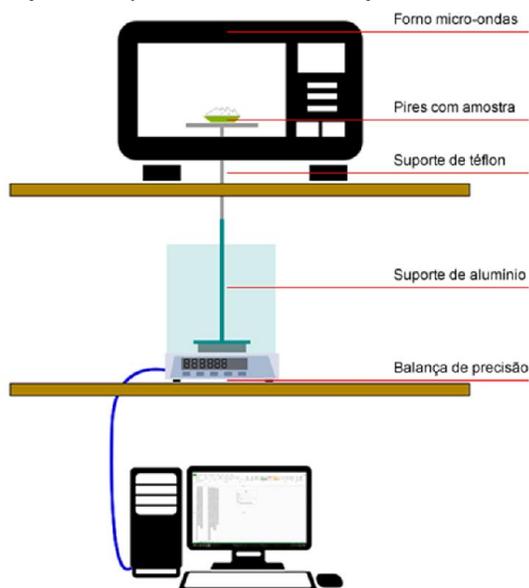
Fonte: O autor (2017)

Uma região quadrada com traçado na cor branco foi inserida nas imagens térmicas das Figura 3.6b e c, o qual delimita uma área de dimensões 10 cm x 10 cm, e representa o suporte onde estarão dispostas as amostras que serão analisadas. Dessa forma, é possível perceber que boa parte da potência de micro-ondas fornecida pelo forno será disponibilizada exatamente onde estarão as amostras, o que é bem visto, tendo em vista a necessidade de se obter resultados provenientes da aplicação de radiação. Entretanto percebe-se que há áreas em que a potência não foi absorvida o que será responsável pela redução da eficiência em testes de secagem.

3.4 CURVA DE SECAGEM DO MATERIAL

Nesta etapa foram feitas modificações em um forno de micro-ondas convencional, marca Electrolux, modelo MEF41, de forma a verificar a perda de massa da amostra ao longo do processo de secagem, que corresponde à perda de água da amostra. Foi utilizado um layout como o ilustrado na Figura 3.7. Para tanto, foi necessário retirar o pequeno motor que gira o prato do forno micro-ondas, deixando um orifício na parte inferior que dá acesso ao ambiente externo, localizado no centro, cujo diâmetro não foi alterado para não possibilitar a fuga de radiação. A massa da amostra foi medida com auxílio de uma balança semi-analítica, interligada a um computador para registrar o peso do produto a cada instante.

Figura 3.7: Layout de montagem para medição de massa durante o processo de secagem.



Fonte: O autor (2017)

Para dispor as amostras foi confeccionado um suporte de teflon, cujo material foi escolhido por ser leve e também por ser transparente em relação às micro-ondas. O suporte é composto de um bastão com diâmetro capaz de ser inserido no orifício do forno, atravessando-o. Na extremidade superior do bastão, localizada no interior do forno, encaixou-se uma placa de área 10x10 cm também de teflon, que serve de apoio para um prato contendo as amostras.

A extremidade inferior do bastão de teflon, que fica do lado externo do forno, é então encaixada em outra estrutura confeccionada em alumínio (mais leve) que está apoiado diretamente sobre uma balança semi-analítica, marca Marte, modelo AD330, localizada abaixo do forno. A Figura 3.8 traz as imagens da estrutura real configurada para realização das medições.

Figura 3.8: Estrutura montada para medição de massa instantânea durante o processo de secagem.



Fonte: O autor (2017)

O limite máximo de peso suportado pela balança é de 340g. O peso de toda a estrutura de apoio totalizou aproximadamente 132g, somado ao peso de um pires de porcelana chegou a 209g (para dispor as amostras), o que deixou um espaço de até 131g para amostras.

A balança de precisão disponibiliza os dados de medição por uma saída serial de 25 pinos. Foi confeccionado então um cabo serial adaptando a saída de 25 pinos para serial 9 pinos (que corresponde a entrada do computador), obedecendo ao diagrama de ligação recomendada pelo fabricante [34] mostrada na Figura 3.9.

Figura 3.9: Pinagem para adaptação do cabo de comunicação entre a balança de precisão (padrão DB25M) e o computador (Padrão DB9F).



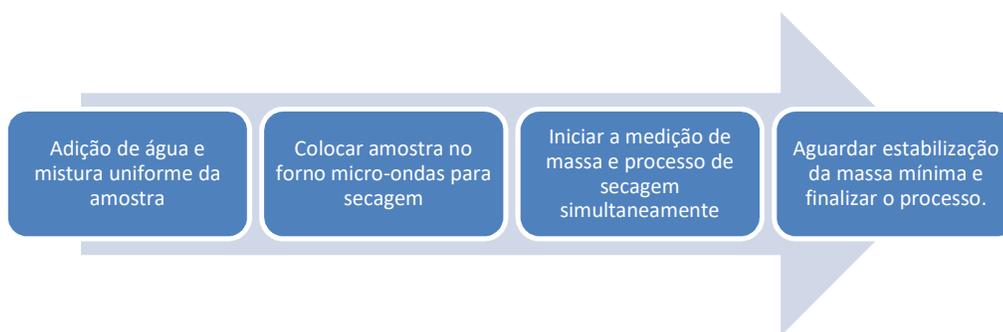
Fonte: Marte Científica (2017) [34]

Com auxílio do software ACC Keys, responsável pela leitura dos dados fornecidos pela balança na entrada serial do computador e emular comandos no teclado, as informações de massa medida eram então registrados diretamente no Excel, automaticamente, em uma interação de 5 segundos.

O objetivo foi calcular a perda de umidade do material processado em função do tempo e assim gerar a curva de secagem do material e taxa de secagem por tempo. O procedimento, ilustrado no fluxograma da Figura 2.10, consistia de adicionar água à uma amostra, misturando-

a para deixar inteiramente uniforme, totalizando 100% de umidade. Em seguida colocou-se a amostra para secagem no forno micro-ondas, no qual era observado a queda de massa até estabilizar em um valor mínimo, que corresponderia 0% de umidade.

Figura 3.10: Fluxo do procedimento para medição da curva de secagem.



Fonte: O autor (2017)

A Figura 3.11 são imagens feitas das amostras de caulim e bentonita antes e após o processo de secagem.

Figura 3.11: Amostras de caulim e bentonita a) antes do processo, b) 100% de umidade e c) após secagem com 0% de umidade.



Fonte: O autor (2017)

Esse procedimento foi repetido diversas vezes tanto para o caulim quanto para a bentonita à mesma temperatura inicial, o que gerou dados similares e consistentes. Com essas medições foi possível gerar as curvas de secagem, além da taxa de secagem.

A curva de secagem informa o percentual da umidade do produto em função do tempo. A taxa de secagem é um outro indicador que avalia a quantidade de umidade perdida em um intervalo de tempo e serve de parâmetro para determinar a eficiência do trabalho de secagem que está sendo realizado. Esse parâmetro nada mais é que a derivada da curva de secagem e é determinado pela Equação (5), no qual 'h_i' é percentual de umidade da amostra no instante atual, 'h_(i-1)' o percentual de umidade da amostra no instante anterior e 'Δt' é o tempo em minutos entre os dois instantes. No geral, quanto maior a taxa de secagem (T_S) mais rápido o percentual de umidade é perdido.

$$T_S = \frac{h_{(i-1)} - h_i}{\Delta t} \quad (5)$$

Dessa forma, com a curva e taxa de secagem disponível, é possível balizar os cálculos para estimar um cenário de maior quantidade de material processado e assim ser possível comparar com a produção que faz uso dos métodos convencionais das mineradoras.

3.5 POTÊNCIA ÚTIL DE MICRO-ONDAS

Apesar de o forno micro-ondas consumir determinada potência elétrica, apenas parte dessa energia é convertida em potência útil de micro-ondas. As atividades dessa etapa consistiram em determinar a potência disponível pelo forno que pode efetivamente ser utilizada para o aquecimento, dado importante para avaliar os custos energéticos envolvidos no processo de secagem por micro-ondas.

O calor específico (C) de uma substância é uma constante que indica a quantidade de energia (Q), em Joules, necessária para elevação da temperatura (ΔT) de uma grama desse material em 1°C, calculado pela equação (6) [35].

$$C = \frac{Q}{m \cdot \Delta T} \quad (6)$$

Por definição a potência é a energia consumida em um determinado intervalo de tempo em segundos, expressa na equação (7).

$$P = \frac{Q}{\Delta t} \quad (7)$$

Relacionando as equações (6) e (7), podemos calcular a potência despendida pelo forno para elevação de temperatura em uma quantidade conhecida de água, por meio da equação (8), no qual C é o calor específico da água ($4,186 \text{ J/g}^\circ\text{C}$), ΔT é a variação da temperatura em graus Celsius, m_i é a massa inicial da água em gramas contido no recipiente antes do aquecimento, e Δt o tempo de aquecimento em segundos.

$$P_t = \frac{C \cdot \Delta T \cdot m_i}{\Delta t} \quad (8)$$

A expressão da equação (8) calcula apenas a potência referente a energia presente na água do recipiente, responsável pela elevação da temperatura desse conteúdo, e despreza a energia despendida na quantidade de água que evaporou. Dessa forma, se faz necessário calcular a potência absorvida que causou a mudança de fase da água.

O calor latente (L), ou calor de transformação, é uma constante que determina a quantidade de energia (Q), em Joules, necessária para que uma quantidade (m), em gramas, de material mude totalmente de estado, dado pela equação (9) [35].

$$L = \frac{Q}{\Delta m} \quad (9)$$

Relacionando as equações (7) e (9), é possível calcular a potência que causou a mudança de estado da água através da equação (10), no qual L é o calor latente de evaporação da água ($2260,44 \text{ J/g}$) e Δm é a variação da massa em gramas, ou seja, a massa da água que evaporou.

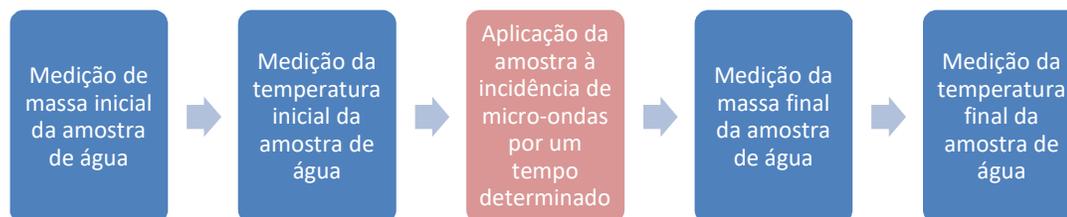
$$P_f = \frac{L \cdot \Delta m}{\Delta t} \quad (10)$$

A potência útil total em Watts gasta pelo forno micro-ondas no aquecimento da água é então calculada pela equação (11).

$$P_{\text{útil}} = P_t + P_f \quad (11)$$

Para realização dos cálculos, foi feito um experimento em laboratório utilizando água como amostra, no qual foram realizados estritamente os passos descritos no fluxograma da Figura 3.12 para obtenção dos dados. Para tanto foram utilizados uma balança de precisão e um multímetro com termopar mostrados na Figura 3.13.

Figura 3.12: Processo para obtenção de dados para cálculo da potência útil do forno micro-ondas.



Fonte: O autor (2017)

Figura 3.13: Medição de massa e temperatura da amostra de água.

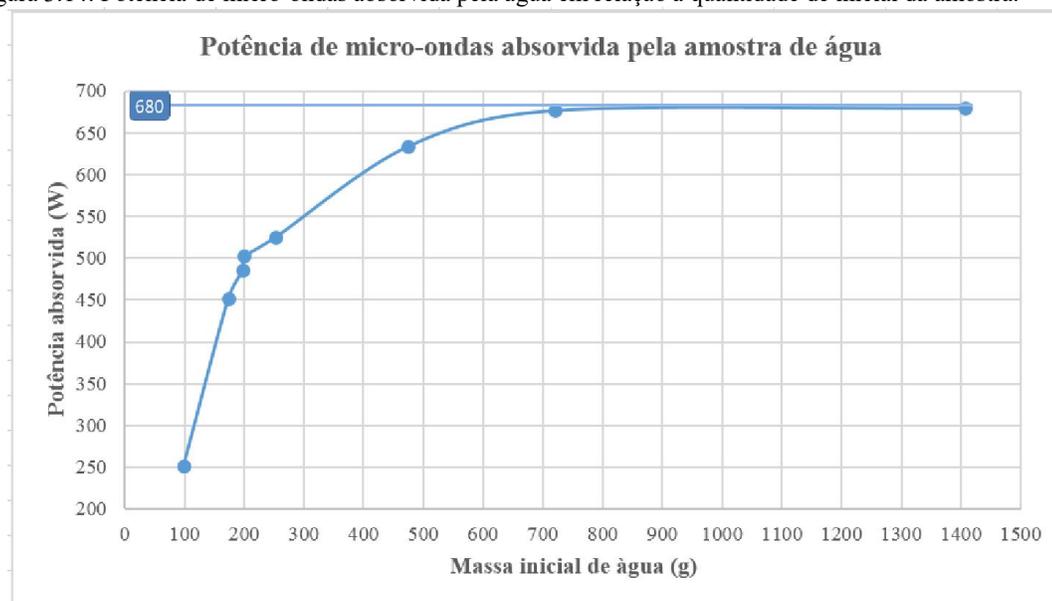


Fonte: O autor (2017)

Os procedimentos serão aplicados para determinar a energia necessária para secagem do caulim e bentonita. Com isso, pretende-se não somente fornecer subsídios para a construção de um forno industrial de micro-ondas para secagem, como dimensionar uma planta de geração fotovoltaica para alimentar o forno a ser construído. No próximo capítulo, são apresentados os resultados dos estudos e a análise dos resultados obtidos.

Foram testadas quantidades diferentes de água e o resultado é mostrado na Figura 3.14. No gráfico é possível perceber que a potência absorvida pela água é variável a depender da quantidade da amostra que é processada, com um comportamento que tende a uma estabilização em 680 W.

Figura 3.14: Potência de micro-ondas absorvida pela água em relação a quantidade de inicial da amostra.

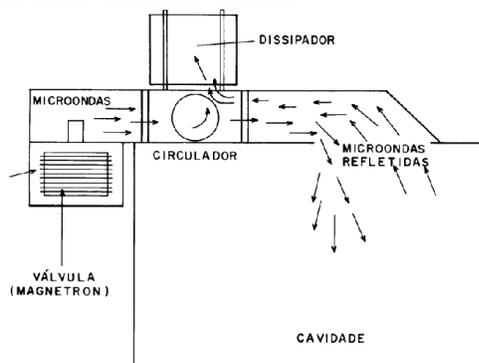


Fonte: O autor (2017)

Apesar de o resultado mostrar uma variação da potência absorvida, a potência útil fornecida pelo magnetron é um valor constante, independentemente da quantidade de amostra colocada no forno. O que ocorreu no experimento foi que as amostras em pequena quantidade não conseguiram absorver a radiação disponibilizada por inteiro.

A energia não absorvida pelo material a ser aquecido é refletida dentro da câmara do forno continuamente até que sejam absorvidas pela amostra ou retornar à válvula, superaquecendo-a podendo danificá-la. Como uma forma de proteção é adicionado em fornos industriais um dispositivo chamado circulador que impede que as ondas refletidas cheguem até a válvula, desviando-a para um dissipador [36], como ilustrado na Figura 3.15, ocasionando em uma perda de energia. Em fornos domésticos a proteção é apenas o desligamento automático da válvula quando um sensor identifica o superaquecimento.

Figura 3.15: Esquema de um forno micro-ondas convencional.



Fonte: Barboza (2001) [36]

Quando colocado material em quantidades maiores, podemos perceber, pelo gráfico da Figura 3.14, que a potência absorvida chega a um valor máximo constante de aproximadamente 680W, o que podemos concluir que esse é o valor da potência útil disponibilizada pela válvula do forno micro-ondas. Como as especificações do produto (ver Tabela 3-1), indicam que a potência elétrica nominal do forno é de 1500W, temos então que a eficiência é de 45% e que a energia consumida por esse forno é o produto entre a potência nominal e o tempo de uso.

Foi constatado uma baixa eficiência devido a fonte do forno micro-ondas utilizado fazer uso de um retificador de meia onda, o que reduz a eficiência. Apesar de existirem fontes retificadoras de onda completa, que proporcionam um melhor rendimento, todo esse trabalho foi feito considerando a eficiência de 45%.

3.6 DIMENSIONAMENTO DE UM SFCR

Como uma alternativa, foi proposta a utilização de uma planta fotovoltaica, dimensionada para suprir a utilização da tecnologia de micro-ondas, na qual será feita análise de prazo de retorno do investimento sugerido.

Em um projeto de um sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica não existe a preocupação de se alimentar a totalidade de uma carga demandada a fim de se evitar uma possível sobrecarga do sistema, uma vez que qualquer potência em excesso que venha a ser solicitada será atendida pela rede de distribuição da concessionária. Diante disso, o dimensionamento do sistema se baseia em uma análise do quanto o consumidor deseja economizar em sua conta de energia. Para tanto, é necessário calcular a demanda da unidade consumidora para definir o quanto se deseja reduzir.

Após definir a energia demandada a ser suprida pelo sistema (E_D), será possível dimensionar os módulos e em seguida o inversor mais apropriado.

Apesar de um dimensionamento correto, o sistema fotovoltaico não garante a entrega da potência projetada, pois por diversos motivos o sistema não irá fornecer uma geração constante. Porém poderá ser dimensionado um sistema com potência maior, para assegurar períodos de baixa geração, pois a energia gerada em excesso entra no sistema de compensação.

O primeiro passo é determinar o recurso solar da área na qual a planta será instalada. Para tanto, é necessário consultar a quantidade de horas que o sol está disponível e também o valor da radiação solar global em MJ/m². Os anexos B e C constantes neste trabalho, disponíveis no Atlas Solarimétrico do Brasil produzido pelo CEPEL e Eletrobrás em 2000, trazem mapas do Brasil com informações das médias anuais da insolação e radiação solar global diária, que irão ajudar no dimensionamento dos painéis fotovoltaicos [33].

Após definir o modelo do módulo fotovoltaico a ser utilizado será possível calcular, através da equação (12), a energia máxima gerada por um painel fotovoltaico, em KWhp, durante um dia (E_P), após determinar a quantidade de horas de insolação média anual (H_I), onde $P_{Máx}$ é a potência de pico do painel fotovoltaico em kWp.

$$E_P = P_{MAX} \cdot H_I \quad (12)$$

Após calcular a energia máxima gerada por um módulo (E_P) e a demanda que deseja ser atendida (E_D) poderemos então calcular o número de módulos fotovoltaicos (N) através da equação (13). Provavelmente o número encontrado não será inteiro, o valor deve ser arredondado.

$$N = \frac{E_D}{f_s \cdot E_P} \quad (13)$$

O fator de segurança (f_s) redimensiona o sistema para uma maior potência, aumentando o número de painéis, caso o local tenha um baixo valor de radiação solar, calculado pela equação (14), onde R_{SG} é a radiação solar global média anual local.

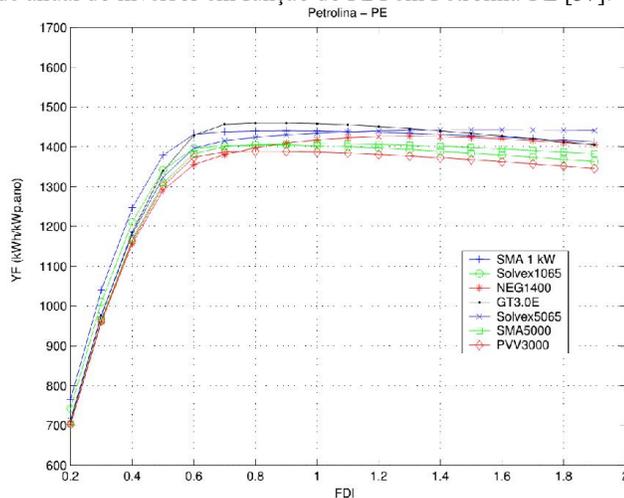
$$f_s = \frac{R_{SG} (MJ/m^2)}{24} \quad (14)$$

Na procura de um inversor para ser utilizado em um SFCR deve-se utilizar um ponto de equilíbrio entre a potência do inversor e a potência fotovoltaica utilizando o Fator de Dimensionamento do Inversor (FDI), calculado pela equação (16).

$$FDI = \frac{\text{Potência do inversor}}{\text{Potência da planta fotovoltaica}} \quad (15)$$

Devido às variações solares, o melhor FDI a ser adotado depende da latitude e condições climáticas do local. No entanto um estudo realizado por Macedo (2006) [37], no qual realizou experimentos de FDI em sete modelos diferentes de inversores em vários locais no Brasil, constatou que a diferença em termos de produtividade anual, para FDI superiores a 0,6 em um mesmo inversor, é pequena; e as perdas, para valores de FDI menores que 0,6, passam a ser significativas. O gráfico da Figura 3.16, mostra a produtividade anual dos inversores testados em função do FDI.

Figura 3.16: Produtividade anual do inversor em função do FDI em Petrolina-PE [37].



Fonte: Macêdo (2006)

O melhor dimensionamento então para o inversor seria a utilização de um FDI superior a 0,6 e orienta-se utilizar valores mais altos até 1,0 quanto mais próximo do equador for o local.

4 RESULTADOS

4.1 CARACTERIZAÇÃO ELETROMAGNÉTICA DOS MATERIAIS

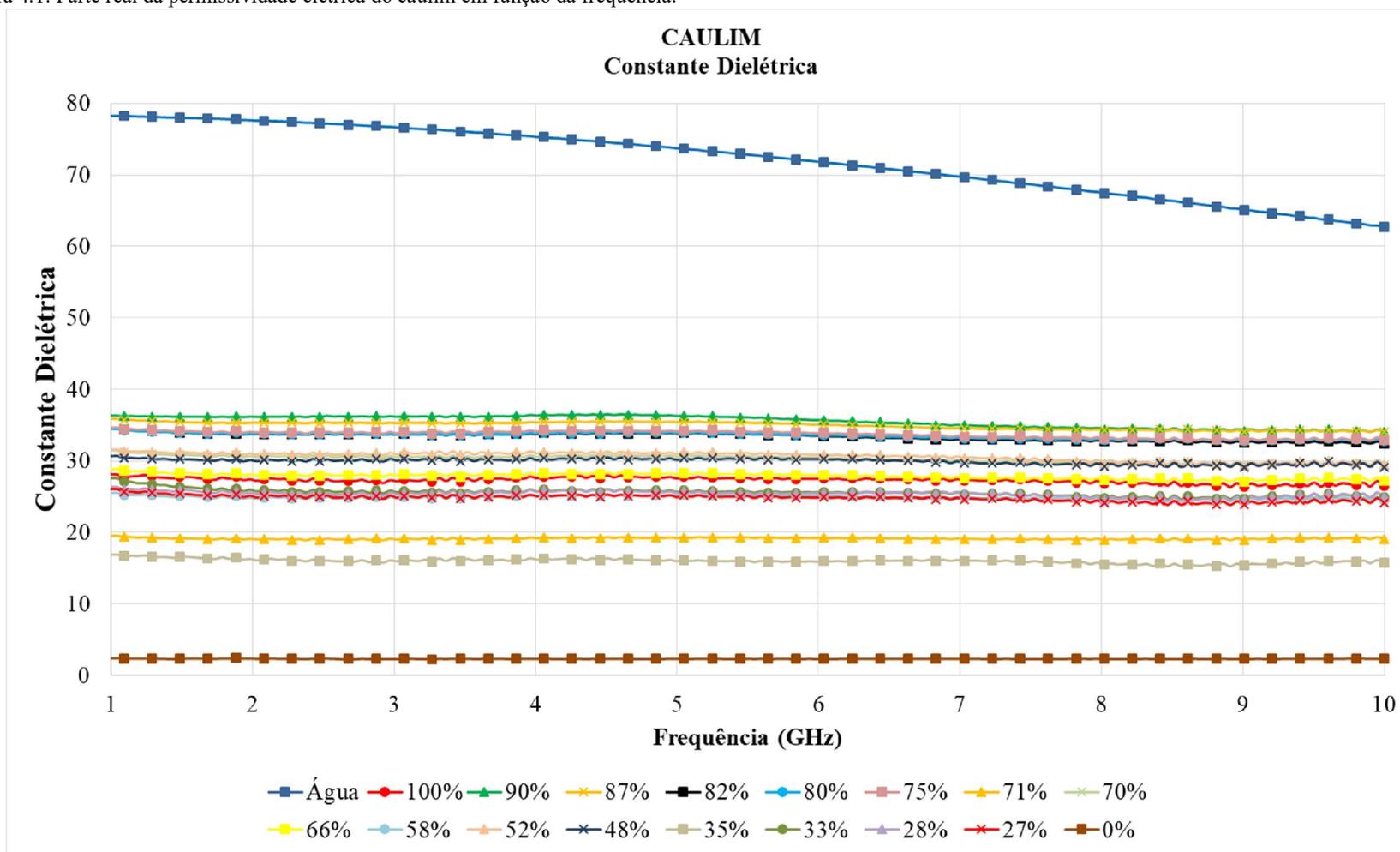
Os gráficos a seguir foram gerados como resultados das medições para caracterização eletromagnética do caulim e da bentonita. Em ambos os casos foram inseridas medições feitas em amostra de água a 25°C para servir de referencial de material que possui características de ser um bom absorvente.

4.1.1 Caulim

O gráfico da Figura 4.1 mostra a constante dielétrica das amostras de caulim com diferentes percentuais de umidade em uma faixa de frequência de 1 até 10 GHz. É possível observar que, diferentemente da água, o caulim possui uma constante dielétrica praticamente constante em toda a faixa de frequência analisada.

Foi identificado que há variações entre as medições no qual por mais que o teor de umidade fosse sempre decrescente a aferição da constante dielétrica da amostra por hora apresentava valores maiores que o anterior e em outros instantes valores menores. Isso ocorria devido a não uniformidade do aquecimento da amostra que passava a apresentar percentuais de umidade variadas em suas partes. Como a metodologia adotada não permitia mexer a amostra durante o processo para uniformizá-la (pois isso iria acarretar, inevitavelmente, na retirada de material, inviabilizando os cálculos de percentual de umidade), ao inserir a sonda, a medição acabava por determinar a constante dielétrica de uma parte com percentual de umidade diferente da amostra como um todo. Porém, apesar da variação nas medições, fica evidente que a permissividade é reduzida para reduzidos teores de umidade.

Figura 4.1: Parte real da permissividade elétrica do caulim em função da frequência.



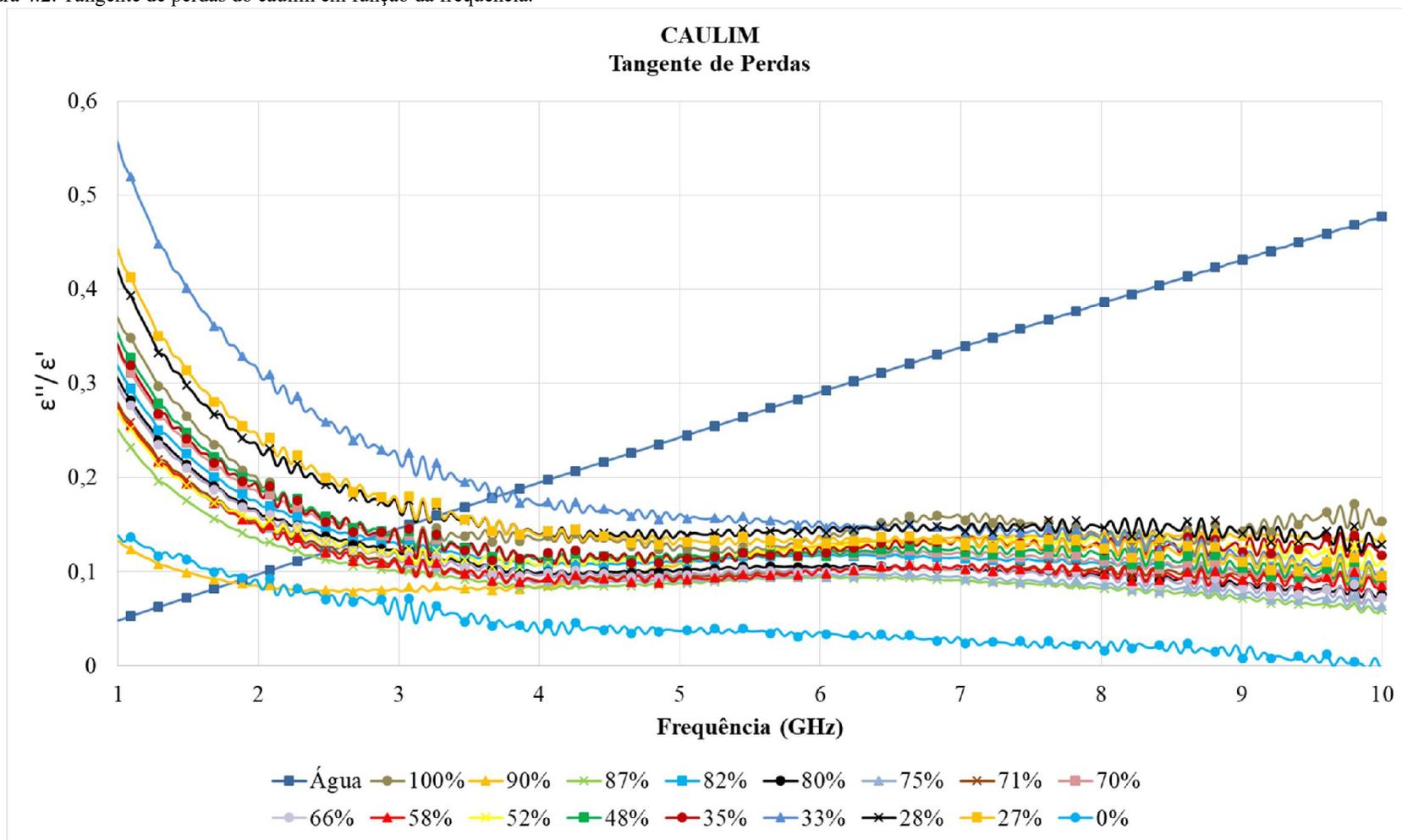
Fonte: O autor (2017)

O gráfico da Figura 4.2 mostra o comportamento da tangente de perdas de amostras de caulim com diferentes teores de umidade em uma faixa de frequência de 1 até 10 GHz. É possível perceber que, diferentemente da água, o caulim possui maiores perdas para frequências mais baixas da faixa de micro-ondas, aproximadamente até 4 GHz. Essa diferença fica também evidente no gráfico da Figura 4.3, no qual as amostras com percentuais de umidade menor que 90% apresentam maiores perdas em frequências mais baixas. É possível observar, na Figura 4.3, a transição do comportamento das amostras, quando a faixa mais escura do gráfico (correspondente as frequências mais altas) deixa de ficar na região superior do gráfico para ficar na região inferior, caracterizada por baixas perdas.

Apesar das variações nas medições, fica evidente, na Figura 4.2, que as perdas nas amostras de caulim são reduzidas quando o percentual de umidade cai. Entretanto, mesmo assim, para frequências de até 2GHz as perdas das amostras do caulim são maiores que na água.

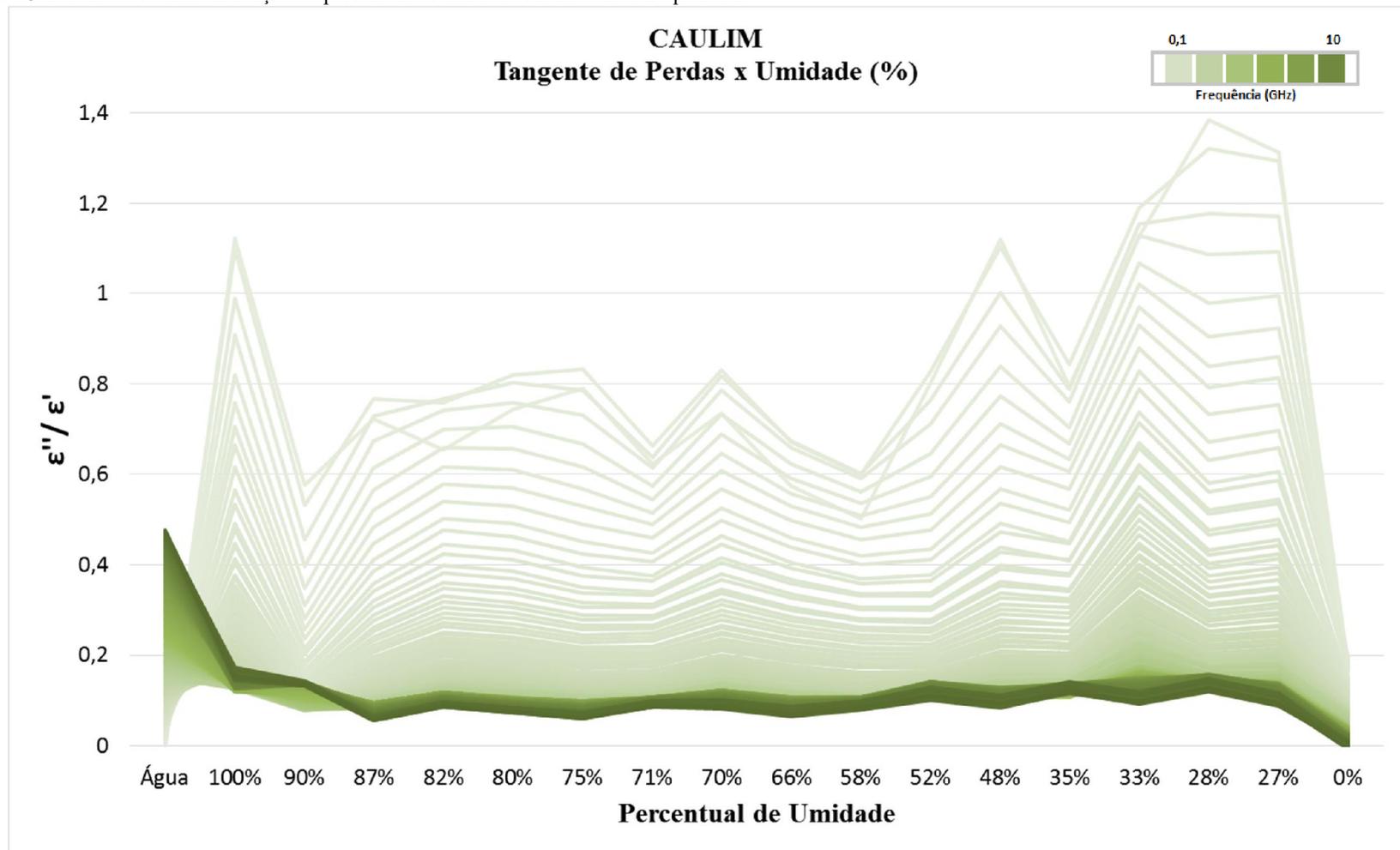
Na Figura 4.4, foram isoladas as medições de constante dielétrica e tangente de perdas para frequência de 2,45 GHz, por ser a frequência de micro-ondas radiada pela válvula magnetron do forno utilizado para secagem. No gráfico da Figura 4.4, percebe-se mais uma vez, de forma mais evidente, a redução da permissividade ao reduzir o teor de umidade. A tangente de perdas apresenta elevação quando ocorre retirada de umidade até aproximadamente 30%, quando as perdas são reduzidas a partir de então.

Figura 4.2: Tangente de perdas do caulim em função da frequência.



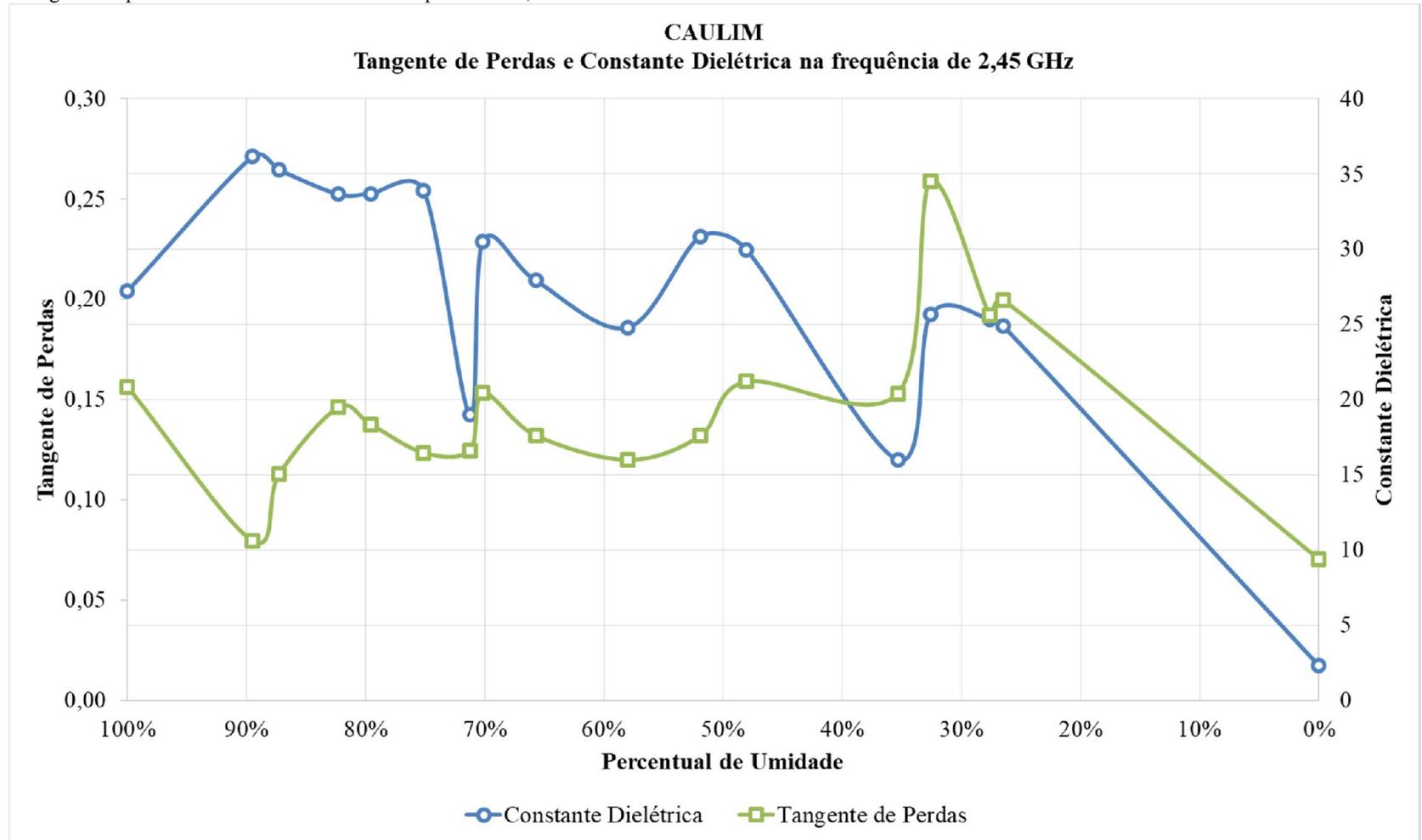
Fonte: O autor (2017)

Figura 4.3: Perdas do caulim em função do percentual de umidade em diferentes frequências.



Fonte: O autor (2017).

Figura 4.4: Tangente de perdas e constante dielétrica na frequência de 2,45 GHz.



Fonte: O autor (2017)

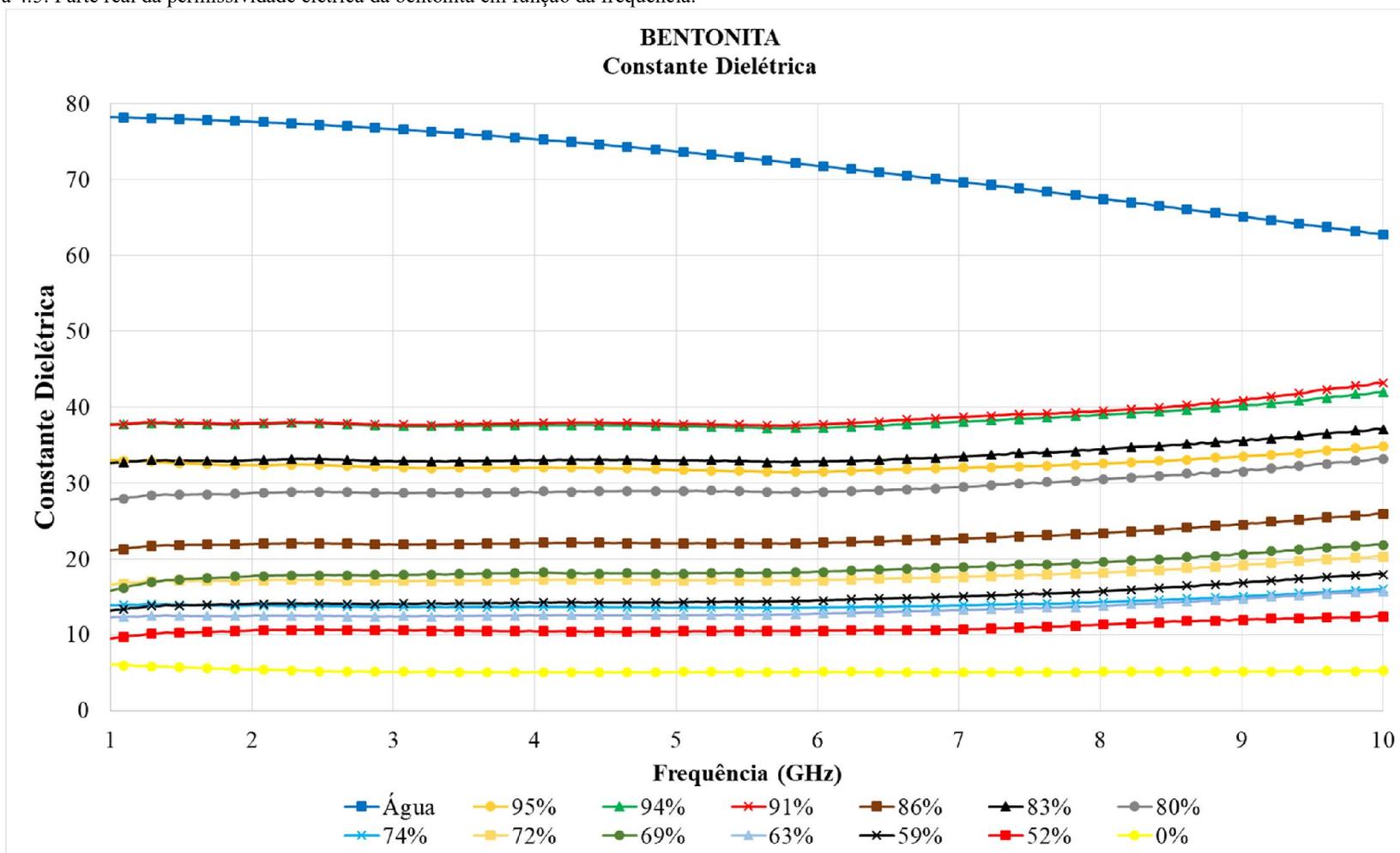
4.1.2 Bentonita

O gráfico da Figura 4.5 mostra a constante dielétrica de amostras de bentonita com diferentes percentuais de umidade em uma faixa de frequência de vai de 1 até 10 GHz. Assim como nas medições do caulim, a bentonita possui uma constate dielétrica praticamente constante em toda a faixa de frequência analisada. A permissividade também é reduzida quando o percentual de umidade cai, chegando a próximo de zero quando o material está completamente seco.

Nos demais gráficos analisados, o comportamento da bentonita também se assemelha ao caulim. Na Figura 4.6 é possível perceber que a bentonita possui maiores perdas que a água para frequências mais baixas, aproximadamente até 6 GHz. Na Figura 4.7, o gráfico mostra que as linhas de cor mais clara, correspondente as frequências mais baixas, ficam na região superior em quase todo o gráfico, invertendo apenas quando é considerada a água.

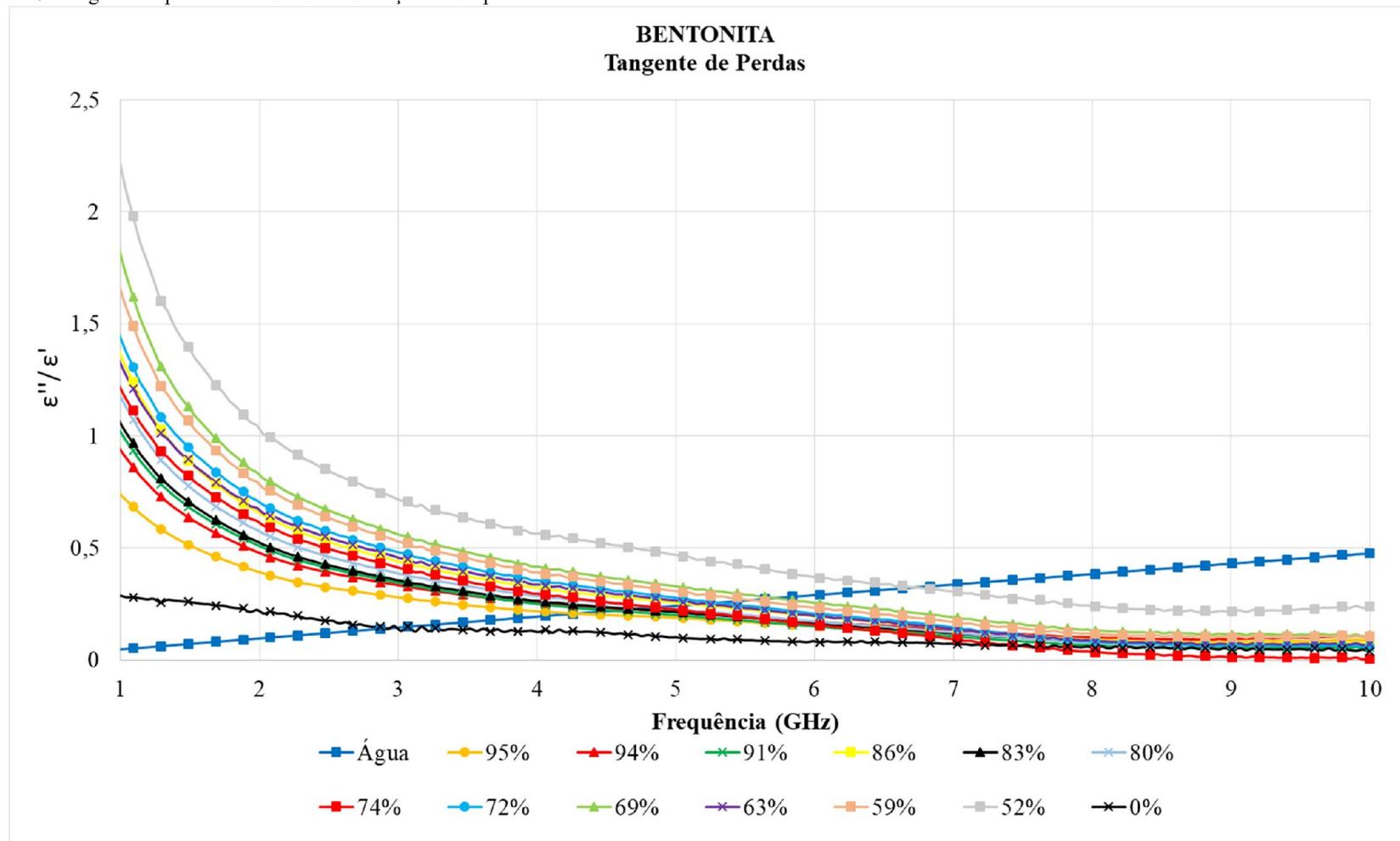
Na Figura 4.8, foram isoladas as medições de constante dielétrica e tangente de perdas para frequência de 2,45 GHz. No gráfico da Figura 4.8, percebe-se, mais evidentemente, a redução da permissividade ao reduzir o teor de umidade. A tangente de perdas apresenta elevação quando ocorre retirada de umidade até aproximadamente 55%, quando as perdas são reduzidas a partir de então.

Figura 4.5: Parte real da permissividade elétrica da bentonita em função da frequência.



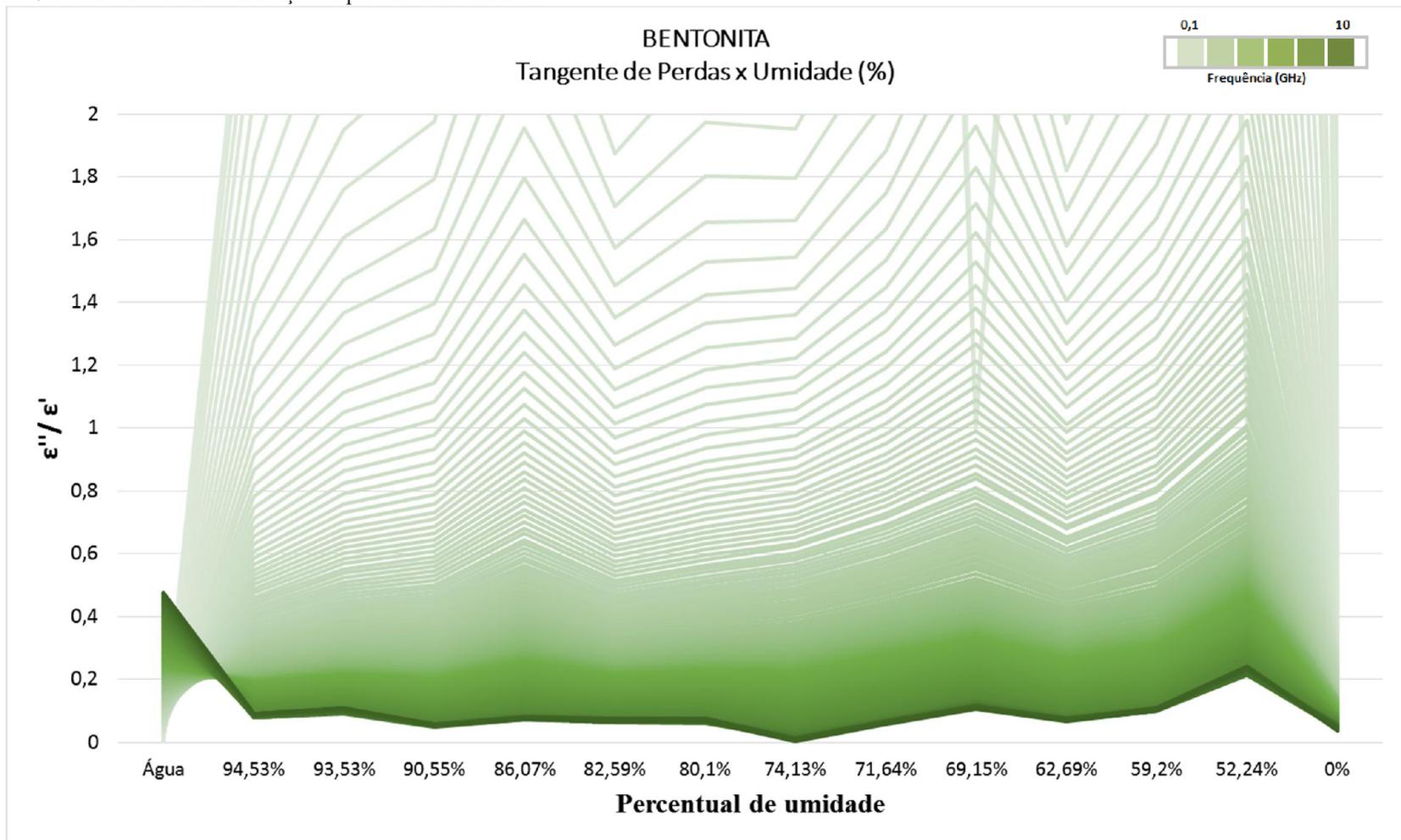
Fonte: O autor (2017)

Figura 4.6: Tangente de perdas da bentonita em função da frequência.



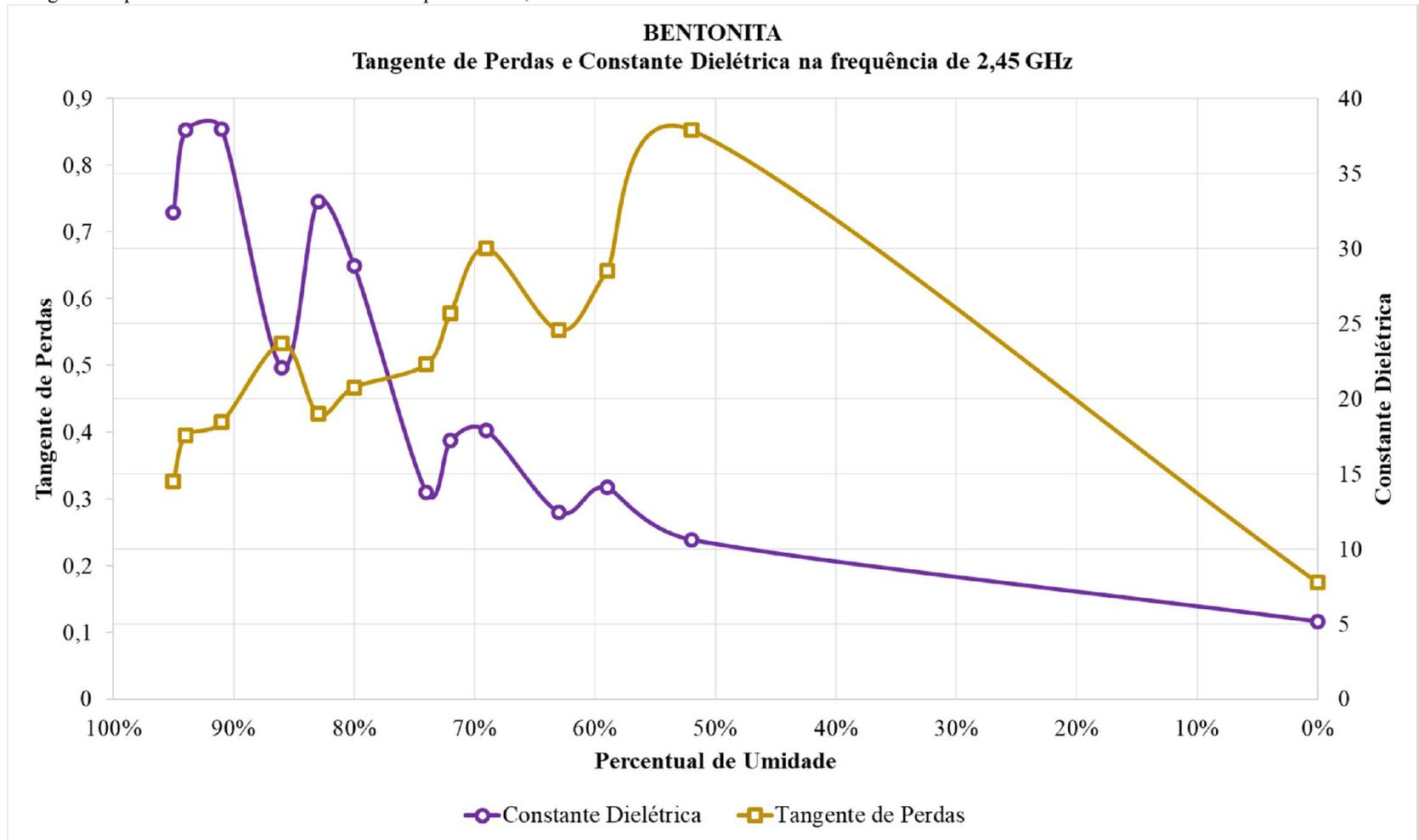
Fonte: O autor (2017)

Figura 4.7: Perdas da bentonita em função do percentual de umidade.



Fonte: O autor (2017)

Figura 4.8: Tangente de perdas e constante dielétrica na frequência de 2,45 GHz.



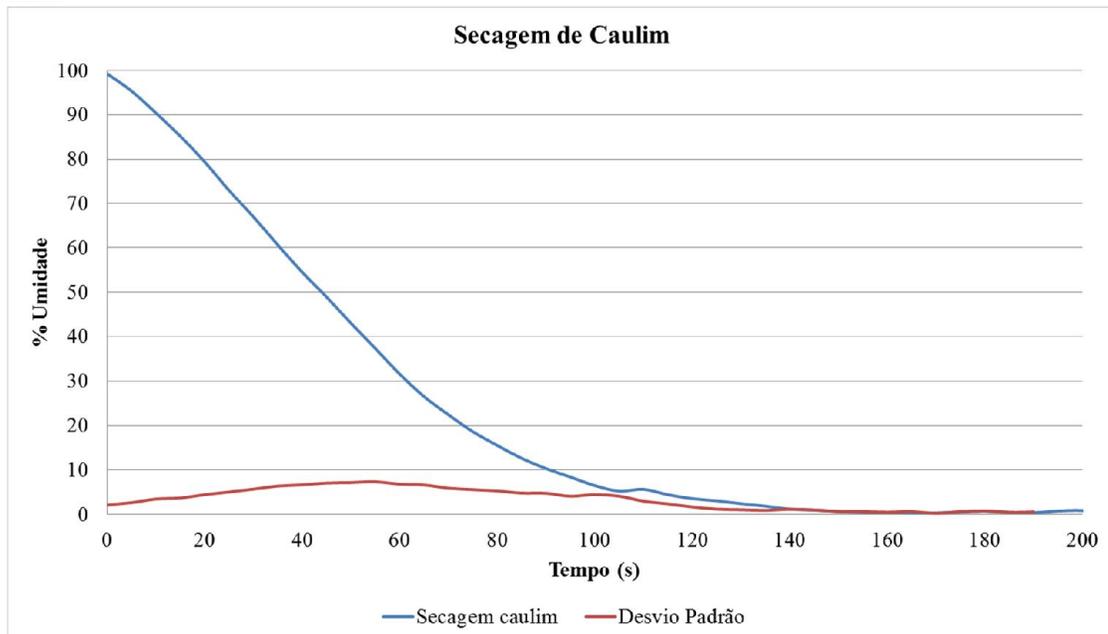
Fonte: O autor (2017)

4.2 CURVA DE SECAGEM

A montagem descrita no item 3.4 foi utilizada para medição da curva de secagem de amostras de caulim e bentonita, pesando em média 100g e 103g, respectivamente. O experimento foi repetido por oito vezes para cada material, com boa reprodutibilidade. Os resultados da média das curvas de secagem e desvio padrão das medições são mostrados na Figura 4.9 para o caulim e Figura 4.10 para a bentonita. As curvas descrevem como o percentual de umidade das amostras é perdido no decorrer do processo de secagem, desde o início, quando o percentual era de aproximadamente 100%, até atingir 0% de umidade.

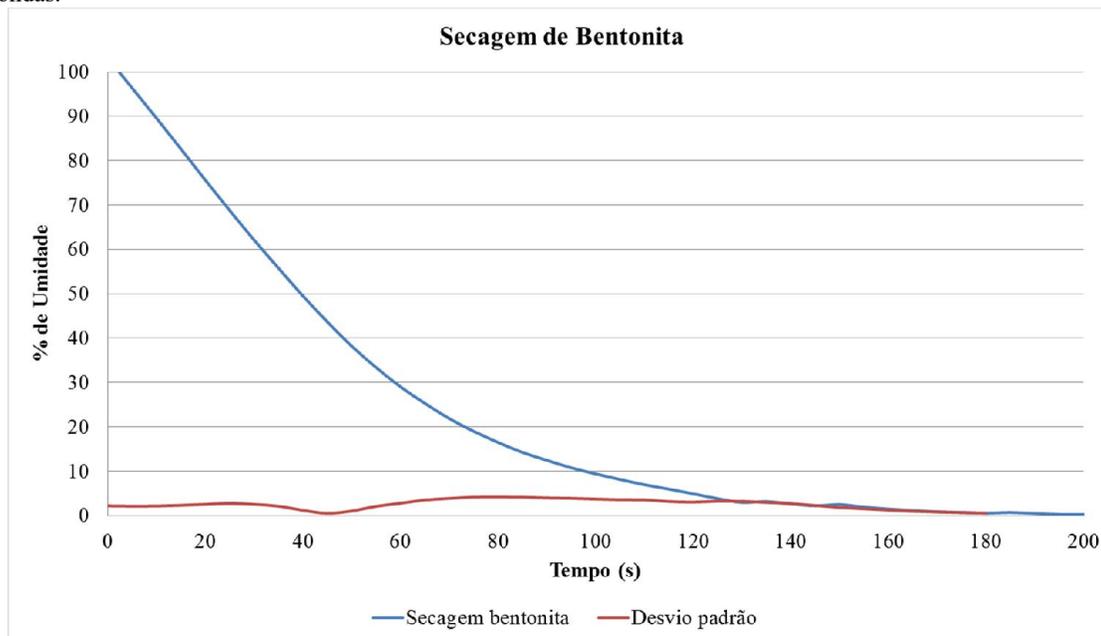
É possível perceber que, em ambas as curvas, o processo apresenta uma queda bastante íngreme, descrevendo uma redução de umidade rápida e linear do início do processamento até chegar aproximadamente 20%, quando a curva de secagem descreve uma trajetória mais longa para retirar da amostra o percentual de umidade restante. Também é possível verificar o pequeno desvio padrão das medidas, o que representa que os valores medidos para as amostras são uniformes.

Figura 4.9: Percentual de umidade de amostras de caulim em função do tempo de secagem em forno de micro-ondas.



Fonte: O autor (2017)

Figura 4.10: Percentual de umidade de amostras de bentonita em função do tempo de secagem em forno de micro-ondas.



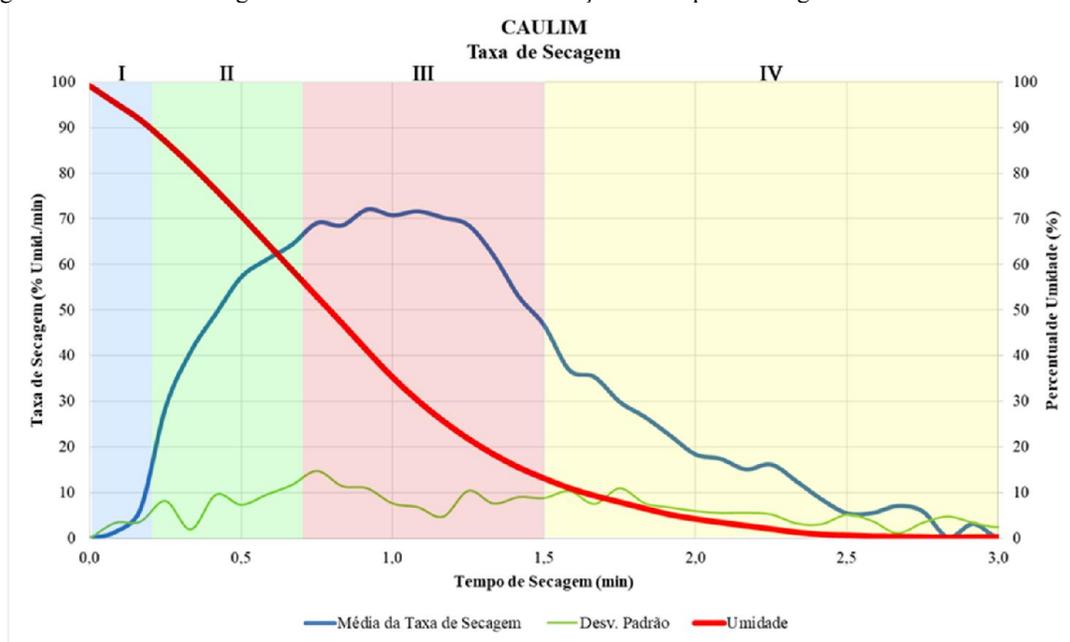
Fonte: O autor (2017)

Dos gráficos da Figura 4.9 e Figura 4.10 pode ser verificado que a bentonita apresenta uma secagem ligeiramente mais rápida que o caulim. As amostras de caulim levaram em média 75s para perder 80% de umidade e mais 70s para secar completamente. As amostras de bentonita levaram em média 70s para perder 80% de umidade e secaram completamente em mais 70s.

4.3 TAXA DE SECAGEM

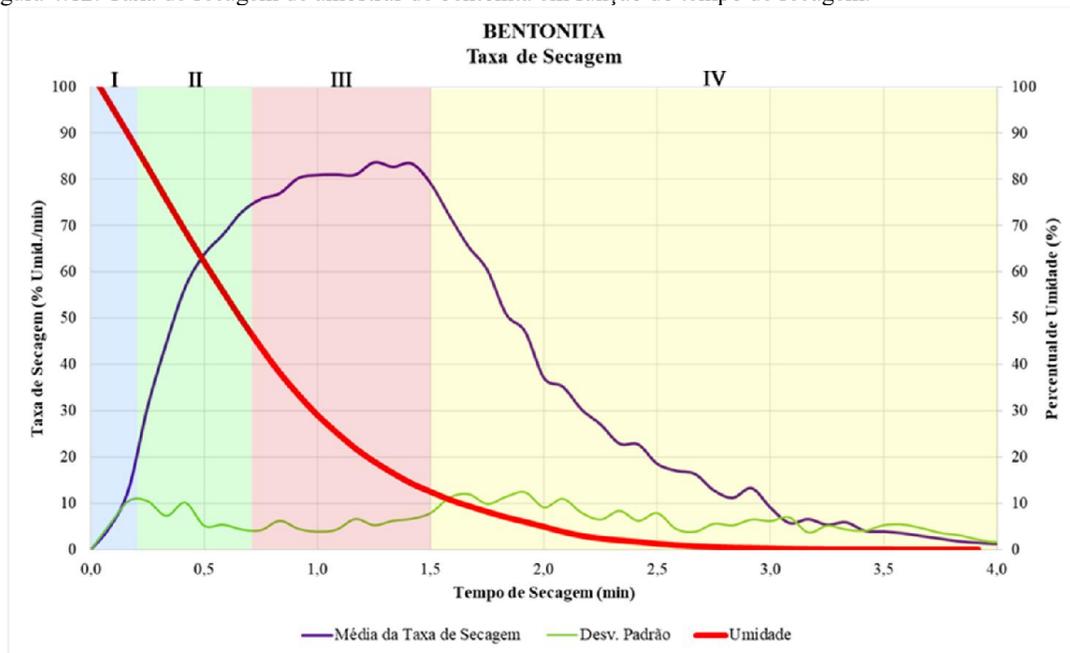
Os gráficos Figura 4.11 e Figura 4.12, que correspondem a taxa de secagem de diversas amostras de caulim e da bentonita respectivamente, são gerados a partir da operação de derivação das curvas de secagem das mesmas amostras, sendo plotado a média entre elas. Em ambos os gráficos foi inserido uma linha vermelha mais larga que corresponde a curva de secagem média das amostras (constantes na Figura 4.9 e Figura 4.10). É possível observar que, logo no início do processo, a secagem atinge uma taxa de perda de umidade muito alta, entre 70 e 90 % umidade/min. A velocidade da secagem então é reduzida gradativamente até chegar a 0 quando não há mais umidade para ser perdida.

Figura 4.11: Taxa de secagem de amostras de caulim em função do tempo de secagem.



Fonte: O autor (2017)

Figura 4.12: Taxa de secagem de amostras de bentonita em função do tempo de secagem.



Fonte: O autor (2017)

Os gráficos da taxa de secagem para o caulim e bentonita, mostrados na Figura 4.11 e Figura 4.12, mostram as etapas de aquecimento de materiais dielétricos assistidos por micro-ondas, podendo ser identificado quatro etapas:

- I. Nesta fase ocorre o aquecimento preliminar do sólido úmido, podendo a temperatura elevar até o ponto de ebulição do líquido. Neste período há pouca remoção de umidade e a pressão no interior do material é igual à do meio envolvente. Nos gráficos, essa fase corresponde aos instantes iniciais do tempo de exposição (tempo de secagem $< 0,2$ min).
- II. Período de aumento de pressão, onde a pressão interna ao volume aumenta desde o valor inicial (pressão envolvente) até um valor máximo, determinado pela resistência do fluxo do vapor e pela potência de RF aplicada. Nos gráficos, essa fase corresponde aos instantes iniciais do tempo de exposição ($0,2$ min $<$ tempo de secagem $< 0,7$ min).
- III. Período de velocidade de secagem constante (para uma potência de RF constante), a taxa de fluxo de vapor dentro do material é determinada pela potência absorvida e pela resistência interna do vapor. Nos gráficos corresponde aos instantes iniciais do tempo de exposição ($0,7$ min $<$ tempo de secagem $< 1,5$ min).
- IV. Neste período ocorre o decréscimo do conteúdo da umidade, resultando na diminuição da potência absorvida e nas forças responsáveis pela movimentação da umidade. Pode haver um aumento na temperatura do material. Nos gráficos corresponde aos instantes iniciais do tempo de exposição (tempo de secagem $> 1,5$ min).

4.4 ENERGIA CONSUMIDA E VIABILIDADE ECONÔMICA

4.4.1 Potência absorvida pelo material

Nessa fase do trabalho, após realização do experimento de secagem, foram feitos os cálculos de potência absorvidas pelas amostras. Os dados disponíveis de tempo e de variação de umidade permitem calcular a energia absorvida que foi convertida efetivamente na mudança de fase da água para vapor utilizando a equação (10).

O objetivo é determinar a energia consumida e fazer uma comparação direta dos custos envolvidos em uma secagem convencional. Para tanto é necessário considerar que, de acordo com o abordado no item 2.1.3, tanto a bentonita quanto o caulim são enviados para secagem com cerca de 40% de umidade.

Nas medições de secagem de caulim, considerando que as amostras com média de 40% de umidade, 33,4g de massa total, finalizou a secagem em média em 96,25 segundos, com

uma perda de umidade média de 9,75g. Dessa forma absorveu uma potência média de 229,68W para realizar a secagem de 40% de umidade.

Nas medições de secagem de bentonita, considerando que as amostras com média de 40% de umidade, 27,83g de massa total, finalizou a secagem em média em 105 segundos, com uma perda de umidade média de 7,91. Dessa forma absorveu uma potência média de 174,01 W para realizar a secagem total de 40% de umidade.

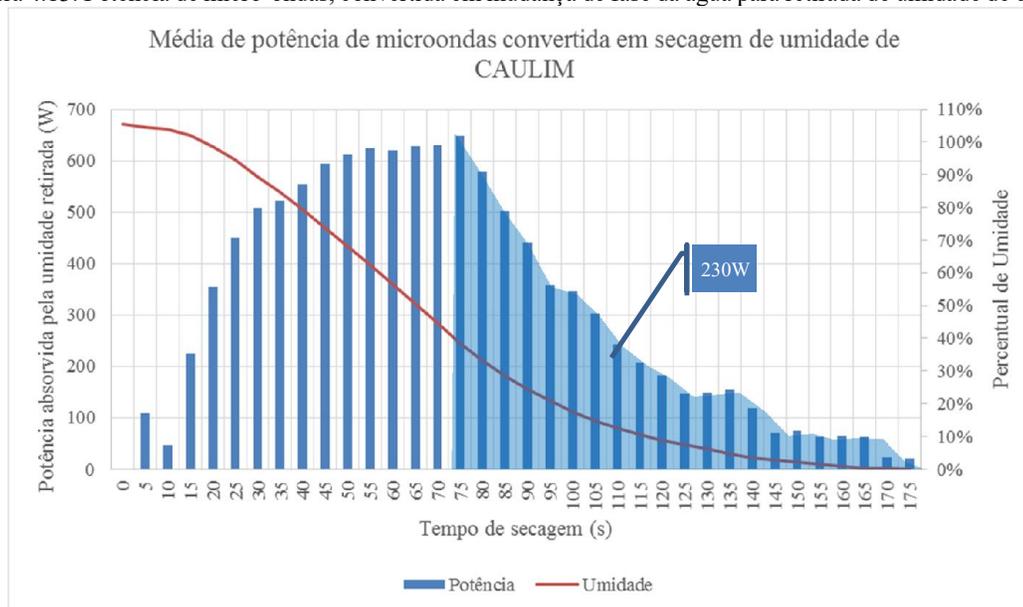
Com esses cálculos temos os valores de referência (resumidos na Tabela 4-1) necessários para estimar o tempo necessário para secagem de uma quantidade maior de produtos e conseqüentemente a energia que será consumida.

Tabela 4-1: Valores de referência de secagem de caulim e bentonita a 40% de umidade.

Valor de Referência		Caulim	Bentonita
Massa inicial	m_r	33,36 g	27,83 g
Tempo de secagem de 40% a 0%	t_r	96,75 s	105 s
Potência absorvida	p_r	229,68 w	174,01 w

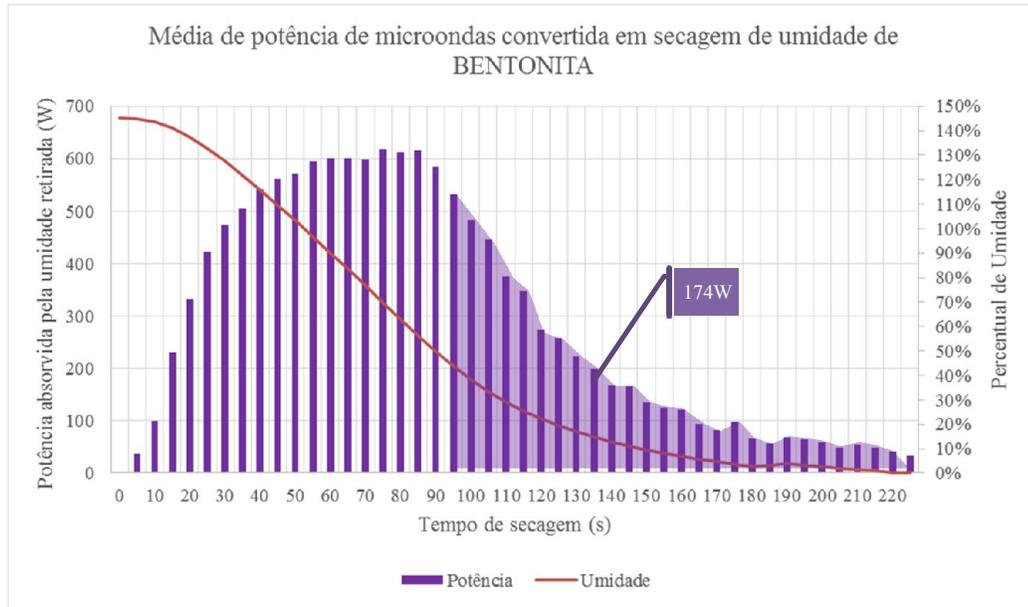
Os gráficos da Figura 4.13 e Figura 4.14 trazem a média de potência, a cada 5 segundos, que foi efetivamente utilizada para retirada da umidade das amostras durante a secagem de caulim e bentonita, respectivamente.

Figura 4.13: Potência de micro-ondas, convertida em mudança de fase da água para retirada de umidade de caulim.



Fonte: O autor (2017)

Figura 4.14: Potência de micro-ondas, convertida em mudança de fase da água para retirada de umidade de bentonita.



Fonte: O autor (2017)

A potência mostrada nos gráficos representa apenas a água que evaporou das amostras, e teve um comportamento muito semelhante aos de taxa de secagem (Figura 4.11 e Figura 4.12). É possível observar que a potência absorvida na evaporação alcança um pico de valor aproximado a potência máxima disponibilizada pela válvula de micro-ondas, que é de 680W.

Ao considerarmos a secagem a partir de 40% de umidade observamos que foi necessário cerca de 230W para realizar a secagem total de 33,36g caulim e 174W para 27,83g de bentonita. Como vimos no item 2.1.3 deste trabalho, o beneficiamento da bentonita não passa por secagem no forno a lenha, diferente do caulim. As mineradoras quando realizam seus trabalhos de secagem no forno a lenha, processam uma quantidade enorme de material.

O forno a lenha utilizado pela empresa mineradora Ummio possui dimensões de 30x4 metros tem capacidade de realizar a secagem de 30 toneladas de caulim, utilizando cerca de 40m³ de lenha para o pré-aquecimento mais 1m³ por tonelada para manter a temperatura até finalizar o processo, o que totaliza 70m³ de lenha, e uma duração de 36 horas. O preço médio da lenha praticado no momento da realização deste trabalho era de até R\$ 50,00 por metro quadrado. Dessa forma o custo de secagem de caulim em um forno a lenha é aproximadamente de R\$ 116,00 por tonelada.

4.4.2 Energia e custo de secagem por micro-ondas

A avaliação da eficiência do forno de micro-ondas por meio de cálculo de energia necessária para a secagem de determinada quantidade de produto foi realizada a partir das medições feitas de potência irradiada e secagem das amostras. Para essa avaliação é necessário relacionar 3 grandezas importantes no processo de secagem: o tempo de secagem (t) em segundos, quantidade de produto (m) em gramas e a potência de RF irradiada pelo magnetron ou potência absorvida pelo produto (p) em watts.

Ao fazer a relação entre as grandezas é possível perceber que: o tempo de secagem é diretamente proporcional à quantidade de produto a ser processado; e o tempo de secagem é inversamente proporcional a potência de micro-ondas disponibilizada. A Figura 4.15 mostra a relação entre esses parâmetros na secagem por micro-ondas.

Figura 4.15: Relação entre as grandezas. O tempo de secagem é diretamente proporcional a quantidade de produto a ser secado e inversamente proporcional à potência de micro-ondas disponível.

Tempo de Secagem	Quantidade de Produto	Potência de micro-ondas
↑	↑	↓

Fonte: O autor (2017)

Dessa forma, podemos escrever a relação composta da forma da equação (16), no qual os termos com subscrito 'r' correspondem os valores de referência obtidos a partir da análise de medições de secagem. A massa de referência é m_r , a potência de referência é p_r e o tempo de secagem de referência é t_r .

$$\frac{t_r}{t_f} = \frac{m_r}{m_f} \frac{p_f}{p_r} \quad (16)$$

Para calcularmos o tempo (t_f) necessário para a secagem de uma quantidade (m_f) de material, a expressão é reescrita da forma da equação (17).

$$t_f = \frac{m_f p_r t_r}{m_r p_f} \quad (17)$$

O termo ‘ p_f ’ corresponde a potência útil disponibilizada pela válvula de micro-ondas que pode ser absorvida pelo produto a ser secado. Se considerarmos que a quantidade de produto a ser processado (m_f) sempre será em grande volume, podemos afirmar que essa potência sempre será a máxima possível, que, como já verificamos no item 3.5 deste trabalho, é 680W. A potência absorvida poderá variar caso seja utilizada uma válvula de potência maior (3kW, 10kW, 30kW) ou quando combinadas várias válvulas magnetron usadas em fornos domésticos de micro-ondas. Considerando a possibilidade de utilizar n válvulas combinadas, a expressão pode ser reescrita da forma da equação (18)

$$t_f = \frac{m_f p_f t_r}{m_r 680n} \quad (18)$$

Com os dados obtidos a partir dos experimentos de secagem, no qual foram determinados os valores de referência t_r , m_r , e p_f (que nada mais são que os valores médios de tempo de secagem das amostras, massa média das amostras e potência média absorvida pelas amostras), será possível determinar o tempo de secagem dos produtos com 40% de umidade até 0%, por meio das equações (19) e (20) para caulim e bentonita, respectivamente.

$$t_{CAULIM4\ 0\%} = \frac{m_{CAULIM4\ 0\%} \cdot 229,68 \cdot 96,75}{33,36 \cdot 680 \cdot n} \quad (19)$$

$$t_{BENTONITA4\ 0\%} = \frac{m_{BENTONITA4\ 0\%} \cdot 174,01 \cdot 105}{27,83 \cdot 680 \cdot n} \quad (20)$$

Considerando que um secador à micro-ondas, que faça uso de 230 válvulas de 680w útil, para a secagem de 30 toneladas de produto, teremos que o tempo de secagem é calculado na Tabela 4-2.

Tabela 4-2: Cálculo do tempo de secagem para caulim e bentonita a 40% de umidade.

	m_f	n	t_f
Caulim 40%	30x10 ⁶ g	230	35h e 19min
Bentonita 40%	30x10 ⁶ g	230	34h e 59min

Fonte: O autor (2017)

Para análise do custo de energia elétrica, foi considerado que o contrato junto a companhia de distribuição de energia elétrica local seja a de modalidade tarifária horária verde, aplicada às unidades consumidoras do grupo 'A', caracterizadas por tarifas diferenciadas de consumo de energia elétrica, de acordo com as horas de utilização do dia, assim como de uma única tarifa de demanda de potência [38].

A Tabela 4-3, traz as tarifas de energia elétrica praticada pela Energisa aos consumidores do grupo 'A', demais classes, com contrato de modalidade horária verde.

Tabela 4-3: Tarifa de energia elétrica da modalidade tarifária verde, demais classes [39].

Tarifas Energisa				
Modalidade Horária Verde				
Consumo (R\$/kWh)		Demanda (R\$/kW)		
Ponta	Fora de ponta	Fora de Ponta	Ponta	Ultrapassagem
1,65971	0,24855	17,79	17,79	35,58

Fonte: Energisa (2018)

No cálculo foi considerado que o horário de ponta corresponde o período composto por três horas diárias consecutivas definidas pela distribuidora considerando a curva de carga de sistema elétrico [38]. Dessa forma, a Tabela 4-4 calcula o custo de consumo de energia elétrica considerando a utilização de 230 válvulas cujo a potência nominal é de 1,5kW (ver item 3.5).

Tabela 4-4: Cálculo do custo de energia elétrica para utilização de secador à micro-ondas de capacidade de 30t.

Produto	Energia Consumida (kWh)	Demanda (kW)	Custo (R\$)			Custo por tonelada (R\$/ton)
			Consumo na ponta	Consumo fora da ponta	Demanda (custo mensal)	
Caulim	12181,45	345	1717,80	2770,45	6137,55	149,61
Bentonita	12068,45	345	1717,80	2742,36	6137,55	148,67

*Custo por tonelada não está incluso demanda.

Na Tabela 4-4, o valor pago por demanda de 345kW não foi considerado no cálculo do custo por tonelada, pois esse valor é fixo mensal, seja utilizado ou não o valor integral. Entretanto o custo de demanda poderá ser diluído ao longo do mês de acordo com a quantidade de vezes que o processo de secagem for realizado.

Os dados apresentados na Tabela 4-4 consideram os parâmetros medidos de forma estática. Recomenda-se a utilização de fornos que movimentem o produto no seu interior, aumentando a área de contato do produto com a onda eletromagnética e melhorando a eficiência do processo e qualidade final da secagem.

Dessa forma, para a secagem de 30 toneladas de caulim, serão consumidos 12181,45 kWh de energia, a um preço de R\$ 4488,25, o que totalizou um custo de secagem de aproximadamente R\$ 149,61 por tonelada. A Tabela 4-5 apresenta o comparativo da secagem utilizando forno a lenha, ao ar livre ou com uso de micro-ondas, com energia adquirida na concessionária, usando a tarifa verde, em vigor no período de realização da presente pesquisa.

Tabela 4-5: Quadro resumo de secagem.

	Micro-ondas	Forno a Lenha	Ar livre
Caulim			
Quantidade	30 ton	30 ton	30 ton
Tempo de secagem	35h e 19min	36h	1 semana
Insumo	12181,45 kWh	70m ³ de lenha	-
Custo por tonelada	R\$ 149,61	R\$ 116,00	R\$ 0,00
Bentonita			
Quantidade	30 ton	-	30t
Tempo de secagem	34h e 59min	-	1 semana
Insumo	12068,45 kWh	-	-
Custo por tonelada	R\$ 148,67	-	R\$ 0,00

4.4.3 Planta fotovoltaica

Para dimensionamento de uma planta fotovoltaica para atender o secador, foi considerada a modulação de um secador menor com capacidade de 1 tonelada, utilizando 35 válvulas magnetron.

Tabela 4-6: Cálculo do custo de energia elétrica para utilização de secador à micro-ondas de capacidade de 1t.

Produto	Tempo de secagem	Energia Consumida (kWh)	Demanda (kW)	Custo (R\$)			Custo por tonelada (R\$/ton)
				Consumo na ponta	Consumo fora da ponta	Demanda (Custo mensal)	
Caulim	7h e 44min	406,05	52,5	0,00	100,92	933,975	100,92

*Custo por tonelada não está incluso demanda.

A energia demandada (E_D) para a secagem de 1 tonelada de caulim em 7h e 44min é então de 406,05 kWh. Considerando que será adotado um painel fotovoltaico de 350 Wp e que, segundo o atlas solarimétrico (Anexo B), a localidade possui uma insolação média anual de 8h diárias. A energia gerada pelo painel fotovoltaico (E_P), calculada pela equação (12), em 1 dia é de:

$$E_p = 350 \times 8 = 2800 \text{ Whp} = 2,8 \text{ kWhp}$$

A radiação média anual da localidade, segundo o atlas solarimétrico (Anexo C) e de 20 MJ/m². Dessa forma o fator de segurança, calculado pela equação (14), é de 0,83. Dessa forma o número de painéis fotovoltaicos (N) para suprir o consumo do secador é de:

$$N = \frac{E_D}{f_s \cdot E_p} = \frac{406,05}{0,83 \times 2,8} = 174 \text{ painéis} = 60,9 \text{ kWp instalado}$$

Ao adotar um FDI de 0,8 para a localidade das mineradoras, temos que a potência dos inversores necessária para trabalhar junto com os painéis é de 49 kW.

O custo para instalação desse sistema orçado atualmente em média de R\$ 341.250,00, para painéis, inversores, outros materiais e custos de instalação. Considerando a tarifa de energia elétrica atual, estima-se que haveria um retorno deste investimento em 9,5 anos, sem considerar a manutenção e reposição de peças de todo o sistema.

5 CONCLUSÃO

Ao analisarmos as características eletromagnéticas das amostras, medidas em laboratório, verificamos que as mesmas apresentaram maiores tangentes de perdas para frequências mais baixas de micro-ondas. Apesar de a água ter maiores perdas em frequências mais altas da faixa de micro-ondas, a radiação não teve boa penetração. Isso justifica a vantagem de opção por de válvulas magnetron de 2,45GHz para a secagem dos minérios, que além de ser mais abundantes no mercado, são comercializados por menores preços. Considerando o comportamento das amostras sob aplicação de frequências de 2,45 GHz, foi possível atestar que há maiores perdas quando a amostra está em torno de 30% de teor umidade para o caulim e 55% para a bentonita. Isso é considerado um ponto positivo levando em conta que as mineradoras levam o produto para secagem por volta de 40 a 30% de umidade.

Durante a secagem das amostras, foi possível perceber a grande semelhança do comportamento da taxa de secagem do caulim e da bentonita com experimentos praticados por Magalhães [29] na secagem de bauxita com micro-ondas. Os resultados mostraram uma rápida resposta da secagem utilizando ondas eletromagnéticas, dispensando pré-aquecimento de fornos convencionais, chegando ao pico de taxa de secagem em um curto espaço de tempo. Os dados também revelaram que a taxa de secagem tem uma redução significativa após as amostras atingirem 10% de umidade, e apresentou taxas muito baixas quando a umidade ficou abaixo de 5%. Isso se deveu à redução da tangente de perdas, tendo em vista que a capacidade de absorção das micro-ondas das amostras ocorre apenas com presença de água. Porém, para aplicação real da tecnologia, considerando que a secagem convencional é feita em produtos com 40% de umidade, os experimentos demonstraram um ótimo resultado, tendo em vista que para umidade entre 40% a 10% a secagem das amostras apresentou altas taxas, e os produtos são comercializados com cerca de 1 a 3% de umidade para o caulim e 10 a 14% para bentonita

Fazendo uma comparação direta do custo de energia elétrica para o funcionamento do secador a micro-ondas e o custo de uso do forno a lenha, observou-se que a utilização da nova tecnologia apresentou valores não muito superiores, que podem ser considerados compatíveis com o mercado. Vale lembrar que no estudo foi considerado uma eficiência das válvulas de apenas 45%, devido a fonte retificadora ser de meia onda. Outras configurações de retificadores e dobradores de tensão elevam a eficiência para patamares superiores à 80%. Além disso, recomenda-se a utilização de fornos com cavidade giratória, para aumentar a área de exposição

do produto, melhorando a eficiência da secagem. Apesar de tudo haverá dificuldades que poderão onerar sua utilização levando em conta que as instalações elétricas das mineradoras deverão sofrer adequações como subestação para uma potência maior de consumo, tendo em vista que o forno irá exigir uma elevação da demanda de energia da unidade. Uma maior demanda contratada junto a concessionária de energia elétrica, para que possa alimentar o secador a micro-ondas, poderá ser mais um problema, já que a demanda contratada é cobrada mesmo quando não é utilizada. Outros problemas financeiros, não considerados no estudo, serão os custos na manutenção do equipamento, reposição das válvulas e também na capacitação de trabalhadores para garantir que a máquina será operada de forma correta.

No entanto, não devemos nos restringir tão somente à avaliação de custo financeiro, mas levar em consideração também o custo de oportunidade, tendo em vista que há diversos benefícios relacionados diretamente à essa inovação, todos já abordados nesse trabalho, que aumentam a confiabilidade do sistema produtivo. É necessário que as empresas tenham uma visão a longo prazo, e observar a redução de custos que são geradas de forma indireta, pois lucro e sustentabilidade devem ser vistos de forma indissociáveis.

Levando em consideração a segurança operacional, os procedimentos com o forno micro-ondas foram feitos com total controle da secagem, no qual o processo podia ser interrompido a qualquer instante ao ser acionado o desligamento da alimentação. A operação diminui os riscos aos trabalhadores além de proporcionar um ambiente laboral menos insalubre, no qual há a redução da irradiação de calor.

Hoje existe uma demanda crescente por ações socioambientais como meio de promover o nome de empresas na sociedade ao mostrar que a sustentabilidade e os cuidados com o meio ambiente fazem parte da agenda dos negócios. Dessa forma, o posicionamento das mineradoras em relação a questão do desmatamento da Caatinga pode ser associado diretamente aos seus princípios e valores como uma estratégia de autopromoção.

Somente em uma leva de secagem de 30 toneladas de caulim, em uma única mineradora, são necessários 70m³ de lenha consumidos em 36 horas, que contribuem diretamente na destruição da Caatinga cuja área de extensão já se encontra 40% degradada e 8% com solo exposto. Problema ambiental seríssimo que traz diversas consequências profundas, como grandes extensões onde a desertificação já se encontra instalada, no qual há um aumento dos processos erosivos e deterioração das propriedades físicas, químicas e biológicas do solo, dificultando a retenção de água nos reservatórios e lençóis freáticos. Já a

colaboração ao aquecimento global é dobrada, pois além do desmatamento existe a queima da lenha que coopera ainda mais na emissão de gases do efeito estufa.

Porém as empresas parecem ter dificuldades em enxergar o retorno econômico em investimentos de cunho socioambiental, apesar de os consumidores tenderem valorizar cada vez mais as ações das empresas. O que nos leva a outro viés que seria a participação das autoridades nesse processo por meio de obrigações legais. Entretanto, apesar da legislação ambiental, atualmente não há ou não se observa fiscalização efetiva para controle da situação que impeça o uso da vegetação nativa como lenha, o que transforma a Caatinga no bioma menos protegido do Brasil, onde praticamente não se encontra se quer áreas de preservação. Nesse contexto é estritamente importante que sejam adotadas políticas que não somente obriguem mas incentivem a utilização de métodos que cada vez menos causem impactos ambiental. A tecnologia de fornos a lenha na secagem de minérios é milenar e impressiona o fato que até hoje não houve nenhum desenvolvimento na área. O secador a micro-ondas se mostrou eficiente, com boa performance e segurança a um custo dentro dos patamares atuais, se afirmando como uma excelente alternativa para o beneficiamento de minérios não ferrosos como o caulim e bentonita com total responsabilidade ambiental.

REFERÊNCIAS

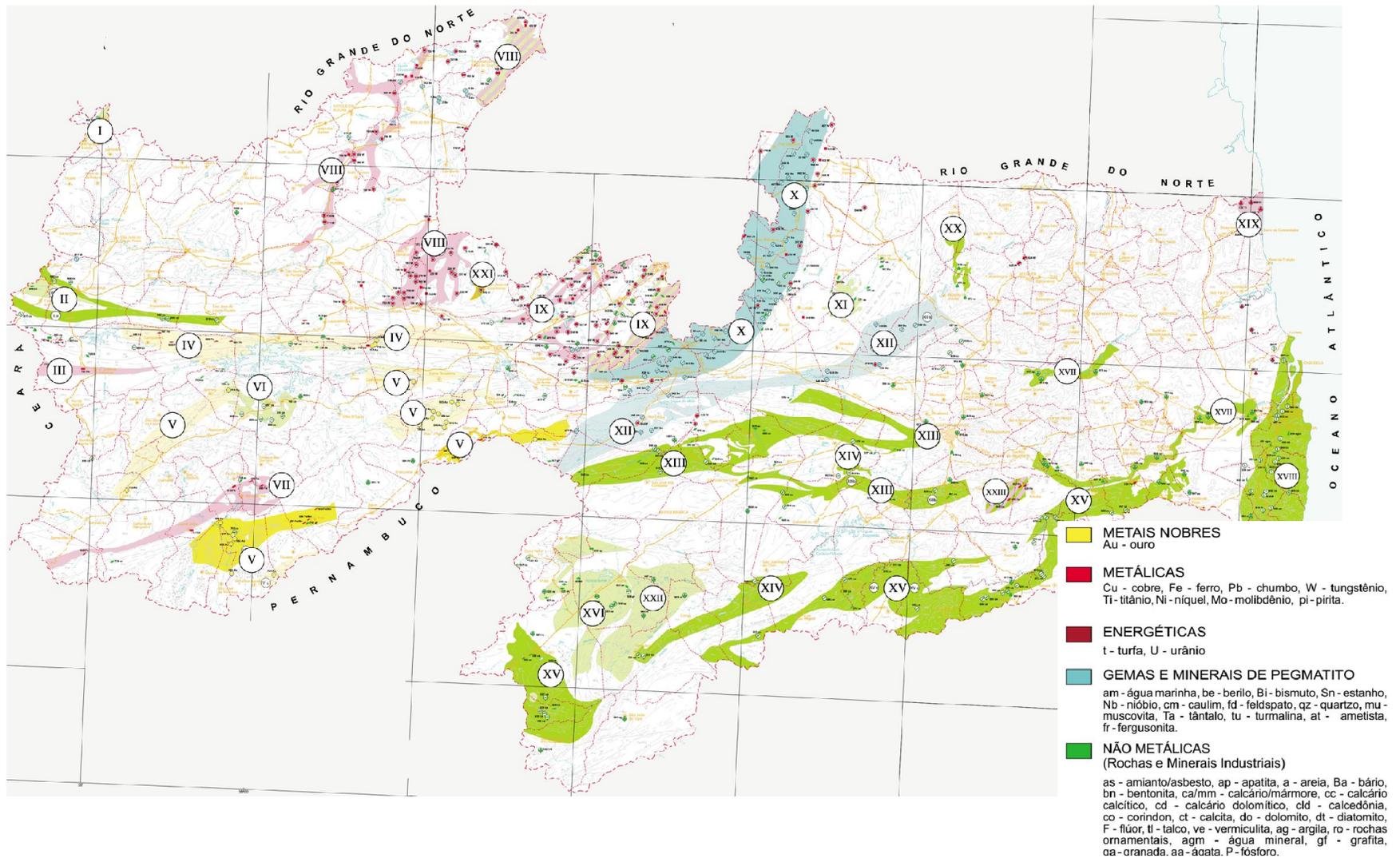
- [1] Instituto Brasileiro de Mineração - IBRAM. (2017, jan. 31). Relatório Anual IBRAM. 2015. Disponível em: <http://www.ibram.org.br>.
- [2] Instituto Brasileiro de Mineração - IBRAM. (2017, jan. 31). Produção Mineral Brasileira: Série histórica. Disponível em: <http://www.ibram.org.br>.
- [3] Instituto Brasileiro de Mineração – IBRAM. (2017, jan. 31). As Riquezas Minerais da Paraíba. 2010. Disponível em: http://ibram.org.br/150/15001002.asp?ttCD_CHAVE=120715.
- [4] C. C. O. Lacerda, A. D. Barros, S. M. A. Souza, G. A. C. Gonçalves. “Análise da sustentabilidade no setor de mineração do município de Picuí-Pb”, apresentado no Encontro Internacional sobre Gestão Empresarial e Meio Ambiente (XVI ENGEMA), São Paulo, 2014.
- [5] A. L. L. Silva, A. C. M. Araújo, S. M. A. Souza, W. S. Lira, “Sustentabilidade na mineração: um estudo no município de Várzea-Pb”, apresentado no Simpósio Internacional de Gestão de Projetos, Inovação e Sustentabilidade (IV SINGEP), São Paulo, 2015.
- [6] B. I. Souza, R. C. Artigas, E. R. V. Lima, “Caatinga e desertificação”, Revista Mercator, v. 14, n. 1, p. 131-150. 2015.
- [7] I. C. S. Almeida, A. J. S. Ramos, M. T. M. Diniz, “A problemática ambiental da extração de caulim no alto do chorão em Junco do Seridó/PB”, apresentado no Encontro Nacional dos Geógrafos (XVI ENG), Porto Alegre, 2010.
- [8] Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE. (2017, fev. 2). Centro do INPE avança no mapeamento da Caatinga. 2016. Disponível em: http://www.inpe.br/noticias/noticia.php?Cod_Noticia=4157.
- [9] CEPTEL/ELETRONBRAS. “Atlas solarimétrico do Brasil: Banco de dados terrestres”. Recife: Ed. Universitária da UFPE, 2000.
- [10] Departamento Nacional de Produção Mineral – DNPM, “Anuário mineral brasileiro”. Brasília, 2010.
- [11] A. B. Luz, J. A. Sampaio, F. T. Silva, F. A. N. G. Silva, “Série rochas e minerais industriais: Estudos de caracterização tecnológica e beneficiamento do caulim da região Borborema/Seridó (RN)”. Rio de Janeiro: Editora CETEM/MCT, 2008.
- [12] Ministério de Minas e Energia. “Geologia e recursos minerais do estado da Paraíba”. Recife. 2002.
- [13] A. R. V. Silva, H. C. Ferreira, “Argilas bentoníticas: conceitos, estruturas, propriedades, usos industriais, reservas, produção e produtores/fornecedores nacionais e

- internacionais”, Revista Eletrônica de Materiais e Processos (REMAP), v.3.2, pp. 26-35. 2008.
- [14] F. B. Machado, C. A. Moreira, A. Zanardo, A. C. André, A. M. Godoy, J. A. Ferreira, T. Galembeck, A. J. R. Nardy, A.C. Artur, M. A. F. Oliveira. (2017, mar, 27). Atlas de Rochas e Minerais. Disponível em: <http://www.rc.unesp.br/museudpm>
- [15] A. B. Luz, J. A. Sampaio, S C. A. França, “Introdução ao tratamento de minérios”, in Tratamento de Minérios, Rio de Janeiro: Editora CETEM/MCT, 5° ed., 2010, pp. 3-20.
- [16] S. W. Kingsman, N. A. Rowson, “Microwave treatment of minerals: a review”, Minerals Engineering, Vol. 11, no. 11, 1998, pp. 1081-1087.
- [17] K. C. G. Ong, A. Akbarnezhad, “Microwave-Assisted Concrete Technology: Production, Demolition and Recycling”. New York: CRCPRESS, 2015.
- [18] Joabson Nogueira de Carvalho, “Tópicos Especiais: Aplicações Industriais de Micro-ondas”, IFPB, João Pessoa - PB, 2016. Notas de aula.
- [19] K. E. Haque, “Microwave energy for mineral treatment processes: a brief review” International Journal of Mineral Processing, Vol. 57, no. 1, 1998, pp. 1-24.
- [20] GRANDTEC. (2017, mar. 15). Lista de Produtos. Disponível em: <http://szovendryer.com>
- [21] A.C. Metaxas, “Microwave heating”, IEE Power Engineering Journal, vol. 5, no. 5, 1991, pp. 237-247.
- [22] MICRODENSHI CO. (2017, mar, 19). Basics of Microwave. Disponível em: <http://www.microdenshi.co.jp>
- [23] W. H. Hayt Junior, J. A. Buck, Eletromagnetismo. Porto Alegre: Amgh, 8°ed, 2013.
- [24] M. N. Sadiku, Elementos de Eletromagnetismo. Porto Alegre: Bookman, 5°ed, 2012.
- [25] P. C. Eggi, J. Martinez, M. A. A. Meireles, Fundamentals of Microwave Extraction in F. Chemat, G. Cravotto, Microwave-assisted Extraction for Bioactive Compounds: Theory and Practice. Springer, 2013. Cap. 2. pp. 15-52.
- [26] A. R. Nogueira, G. Knapp, F. J. Krug, J. A. Nóbrega, “Digestão de Amostras Assistida por Micro-ondas”, V Workshop sobre Preparo de Amostras, São Paulo, 2004.
- [27] Lima, J. M. V. “Relatório de Medições de permissividade elétrica”, Disciplina aplicações industriais em micro-ondas, IFPB. João Pessoa –PB. 2016.
- [28] Agencia Nacional de Telecomunicações – ANATEL, “Plano de atribuição e destinação de frequências no Brasil”, Brasil, 2017.
- [29] R. S. Magalhães, R. M. F. Lima, A. S. Souza, “Avaliação de diferentes processos de secagem de bauxita para controle de qualidade”, apresentado no Encontro Nacional De Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa (XIX ENTMME), Recife – PE. 2002.

- [30] R. S. Magalhães, R. M. F. Lima, A. S. Souza, “O uso de micro-ondas para determinação de umidade de bauxita”, REM, vol. 56, no. 4, 2003.
- [31] Resolução Normativa ANELL, nº482, 2012. [Online]. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>
- [32] Rütther, R., “Edifícios solares fotovoltaicos: O potencial da geração solar fotovoltaica integrada a instalações urbanas e interligada à rede elétrica pública no Brasil”. Florianópolis: UFSC/LABSOLAR, 2004.
- [33] Lima, J. M. V., “Padrões e normas para projeto de instalações elétricas de micro e mini-geração fotovoltaica para acesso à rede de distribuição de baixa tensão”, Latus Sensu Monografia, Escola Politécnica, Universidade de Pernambuco, Recife, 2015.
- [34] Marte Científica, “Procedimento de comunicação balança com pc, Versão Windows 7 e posteriores”, tutorial pelo fabricante, 2017.
- [35] Halliday, Resnick, “Fundamentos de física, volume 2: gravitação, ondas e termodinâmica”. Rio de Janeiro: LTC, 2009.
- [36] A. C. R. N. Barboza, C. V. M. S. Cruz, M. B. Graziani, M. C. F. Lorenzetti, E. Sabadini, “Aquecimento em forno de micro-ondas/Desenvolvimento de alguns conceitos fundamentais”. Revista Química Nova, Vol. 24, no. 6, 2001.
- [37] Macêdo, W. N., “Análise do fator de dimensionamento do inversor (FDI) aplicado a sistemas fotovoltaicos conectados à rede (SFCR)”, Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.
- [38] Resolução Normativa ANELL, nº414, 2010. [Online]. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/cedoc/bren2010414.pdf>
- [39] GRUPO ENERGISA. (2018, fev, 05). Tipos de Tarifas. Disponível em: www.energisa.com.br/empresa/Paginas/grandes-empresas/taxas-prazos-e-normas/tipos-tarifas.aspx

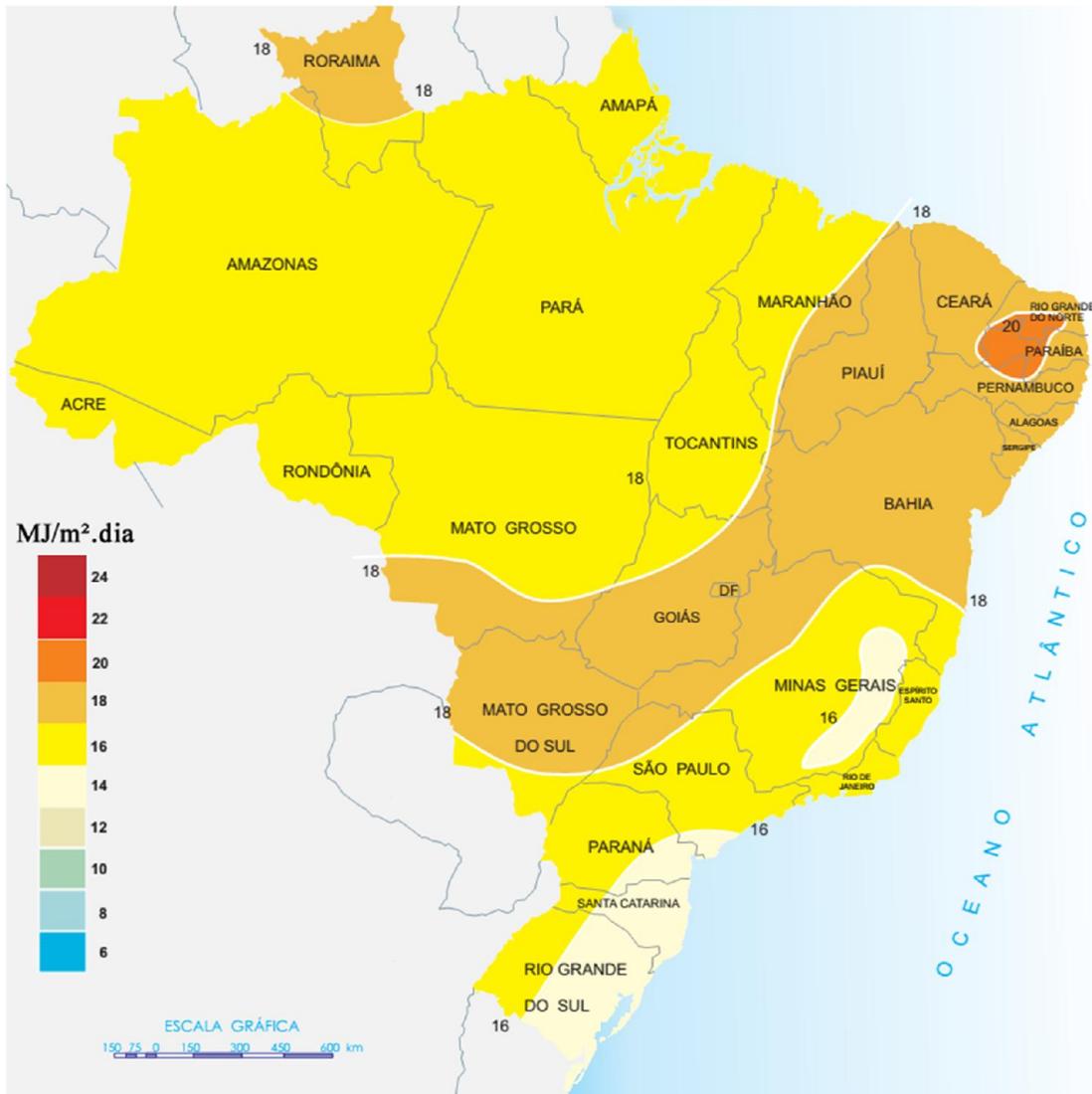
ANEXOS

ANEXO A – Mapa de recursos minerais do estado da Paraíba



Legendas de áreas do ANEXO A

Áreas Potenciais de Exploração			
ÁREA	SUBSTÂNCIAS	ÁREA	SUBSTÂNCIAS
I	Calcário cristalino e Mármore	XIII	Calcário cristalino e Mármore
II	Calcário cristalino e Mármore	XIV	Bentonita
III	Cobre e Chumbo	XV	Calcário cristalino e Mármore
IV	Ouro	XVI	Apatita e Amianto
V	Ouro	XVII	Argila
VI	Calcário cristalino e Mármore	XVIII	Calcário e Fosfato
VII	Ferro	XIX	Titânio
VIII	Tugstênio e Barita	XX	Rochas ornamentais
IX	Tugstênio, Barita e vermiculita	XXI	Urânio
X	Berilo, Caulim e outros minerais de pegmatito	XXII	Rochas ornamentais
XI	Bentonita	XXIII	Calcário cristalino, Mármore, Ferro-Titânio e Terras raras
XII	Estanho e Berilo		

ANEXO C – Mapa de radiação solar média anual em MJ/m²

Fonte: Atlas Solarimétrico do Brasil, CEPEL/ELETRONBRAS, 2000.