

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL**  
**ESCOLA DE ENGENHARIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO E TRANSPORTES**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO DE GRADUAÇÃO**

**ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICA DE SECADORES NATURAIS NA  
MINERAÇÃO DE FOSFATO**

**DIEGO MARQUES FRANTZ**

**Orientador: Professora Carla ten Caten  
Professor Fabiano Perin Gasparin**

**PORTO ALEGRE**  
**FEVEREIRO/2024**

## Resumo:

A produção nacional de fosfato é insuficiente para suprir a demanda nacional deste importante fertilizante. A Água Fertilizantes, para suprir parte desta demanda, pretende explorar um novo depósito de rochas fosfáticas no Rio Grande do Sul, localizado no distrito de Três Estradas em Lavras do Sul. A mineração seria realizada em uma mina a céu aberto utilizando o conceito, nomeado pela empresa, de sustentabilidade 0-0-0, zero energia, zero água e zero carbono, para tanto pretende-se utilizar um secador solar.

A revisão bibliográfica indicou uma escassez de exemplos de secadores solares na indústria de mineração, contrastando com numerosos estudos de caso na agricultura. Para avaliar a viabilidade econômica do secador solar na mineração, foram elaborados cenários que representam diferentes estações do ano. O Cenário 1 reflete os meses de verão, caracterizados por altas temperaturas, baixa umidade e alta irradiação. O Cenário 2 abrange os meses de inverno, com temperaturas mais baixas, umidade elevada e menor irradiação. O Cenário 3 engloba os meses de outono e primavera, apresentando características intermediárias.

Com base nos dados dos cenários e nos testes realizados pela empresa, modelos matemáticos foram empregados para estimar os tempos de secagem em diversas condições climáticas, métodos de secagem e frequências de revolvimento das leiras. Ao realizar o revolvimento das leiras diariamente há uma redução de 40% nos tempos de secagem em comparação com uma leira estática. Ao realizar o revolvimento uma vez por turno, essa redução é de 70%, e ao revirar a cada hora, a redução é de 77%. Os tempos de secagem ao ar livre estimados podem estar subestimados devido à alta probabilidade de reumidificação, especialmente em épocas mais úmidas como o inverno, sendo este parâmetro não considerado no modelo.

Os tempos de secagem obtidos foram então utilizados para calcular os custos variáveis e fixos dos processos de secagem natural, assim como os custos por absorção ideal com a secagem utilizando o revolvimento do minério 1 vez por turno em estufas representando o melhor custo-benefício, R\$ 3,12, R\$ 3,78 e R\$ 3,06 para os cenários 1, 2 e 3 respectivamente. Esses custos foram comparados com os de métodos tradicionais da indústria, como secadores rotatórios e secadores rápidos, utilizando diferentes tipos de combustíveis. Em relação aos custos de operação, o carvão, a opção mais poluente,

apresenta custos comparáveis aos de um secador natural. Entretanto, ao incluir os custos de operação, manutenção, energia elétrica e equipamentos, resulta em um custo 80,63% maior por tonelada do que o pior resultado obtido com um secador natural, R\$ 5,51 por tonelada adquirido no cenário 2 estático em uma estufa. Conclui-se que o uso da secagem natural é viável na mineração, representando uma oportunidade pouco explorada pela indústria e com alto potencial.

Abstract:

The national production of phosphate is insufficient to meet the national demand for this important fertilizer. To partially address this demand, Água Fertilizantes intends to explore a new deposit of phosphate rocks in Rio Grande do Sul, located in the district of Três Estradas in Lavras do Sul. The mining would be conducted in an open-pit mine using the concept of sustainability 0-0-0, which means zero energy, zero water, and zero carbon emissions. To achieve this, the company plans to use a solar dryer.

A literature review indicated a scarcity of examples of solar dryers in the mining industry, contrasting with numerous case studies in agriculture. To assess the economic feasibility of solar dryers in mining, scenarios representing different seasons of the year were developed. Scenario 1 reflects the summer months, characterized by high temperatures, low humidity, and high irradiation. Scenario 2 covers the winter months, with lower temperatures, higher humidity, and less irradiation. Scenario 3 encompasses the autumn and spring months, featuring intermediate characteristics.

Based on the scenario data and tests conducted by the company, mathematical models were employed to estimate drying times under various climatic conditions, drying methods, and pile turning frequencies. Daily turning of the piles results in a 40% reduction in drying times compared to a static pile. Turning once per shift reduces the time by 70%, and turning every hour results in a 77% reduction. Estimated open-air drying times may be underestimated due to the high probability of rehumidification, especially in more humid periods such as winter, a parameter not considered in the model.

The drying times obtained were then used to calculate variable and fixed costs of natural drying processes, as well as ideal absorption costs with drying using ore turning once per

shift in greenhouses representing the best cost-benefit ratio, which were R\$ 3.12, R\$ 3.78, and R\$ 3.06 for scenarios 1, 2, and 3 respectively. These costs were compared with those of traditional industry methods, such as rotary dryers and flash dryers, using different types of fuels. In terms of operational costs, coal, the most polluting option, presents costs comparable to those of a natural dryer. However, when considering operation, maintenance, electricity, and equipment costs, it results in an 80.63% higher cost per ton than the worst result obtained with a natural dryer which was R\$ 5.51 per ton acquired in scenario 2 static in a greenhouse. It is concluded that the use of natural drying is viable in mining, representing a little-explored opportunity for the industry with high potential.

Palavras Chave: Avaliação de custo; Secagem de minério; Radiação solar.

## 1. Introdução

O Brasil é um país com expressiva produção agrícola sendo que em 2017 6,6% do PIB e 9,4% dos empregos foi estimado como pertencendo ao setor (CIA, 2022). Um dos principais fertilizantes utilizados na agricultura é o fosfato. O fósforo é um componente fundamental na produção de adenosina trifosfato (ATP), a principal molécula armazenadora de energia, utilizada em seres vivos, no DNA e RNA, sendo essencial na fotossíntese tanto como parte do produto final, ATP, quanto como parte de moléculas utilizadas no processo.

O fósforo é utilizado em grandes quantidades pelas plantas e a presença em proporções adequadas no solo é essencial para o crescimento e manutenção da qualidade dos organismos, ou seja, a falta de fósforo no solo prejudica o crescimento das plantas causando prejuízos econômicos à agricultura. A mineração de fosfatos no Brasil busca suprir a necessidade do mercado interno sendo responsável por 0,8% do faturamento do setor mineral. No entanto, a produção nacional tem sido insuficiente para cobrir a demanda do setor agrícola e a importação de rochas fosfáticas foi da ordem de 145 milhões de dólares em 2021 constituindo uma das principais importações de minério do país (IBRAM, 2021).

Nos últimos 10 a 20 anos, dada a grande demanda por fosfatos, a prospecção deste bem mineral foi alvo de estratégias governamentais através de projetos realizados pelo Serviço Geológico do Brasil/Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (SBG/CPRM), empresa

pública vinculada ao Ministério de Minas e Energia, seguido por investimentos privados nacionais e internacionais. A descoberta recente de um depósito mineral de 104 milhões de toneladas de rochas fosfáticas a 4%  $P_2O_5$  (MARTINEZ, 2018) no Rio Grande do Sul, localizado no distrito de Três Estradas em Lavras do Sul, provocou grande interesse por parte do governo do Estado e a entrada da empresa Águia Fertilizantes para desenvolvimento de projeto com vistas a exploração mineral e planejamento de extração. Quando iniciada a extração das rochas fosfáticas, o empreendimento será a primeira mina de fosfato da região sul do país, com capacidade de produção de 300 toneladas do insumo por ano, atendendo aproximadamente 15% da demanda do Rio Grande do Sul.

A forma de extração dos recursos minerais será por via de uma mina a céu aberto considerando que o minério a ser obtido encontra-se na superfície. Por um lado, esta situação geológica e de mineração constitui custos menos elevados que outras alternativas como mineração subterrânea, porém resulta em um minério com maior teor de umidade. Na mineração, especialmente em minas a céu aberto, é usual a necessidade de secagem do minério após a extração para adequar aos padrões requeridos para processamento, tais como moagem, ou ao padrão de venda quando não necessário beneficiamento. A umidade permitida no minério de fosfato é de 5%, taxa abaixo da umidade presente na rocha extraída. Consequentemente, para realizar a venda do fosfato, a rocha necessita passar por um processo de secagem para adequação.

Os processos usuais de secagem para o minério de fosfato envolvem a utilização de maquinário de alto custo de aquisição e de operação ou a utilização de combustíveis como carvão e cavaco que geram elevados índices de emissão de carbono. Os elevados custos diminuiriam a viabilidade do projeto e a alternativa de queima de combustíveis fere um dos pilares do projeto e missão da empresa de realizar o desenvolvimento de forma sustentável utilizando o conceito de sustentabilidade 0-0-0, zero energia, zero água e zero carbono.

Assim, com o intuito de realizar a secagem de forma sustentável, a Águia Fertilizantes tem trabalhado na construção de uma forma natural e alternativa para o processo de secagem utilizando a radiação solar. O processo atual de secagem sendo desenvolvido é similar à compostagem, com a criação de leiras onde o material é depositado logo após a extração da mina e revolvido de forma sistemática. A Águia Fertilizantes desenvolveu um protótipo de revolvedor próprio utilizando equipamentos agrícolas descartados com mecanismo de tração através de um trator. Uma das dificuldades do processo é a falta de cobertura sobre as leiras o que acarretaria em reumidificação do material em secagem.

Embora a proposta inovadora da Águia Fertilizantes possa representar um avanço significativo para o projeto Três Estradas e mesmo uma alternativa viável para outros similares na indústria mineral, restam realizar detalhamentos técnicos tais como avaliar a eficiência em diferentes condições e cenários climáticos e estimar custos envolvidos. Desta forma, o presente trabalho tem como principal objetivo realizar parte dos detalhamentos técnicos e efetuar uma análise de custos para um processo de secagem de minério de fosfato utilizando o conceito de sustentabilidade 0-0-0, tendo como base a utilização de secadores solares. Como objetivos específicos o trabalho busca: (1) Estudar uma forma de secagem solar adequada ao processo; (2) Criar cenários de condições climáticas; (3) Simular tempos de secagem para diferentes frequências do sistema que revolve o minério nas leiras, cenários e formas de secagem; (4) Estimar custos do processo; (5) Comparar resultados com o esperado em métodos tradicionais como secadores rotatórios e secadores rápidos.

O trabalho está organizado em 5 seções: (1) Introdução, com contextualização do cenário do fosfato nacional, conceitualização da temática do trabalho e definição dos objetivos; (2) Referencial teórico, com revisão detalhada da literatura científica; (3) Procedimentos Metodológicos, com descrição das técnicas utilizadas no trabalho; (4) Resultados e discussão, com apresentação dos resultados obtidos a partir da aplicação dos procedimentos metodológicos, análise dos resultados e discussão; (5) Conclusões, com resumo das principais conclusões obtidas a partir dos resultados e proposição de trabalhos futuros.

## 2. Referencial Teórico

### 2.1. Desidratação de Minérios

A desidratação de minérios após a extração é um processo essencial na mineração sendo utilizado tanto para remoção de umidade quanto para remover a água em um processo de separação sólido-líquido. Na mineração industrial, segundo Chaedir et al. (2021), a desidratação do minério é um processo de alto uso energético que pode ocorrer tanto no minério *in natura* como após o beneficiamento, podendo ser classificados como métodos de remoção de água, sedimentação e filtração, ou como métodos de secagem, evaporativa ou não evaporativa.

Entre os métodos de remoção de água destacam-se a sedimentação gravitacional, um método de baixo custo e alta capacidade que utiliza a gravidade para separar o minério da água, a sedimentação centrífuga, que utiliza a força centrífuga para separar os sólidos dos

líquidos possuindo como desvantagem a abrasão das peças pelo minério, e a filtração, que utiliza um meio poroso e possui como vantagem boa conservação de água, porém a seleção do filtro adequado apresenta desafios técnicos (CHAEDIR et al., 2021). Já os métodos de secagem funcionam ambos pela introdução de calor ao sistema. O método não evaporativo necessita menos energia por utilizar um solvente para separar a água do minério e o evaporativo ocorre pela transferência do conteúdo de umidade do material para o ar (CHAEDIR et al., 2021).

Um tipo muito comum de secagem evaporativa é a utilização de secadores rotatórios que utilizam energia elétrica ou combustíveis fósseis para funcionar. A mina de níquel do Rio Tuba nas Filipinas utilizava um secador rotatório, porém a alta do preço do petróleo resultaria no fechamento da mina em 1981 quando o preço dos combustíveis subiu para aproximadamente 0,25 dólares o litro. Na época, para secar a produção anual da mina haveria um custo inviável de 5 milhões de dólares. Devido aos altos custos associados, a mina optou por parar de utilizar o secador rotatório e começar a secar o minério utilizando a energia solar. Embora este uso de energia solar alternativo criasse custos de manutenção e operação, eram mínimos quando comparados com a economia gerada (HIRAI, 1987).

## 2.2. Uso da Energia Solar

A utilização de energia solar ainda não é de ampla adoção na indústria sendo utilizada em poucas ocasiões. No entanto, Lingayat et al. (2022) afirma que 75% da energia utilizada na indústria é para fins de energia térmica e que nos próximos anos a energia solar vai se tornar uma alternativa cada vez mais atraente. A energia solar oferece uma diversa gama de opções na geração tanto de energia elétrica quanto energia térmica para diversas formas de aplicações, sendo uma fonte de energia renovável. Entre as opções de conversão da energia solar e respectivas aplicações destacam-se os sistemas fotovoltaicos, os sistemas de aquecimento de ar ou água com coletores solares e coletores híbridos.

Os módulos fotovoltaicos são compostos por células fotovoltaicas. A célula fotovoltaica é um diodo semicondutor capaz de converter a energia solar em eletricidade de corrente contínua. As células individuais produzem baixa tensão e alta corrente, enquanto um módulo composto por várias células conectadas em série alcança condições que atendem uma demanda comercial (OBEIDAT, 2018). As diferentes características das células

fotovoltaicas dependem dos materiais utilizados que determinam eficiência, vida útil e curva característica corrente x tensão da célula (OBEIDAT, 2018).

Vários tipos de coletores solares de ar já foram propostos. Devido à pequena densidade, capacidade térmica e condutividade térmica do ar, os coletores solares de ar são limitados em seu desempenho térmico. Uma configuração de design mais básico consiste em um coletor de ar de placa plana que utiliza um duto de ar e uma placa absorvedora de energia solar (NAIDU e AGARVWAL, 1981), com isolamento na superfície traseira (HEGAZY, 2000). Sistemas de aquecimento de ar com coletores solares de largura variável são considerados interessantes especialmente em situações em que há limitações de espaço disponível (HEGAZY, 2000). O desempenho térmico dos coletores solares para aquecimento de ar depende do material, forma, dimensões e disposição, sendo que pesquisas estão em contínuo desenvolvimento para melhorar o desempenho (e.g. PENG et al., 2010, LI et al., 2017, CHOUKSEY et al., 2022).

Coletores solares de água utilizam a radiação solar para aquecer a água e são uma maneira popular de economizar energia e recursos financeiros. O sistema é normalmente instalado onde há maior incidência de luz solar para aquecimento da água. A água quente é armazenada em um tanque isolado para uso posterior. Uma superfície absorvedora transfere o calor para tubulação aquecendo a água que passa por eles, sendo que alguns sistemas utilizam recirculação o que eleva ainda mais a temperatura (AHMED et al., 2021). Alguns coletores usam tubos de vidro cilíndricos evacuados para receber a energia solar e um cabeçote ou tanque acoplado para coletar a água aquecida que flui através dos tubos (AL-MADANI, 2006).

Um coletor híbrido, também conhecido como um coletor fotovoltaico-térmico, facilita a produção simultânea de energia elétrica e térmica por meio da conversão direta da radiação solar (ASTE et al., 2014). Os coletores híbridos funcionam gerando eletricidade enquanto transferem a energia térmica absorvida pelas células fotovoltaicas para um fluido (líquido ou gasoso), que pode ser utilizado posteriormente. Coletores híbridos para aquecimento de água oferecem maior eficiência térmica e elétrica em comparação com coletores híbridos para aquecimento de ar devido às propriedades térmicas da água. Tipicamente, um coletor híbrido para aquecimento de água consiste em um conjunto de tubos fixados em uma placa em contato térmico com a superfície posterior de um módulo fotovoltaico. No entanto, esses coletores apresentam alguns desafios, como congelamento durante o inverno e diminuição da eficiência de remoção de calor ao longo do tempo devido ao aumento da

temperatura da água (AHMED et al., 2021). Com o uso de um sistema híbrido fotovoltaico-térmico, é possível extrair uma fração térmica da energia solar coletada pelas células fotovoltaicas que não foi convertida em eletricidade. Essa energia pode ser utilizada para aquecer água quente doméstica, armazenando-a em um tanque adequado (ASTE et al., 2014).

### 2.3. Energia solar e sistemas de secagem

A secagem de alimentos/produtos é uma das técnicas mais antigas para preservar alimentos para uso em tempo prolongado. Com o avanço das técnicas de aproveitamento da energia solar o seu uso pode ser ampliado e adaptado para a secagem de minério. Na literatura é possível encontrar diversos trabalhos de revisão que tratam da secagem de produtos agrícolas e suas subdivisões em categorias, tais como os de Mustayen et al. (2014), Kumar e Singh (2020), Kale e Havaldar (2022). De um modo geral, são subdivididos em secadores abertos ou fechados. De acordo com Kumar e Singh (2020), os fechados podem ser subdivididos em secadores solares passivos ou ativos e ambos podem ainda ser subdivididos em tipos direto, indireto e híbrido (Figura 1).

O método mais simples de utilizar a energia solar é expor um material diretamente à radiação solar, o que tem sido utilizado desde tempos antigos. Esse processo envolve espalhar o produto que precisa ser seco sob a luz do sol ao ar livre, sobre suporte como materiais poliméricos, chapas de metal ou diretamente no chão (KALE e HAVALDAR, 2022). A ideia é espalhar uma camada fina do produto sobre uma grande área para maximizar sua exposição à radiação solar. Embora uma parte da radiação incidente na superfície seja refletida, o produto absorve energia térmica suficiente para aumentar sua temperatura e reduzir seu teor de umidade. No entanto, este processo pode ser demorado e pode levar de 10 a 30 dias, dependendo das condições climáticas e requer uma grande superfície de exposição (KUMAR e SINGH, 2020).

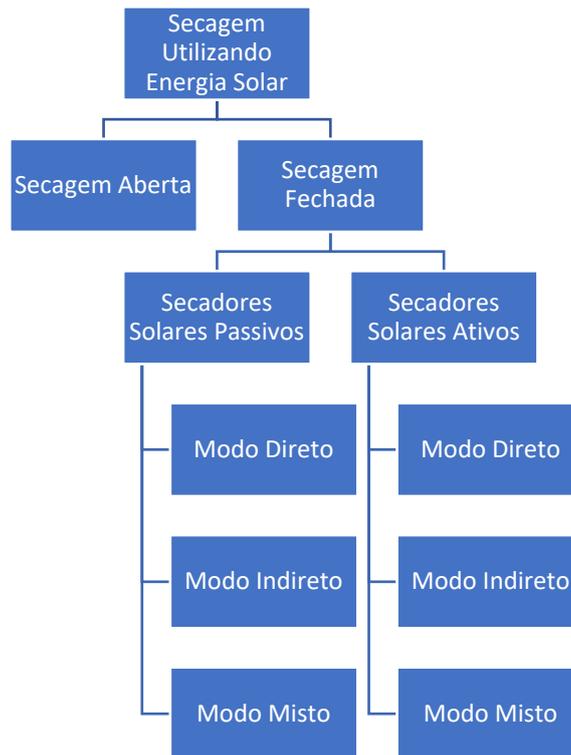


Figura 1. Classificação de sistemas de secagem solar. Adaptado de Kumar e Singh (2020)

Os secadores fechados são classificados em diversas categorias, porém todos possuem em comum a utilização de uma cobertura que auxilia na diminuição da perda de energia térmica para o ambiente. Entre os secadores fechados a primeira classificação pode ser feita entre secadores passivos e ativos conforme a Figura 1. Secadores solares passivos utilizam somente a convecção natural oriunda da diferença de densidade do ar que provoca a movimentação do fluido e remoção da umidade do produto conforme exemplificado na Figura 2A (PATIL e GAWANDE, 2016). Já secadores ativos utilizam algum mecanismo de movimentação de ar e forçam a convecção, conforme exemplificado na Figura 2B (PATIL e GAWANDE, 2016). Os exemplos da Figura 2 são ambos considerados sistemas de secagem diretos, pois o material que está sendo seco está exposto diretamente ao sol.

Outra subdivisão de secadores são os indiretos, nos quais o material não fica exposto diretamente ao sol. O secador passivo indireto utiliza a convecção natural, usualmente do ar, como forma de movimentar a energia térmica obtida em um coletor solar até o material para secá-lo. Já os secadores ativos indiretos se utilizam de mecanismos, como ventiladores, para movimentar o fluido até o local de secagem para remover a umidade do produto.

A última das subdivisões dos secadores são os mistos. Os secadores mistos são aqueles que apresentam características de ambos os secadores, diretos e indiretos. O produto a ser secado se mantém exposto ao sol como em um secador direto, porém o sistema de secagem também utiliza um coletor solar para adquirir mais energia térmica. Em um secador misto, segundo Kumar e Singh (2020), o tempo requerido para secagem é menor que em secadores puramente diretos ou indiretos.

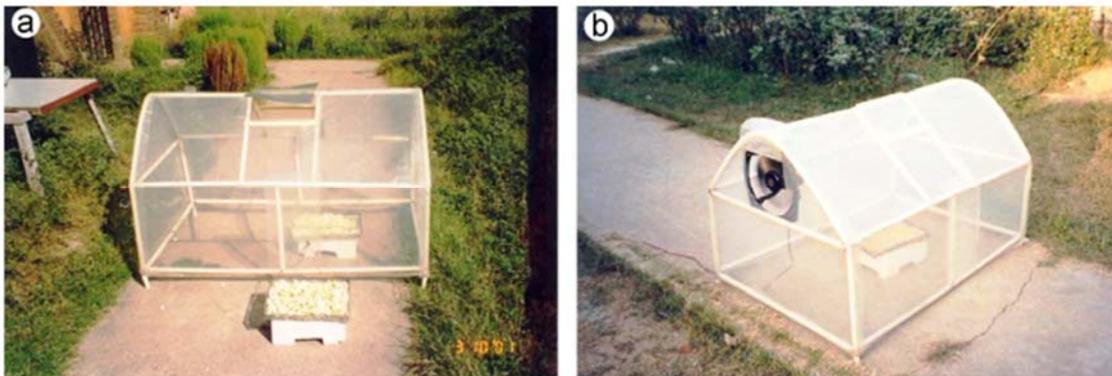


Figura 2. Exemplos de secadores fechados diretos sendo (a) por convecção natural e (b) por convecção forçada. Fonte Patil e Gawande (2016).

#### 2.4. Materiais de Cobertura

O material de cobertura em um secador fechado é de extrema importância, já que representa a principal limitação de entrada de energia no sistema. A cobertura de um coletor solar, segundo Ferreira (2006), deve possuir uma alta transmissividade para maximizar a radiação solar que incide no coletor, e uma baixa capacidade de transmitir a radiação infravermelha, a fim de minimizar as perdas de radiação térmica emitida pelo absorvedor para o ambiente. A baixa transmissividade de radiação infravermelha resulta em um efeito estufa, aumentando a eficiência do coletor. Dentre os materiais normalmente utilizados em estufas, o vidro é o material que mais contribui para o efeito estufa, devido à sua alta transmissividade para a radiação solar, que chega a ser de cerca de 90%, e à baixa transmissividade para a radiação infravermelha (BURIOL et al., 1995).

Em secadores alimentícios, por exemplo, a temperatura de secagem é de extrema importância para garantir a secagem adequada do produto enquanto mantendo as

características de qualidade requeridas. Segundo Palacin et al. (2009), em grãos de café descascados a temperatura de secagem deve ser mantida entre 45°C e 50 °C. Para garantir a faixa de temperatura necessária alguns secadores optam por utilizar coberturas diferentes para reduzir ou aumentar a entrada de energia solar. Eswara e Ramakrishnarao (2013) demonstram que para realizar a secagem de produtos que precisam ser secos na sombra é possível utilizar vidro com um filtro azul para reduzir a radiação total em 40% e a radiação ultravioleta em 20%, porém resultando em um tempo de secagem mais longo que quando utilizado um vidro sem filtro.

Apesar de apresentar as melhores características para a construção de um coletor solar, o vidro nem sempre é escolhido na construção de estufas devido ao alto custo, peso e possibilidade de quebra em caso de granizo. Como alternativas os agricultores utilizam polímeros em coberturas, como o polivinil (PVC), o acetato de etil-vinil (EVA) e o polietileno de baixa densidade (PEBD) que, segundo Buriol et al. (1995), apresentam transmissividade em torno de 82%, 80% e 80% respectivamente. O polietileno de baixa densidade, apesar de ser o menos indicado para uso em estufas devido às suas propriedades ópticas, acaba sendo o mais utilizado devido ao baixo custo.

Os valores de transmissividade usualmente reportados para os materiais plásticos são valores que consideram materiais limpos e novos, porém estes valores são alterados com o uso, passagem de tempo e exposição as intempéries. Segundo Sangpradit (2014), um filme de polietileno, material muito utilizado em coberturas de estufas, possui uma transmissividade de aproximadamente 86% em média, porém ao longo de um período de seis meses, pode diminuir sua transmissividade de 50% a 36% devido ao acúmulo de sujeira e poeira. No entanto, essa perda na transmissividade pode ser reduzida significativamente para apenas 1% por meio de uma simples limpeza.

### 3. Procedimentos Metodológicos

#### 3.1. Descrição do cenário

A empresa Águia Fertilizantes, no distrito de Três Estradas em Lavras do Sul-RS, desenvolve um projeto de pesquisa mineral de rochas fosfáticas a 4% P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, atualmente em estágio de planejamento de extração a céu aberto. Para que o minério esteja de acordo com padrões requeridos para processamento, a umidade permitida é de no máximo 5%, taxa

abaixo do que é extraído. Desta forma é fundamental a realização de um processo de secagem para adequação aos padrões de qualidade da commodity.

Os processos usuais de secagem envolvem a utilização de maquinário de alto custo e índices elevados de emissão de carbono. Isto diminui a viabilidade do projeto, bem como fere a missão da empresa de realizar o processo dentro do conceito de sustentabilidade 0-0-0, zero energia, zero água e zero carbono. Assim, de forma alternativa, a empresa propõe secagem utilizando a luz solar. O processo é similar a compostagem, com a criação de leiras onde o material é depositado logo após a extração da mina. Para garantir a secagem homogênea, se utiliza um revolvedor de arrasto que mistura o conteúdo da leira e deposita novamente. Devido a diferença de abrasividade e densidade do material, ao invés de utilizar um revolvedor de leiras de compostagem, a empresa desenvolveu um protótipo próprio utilizando equipamentos agrícolas descartados com um trator como mecanismo de tração.

Uma das deficiências do processo é a falta de cobertura sobre as leiras, o que pode causar uma reumidificação. Como alternativa, se considera uma cobertura de telhas plásticas transparentes para permitir a passagem da radiação solar. Este sistema provocaria um efeito estufa com aumento na temperatura e, conseqüente, aumento de eficiência da secagem. Telhas plásticas transparentes, entretanto, são menos eficientes neste processo que o vidro, segundo dos Santos e Roriz (2007), porém são mais baratas e leves, e mais resistentes a granizo.

Assim, o presente trabalho busca realizar uma análise de custos para um processo de secagem de minério de fosfato utilizando o conceito de sustentabilidade 0-0-0, tendo como base a utilização de secadores solares. O trabalho realizou o cálculo dos tempos de secagem para os tipos de secadores solares, as coberturas e as frequências do sistema que revolve o minério nas leiras. Foram construídos cenários de condições climáticas, realizando estimativas de tempos de secagem e de custos do processo nos diferentes cenários.

### 3.2. Classificação da Pesquisa

O presente trabalho pode ser classificado quanto a natureza como uma pesquisa aplicada, já que como resultado desta pesquisa busca-se avaliar economicamente um processo de secagem e, segundo da Silva e Menezes (2005), uma pesquisa aplicada procura criar

conhecimentos objetivando à resolução de problemas específicos. Com relação à abordagem, a pesquisa é quantitativa, pois busca desenvolver o processo com base em resultados de tempos de secagem e custos das alternativas de processos. Quanto aos objetivos, o trabalho pode ser classificado como exploratório por buscar alternativas ao conhecimento científico existente (JUNG, 2003) uma vez que não há literatura significativa sobre aplicações de secadores solares em minério de fosfato. Já quanto ao procedimento, se caracteriza como um estudo de caso (JUNG, 2003) considerando que o pesquisador realizou a criação de cenários para estudar profundamente os custos do processo e compará-lo com processos tradicionais.

### 3.3. Etapas do Trabalho

Para atendimento dos objetivos do presente trabalho, foi realizado uma análise de custos para um processo de secagem de minério de fosfato utilizando o conceito de sustentabilidade 0-0-0, tendo como base a utilização de secadores solares, foram realizadas as seguintes etapas: (1) Estudar uma forma de secagem solar adequada ao processo; (2) Criar cenários de condições climáticas; (3) Simular tempos de secagem para diferentes frequências do sistema que revolve o minério nas leiras, cenários e formas de secagem; (4) Estimar custos do processo; (5) Comparar resultados com o esperado em métodos tradicionais como secadores rotatórios e secadores rápidos.

Inicialmente, para a definição do secador solar ideal, foi feita uma pesquisa bibliográfica para identificar os tipos de coletores e secadores solares existentes, assim como materiais de cobertura possíveis, para a seleção dos mais indicados para o processo. A definição dos tipos de coletores, secadores e materiais de cobertura são de extrema importância, pois estes definem a energia térmica disponível no sistema para secar o minério. Devido ao fosfato não necessitar ser mantido em temperaturas específicas para manter as características de qualidade requeridas, foram somente testadas as combinações com potencial de gerar os menores tempos de secagem.

Devido as grandes diferenças climáticas apresentadas durante um ano no Rio Grande do Sul e o impacto que estas diferentes condições climáticas podem ter em secadores solares é imperativo para uma boa análise avaliar o impacto destas variações. Para tal foram criados cenários baseados em condições climáticas normalmente apresentadas no Estado.

Após a criação dos cenários, foi calculado os tempos de secagem baseados nos tamanhos de leiras possíveis de serem adotadas considerando o protótipo da empresa. A definição da frequência que as leiras são revolvidas é pertinente ao planejamento do processo de secagem. O revolvimento das leiras auxilia na homogeneização da umidade do minério, porém representa um custo no processo de secagem pela utilização de trator. Os cálculos dos tempos de secagem para cada tipo de secador selecionado e frequências em cada cenário foram calculados com base em testes realizados pela empresa usando equações de secagem para minérios.

Com base no tipo de secador solar escolhido, assim como nas frequências de revolvimento das leiras, foram calculados os custos variáveis e fixos do processo assim como a quantidade de secadores necessários para atingir as taxas de produção anual da empresa. Os secadores tiveram seus custos estimados utilizando valores de mercado para a construção de galpões agrícolas e o valor de mercado do óleo diesel.

Definidos os tipos de secadores, consumo de combustível e seus custos em cada cenário, o novo processo para ter sua aplicabilidade comprovada deve possuir custos econômicos comparáveis ou inferiores aos métodos tradicionais de secagem. Utilizando por base os custos de operação e absorção ideal, foi realizada uma comparação com os custos de métodos tradicionais de secagem como os de secadores rotatórios e secadores rápidos.

## 4. Resultados

### 4.1. Sistema de Secagem

O minério de fosfato não apresenta variação de qualidade no produto final caso sofra variações de temperatura durante o processo de secagem, conforme testes realizados pela empresa, ou mesmo caso seja exposto a temperaturas mais elevadas do que os secadores solares têm potencial para gerar uma vez que secadores industriais utilizados em mineração de fosfato utilizam gases de secagem que podem atingir temperaturas de 500°C a 800°C. Visto que o fosfato apresenta a característica maior melhor quanto a temperatura, em um processo de secagem, sem precisar de controle de temperatura muito estrito, o tipo de secador mais indicado quanto ao modo seria um direto. Já em relação a atividade dependeria dos custos energéticos da empresa.

A Água optou pela utilização de um secador do tipo direto e passivo, entretanto devido a preocupações com a saúde dos trabalhadores quanto à exposição a gases nocivos durante o processo de secagem, optou-se por utilizar um secador com as laterais abertas para não haver o acúmulo de gases. Com isto, é esperada uma diminuição do efeito estufa possível. Com relação a cobertura do secador, foi escolhido o uso de telhas semitransparentes, embora não apresentem boa transmissividade ou efeito estufa, possuem menor complexidade de construção devido ao baixo peso, assim como menor custo que vidro e menor risco de quebra durante chuvas de granizo, possibilidade alta de ocorrência na região de operação.

#### 4.2. Cenários de condições climáticas

O Rio Grande do Sul apresenta grande variação climática durante o ano. Considerando que o secador selecionado é fortemente dependente do clima, para melhor avaliar a eficácia é necessário avaliar o seu funcionamento frente às diversas condições apresentadas no Estado. Três parâmetros principais dependentes de condições climáticas impactam na construção de cenários para a secagem, a saber: irradiação solar, umidade e temperatura.

A irradiação solar apresentada no Estado varia conforme o ano e devido ao grande impacto gerado em secadores solares ela deve ser levada em consideração na elaboração dos cenários. A irradiação média diária por mês em Lavras do Sul pode ser conferida na tabela 1.

Médias do Total Diário da Irradiação Global Horizontal												
Wh/m <sup>2</sup> .dia												
Anual	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
<b>4520</b>	6452	5885	5021	3832	2763	2312	2599	3251	3836	5069	6325	6901

Tabela 1. Médias do total diário da irradiação global horizontal. Fonte: LABREN - INPE

A umidade do ar é de suma importância para o funcionamento de um secador natural, visto que tem um limite de saturação do ar pela água. Quanto menor a umidade do ar maior a capacidade do ar para absorver a umidade presente no material a ser secado. Para a elaboração dos cenários, foram utilizados os dados de umidade da estação meteorológica de Bagé, região próxima e similar a esperada em Lavras do Sul, conforme o gráfico da figura 3.

## Instituto Nacional de Meteorologia – INMET

Gráfico Comparativo Umidade Relativa (%) || Estação: BAGE (83980)

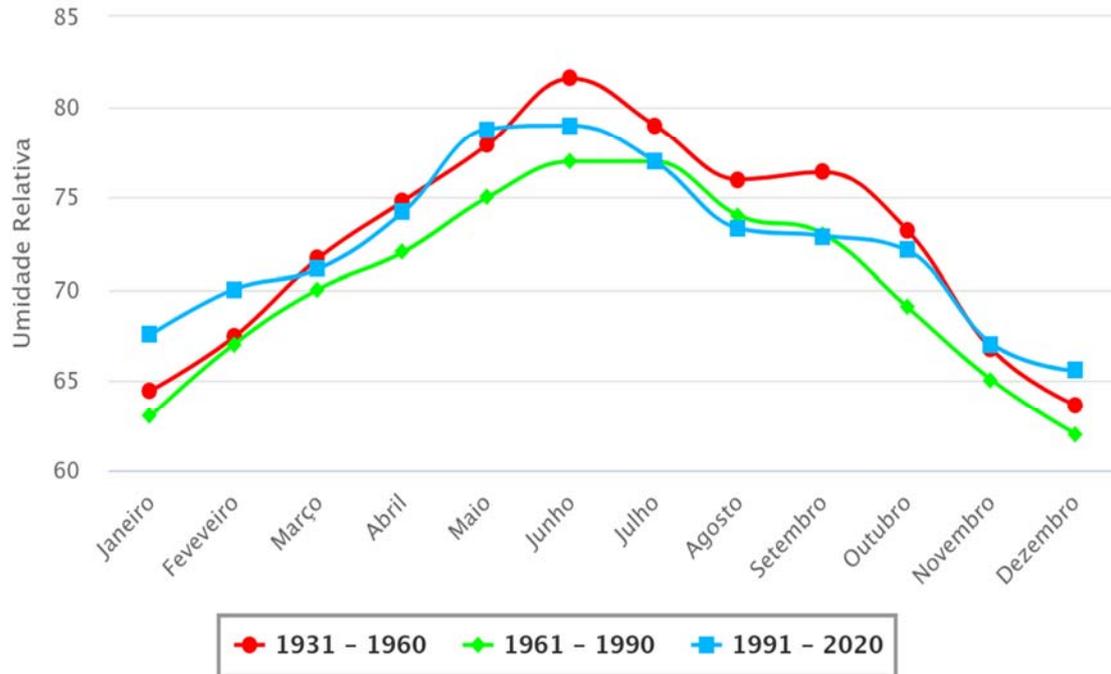


Figura 3. Gráfico de umidade relativa na região de Bagé gerado pelo site do Instituto Nacional de Meteorologia - INMET -dia 12/01/2024

A última variável a ser integrada aos cenários é a temperatura média. A temperatura representa parte da energia disponível no sistema e, uma vez que um secador natural utiliza somente a energia naturalmente disponível no ambiente, a temperatura tem impacto significativo na eficiência de um secador. Para a elaboração dos cenários foi utilizado a temperatura média da estação de Bagé conforme o gráfico da figura 4.

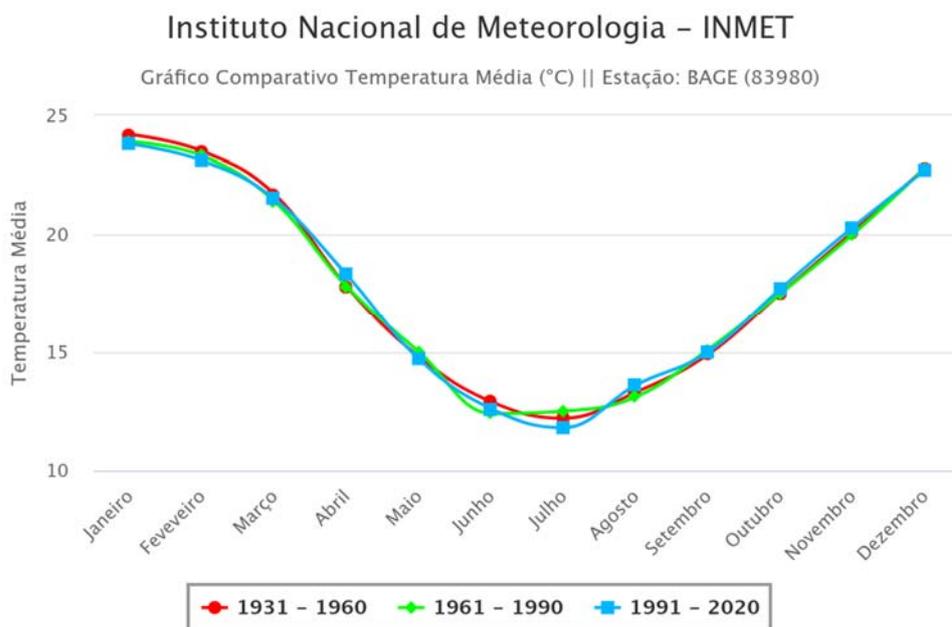


Figura 4. Gráfico de temperatura média na região de Bagé gerado pelo site do Instituto Nacional de Meteorologia - INMET -dia 12/01/2024

Com o intuito de representar as variações climáticas, foram criados diferentes cenários que representam as condições esperadas ao longo do ano. Com estes dados foram gerados três cenários que representam o clima da região em relação a estas variáveis. Os cenários utilizam os dados da tabela 2. O Cenário 1 representa os meses de verão onde as temperaturas são as mais elevadas, a umidade é mais baixa e a irradiação é mais elevada, utilizando a média dos meses de dezembro, janeiro e fevereiro. O Cenário 2 representa os meses de inverno onde as temperaturas são as mais baixas, a umidade é mais elevada e a irradiação é mais baixa, utilizando a média dos meses de junho, julho e agosto. O Cenário 3 representa os meses de outono e de primavera, que devido as similaridades climáticas entre as estações foram agrupadas juntas, este cenário apresenta características intermediárias ao Cenário 1 e 2 em relação à temperatura, umidade e irradiação.

<b>Cenários e Valores</b>			
	<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Umidade (%)</b>	<b>Irradiação (Wh/m².dia)</b>
<b>Cenário 1</b>	23,20	67,67	6412,67
<b>Cenário 2</b>	12,67	76,43	2720,67
<b>Cenário 3</b>	17,92	72,68	4474,33

Tabela 2. Valores médios utilizados em cada cenário

### 4.3. Tempo de secagem

O tempo de secagem do minério pode ser influenciado por diversos fatores como: tamanho da leira, já predefinido pelos limites técnicos do trator escolhido pela empresa assim como o revolvedor; temperatura, que varia com o clima e ambiente de secagem; e, a frequência do revolvimento do material da leira. A frequência do sistema de revolvimento do minério depositado nas leiras é de grande relevância considerando que esta ação serve a dupla função de tanto homogeneizar a umidade da leira quanto acelerar a secagem desta ao remover o efeito isolante gerado pelas camadas mais externas quando secas que impedem a perda de umidade das camadas mais internas.

A análise do impacto da frequência de revolvimento do material das leiras em tempo de secagem pode ser feita de três formas: (i) através de testes variando as frequências nos diferentes períodos do ano e com base nos dados obtidos definir a mais eficiente, o que demanda tempo e custos; (ii) através de modelos matemáticos e simulações para definir a frequência que apresenta o melhor custo-benefício, opção mais rápida e barata que permite teste de diversas permutações, porém tem menor representatividade; ou (iii) através da combinação de ambos os métodos utilizando testes para validar a representatividade do modelo matemático.

O presente trabalho utilizou o terceiro método devido à flexibilidade garantida por modelos matemáticos e a representatividade obtida ao validar o modelo com dados de testes realizados pela empresa e disponibilizados para este estudo. Foi utilizado um modelo matemático conforme o descrito em Tamayo et al. (2017). O modelo foi selecionado devido à similaridade com o assunto, uma vez que utiliza leiras de minérios com deposição similar às empregadas pela Águia. As equações 1, 2, 3, 4 e 5 foram as utilizadas. O modelo foi gerado com suporte de programação em linguagem Python.

$$H(y, \tau) = \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ e^{-k_u \left(\frac{n\pi}{l}\right)^2 \cdot \tau} \cdot [\cos(n\pi) \cdot (A^*) + B^*] \right\} \cdot \sin\left(\frac{n\pi}{l} y\right) + H_0 + \frac{y}{l} [H_s(\tau) - H_0] \quad (1)$$

Equação 1: a equação define a umidade em fator da altura e do tempo. Fonte Tamayo et al. (2017).

H = umidade do material(kg/kg); Ku = coeficiente de condução de umidade(m<sup>2</sup>/s); l = comprimento da superfície(m); τ = tempo de secagem(s); T = temperatura do material (°C); y = altura da camada (m); Ho= umidade inicial do material(kg/kg); Hs = umidade inicial da superfície do material(kg/kg).

$$A^* = \frac{2 \cdot \int_0^{\tau} e^{k_u \left(\frac{n\pi}{l}\right)^2 \cdot \theta} \cdot R_n(\theta) d\theta - 2[H_1 - H_s(0)]}{n\pi} \quad (2)$$

Equação 2: define A fonte Tamayo et al. (2017)

θ = ângulo de inclinação da superfície.

$$B^* = \frac{2[H_0 - H_s(0)] \cdot \sin(n\pi)}{n^2 \pi^2} - \frac{2(H_0 - H_1)}{n\pi} \quad (3)$$

Equação 3: define B fonte Tamayo et al. (2017)

$$R_n(\tau) = \frac{2}{l} \cdot \int_0^l R(y, \tau) \cdot \sin\left(\frac{n\pi}{l} y\right) dy = \frac{2}{l} \left[ \int_0^l f(y, \tau) - \frac{y}{l} \frac{dH_s}{d\tau} \right] \cdot \sin\left(\frac{n\pi}{l} y\right) dy \quad (4)$$

Equação 4: define R<sub>n</sub> fonte Tamayo et al. (2017)

$$R(y, \tau) = \sum_{n=1}^{\infty} \left[ \frac{2}{l} \cdot \int_0^l R(y, \tau) \cdot \sin\left(\frac{n\pi}{l} y\right) dy \right] \cdot \sin\left(\frac{n\pi}{l} y\right) \quad (5)$$

Equação 5: define R fonte Tamayo et al. (2017)

O modelo teve seus resultados validados utilizando dados de umidade de testes realizados pela empresa com uma leira no verão sem utilizar revolvimento da leira. Os dados adquiridos pela empresa foram utilizados para calcular a perda de umidade por segundo. A partir desta informação, o modelo gerado calculou a perda de umidade por dia em uma leira de características similares, considerando um dia como 12 horas de exposição ao sol, conforme descrito em Tamayo et al. (2017). Coeficientes para condições diferentes das testadas foram calculados de forma a manter as taxas de secagem proporcionais.

Os cenários anteriormente definidos fornecem as características ambientais em um processo de secamento ao ar livre, entretanto, como forma de acelerar a secagem assim como evitar a reumidificação das leiras devido à chuva, sugere-se utilizar uma estufa. As temperaturas no interior da estufa nos diferentes cenários foram calculadas conforme as equações de Reisser Júnior et al. (2003) para estufas sem telas, equação 6. As equações foram escolhidas por usarem como base os dados climáticos de Eldorado do Sul, cidade com clima similar a Lavras do Sul.

$$ST = 0,981 T + 1,411$$

Equação 6: temperatura média diurna de uma estufa sem telas com base na temperatura externa.

T = temperatura ambiente (°C).

Os tempos de secagem apresentaram significativas variações dependendo das condições de secagem, tanto com relação as temperaturas de secagem quanto com relação à frequência de revolvimento das leiras, conforme apresentado na figura 5. Nota-se expressiva mudança nos tempos de secagem ao realizar um revolvimento das leiras por dia havendo uma redução de 40% quando comparado a uma leira estática, e ao realizar um revolvimento por turno há uma redução de 70% quando comparado a uma leira estática, e ao realizar um revolvimento por hora há uma redução de 77% quando comparado a uma leira estática. Importante frisar que os tempos de secagem ao ar livre são potencialmente subestimados uma vez que a probabilidade de reumidificação é alta, em especial em épocas mais úmidas como o inverno, e este parâmetro não foi considerado no modelo.

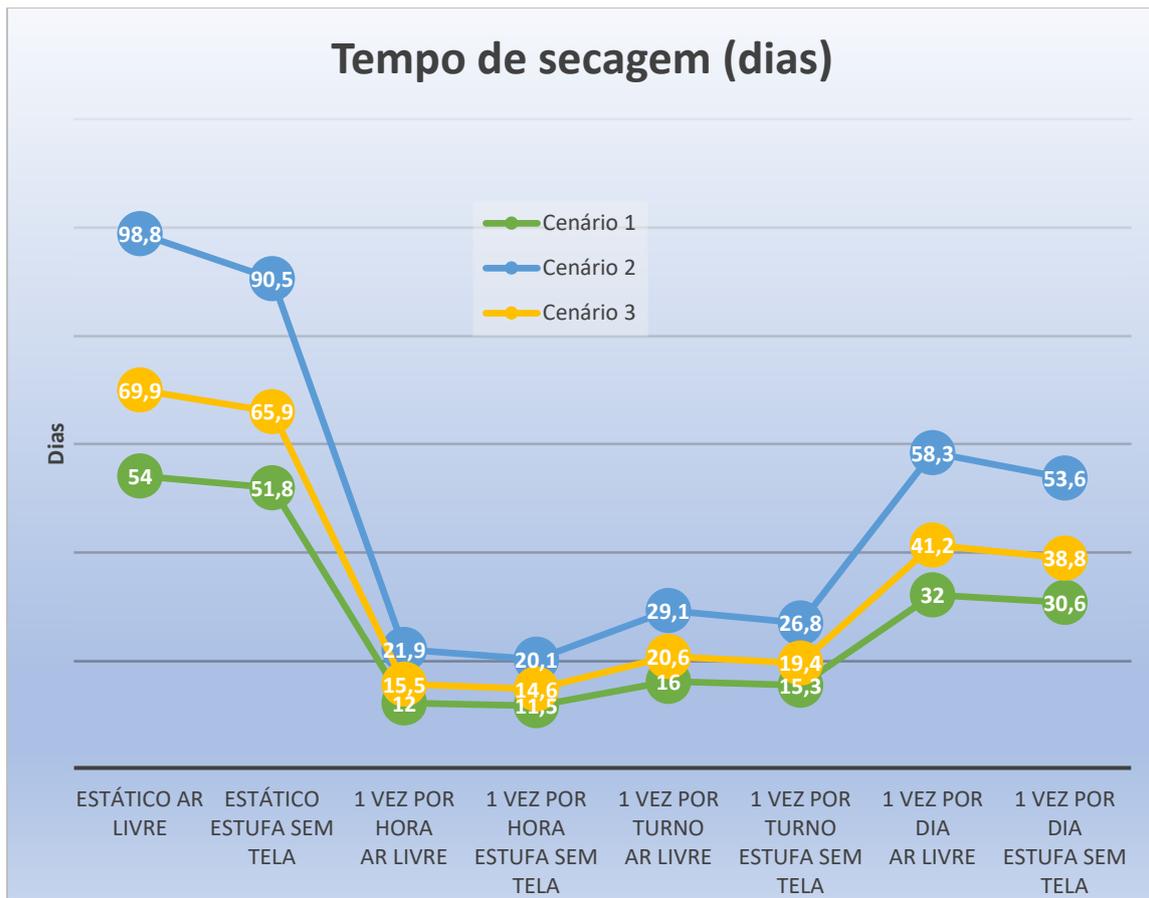


Figura 5. Gráfico de tempos de secagem em condições diferentes de secagem.

#### 4.4. Custos do processo

Os custos do processo foram divididos quanto à variabilidade em custo variável e em custo fixo, não sendo identificados custos semi-variáveis ou semi-fixos. Já com relação à facilidade de atribuição, todos os custos fornecidos pela empresa se caracterizaram como diretos, não sendo identificado custos indiretos. O trabalho utilizou como grau de medida a tonelada de minério por ser a métrica usual da indústria de mineração, umidade inicial do processo de 17%, umidade de saída de 5% e custos, todos parâmetros fornecidos pela empresa, para realizar o cálculo.

O revolvimento do minério representa não só um dos principais fatores que afetam a eficiência do sistema de secagem, mas também o seu principal custo variável. A frequência de revolvimento das leiras mostrou possuir significativa influência no custo variável conforme apresentado na Tabela 3, assim como o tempo de secagem associado aos cenários com os custos de secagem quase dobrando entre o cenário 1 e 2. Para efeito de cálculo foi

utilizado óleo diesel à R\$ 5,85/l. Vale destacar que os custos variáveis para revolvimento 1 vez por hora são significativamente maiores que os de revolvimento uma vez por turno porém sem haver uma redução proporcional de tempo de secagem.

<b>Custo Variável por Tonelada de Minério</b>			
	<b>Cenário 1</b>	<b>Cenário 2</b>	<b>Cenário 3</b>
<b>Estático Ar livre</b>	<b>R\$ 0,00</b>	<b>R\$ 0,00</b>	<b>R\$ 0,00</b>
<b>Estático Estufa sem tela</b>	<b>R\$ 0,00</b>	<b>R\$ 0,00</b>	<b>R\$ 0,00</b>
<b>1 vez por hora Ar livre</b>	<b>R\$ 0,56</b>	<b>R\$ 1,02</b>	<b>R\$ 0,72</b>
<b>1 vez por hora Estufa sem tela</b>	<b>R\$ 0,54</b>	<b>R\$ 0,94</b>	<b>R\$0,68</b>
<b>1 vez por turno Ar livre</b>	<b>R\$ 0,37</b>	<b>R\$ 0,68</b>	<b>R\$ 0,48</b>
<b>1 vez por turno Estufa sem tela</b>	<b>R\$ 0,36</b>	<b>R\$ 0,63</b>	<b>R\$ 0,45</b>
<b>1 vez por dia Ar livre</b>	<b>R\$ 0,13</b>	<b>R\$ 0,23</b>	<b>R\$ 0,16</b>
<b>1 vez por dia Estufa sem tela</b>	<b>R\$ 0,12</b>	<b>R\$ 0,21</b>	<b>R\$ 0,15</b>

Tabela 3: Custos variáveis dos cenários

Os diferentes tempos de secagem requerem números de estufas diferentes para manter as leiras em estoque e atingir a produção anual de minério esperada. Para cálculo do número de estufas necessárias foram utilizadas leiras de 2500 toneladas com ROM, run-of-mine, produto da mina que entra no processo de beneficiamento, diário de 1002 toneladas e estufas com dimensões de 10 metros de largura por 100 de comprimento. Conforme demonstrado na Tabela 4 é possível perceber que frequências inferiores a 1 vez por turno resultam em um aumento significativo da quantidade de estufas necessárias e a secagem estática utiliza um número proibitivo de leiras para o espaço disponível para secagem.

<b>Estufas</b>			
	<b>Cenário 1</b>	<b>Cenário 2</b>	<b>Cenário 3</b>
<b>Estático Ar livre</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>
<b>Estático Estufa sem tela</b>	<b>26</b>	<b>44</b>	<b>32</b>
<b>1 vez por hora Ar livre</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>
<b>1 vez por hora Estufa sem tela</b>	<b>7</b>	<b>11</b>	<b>9</b>
<b>1 vez por turno Ar livre</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>
<b>1 vez por turno Estufa sem tela</b>	<b>9</b>	<b>14</b>	<b>11</b>
<b>1 vez por dia Ar livre</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>
<b>1 vez por dia Estufa sem tela</b>	<b>16</b>	<b>27</b>	<b>20</b>

Tabela 4: Quantidades de estufas necessárias para cada cenário

Os custos fixos do processo foram calculados utilizando o custo por tonelada dos salários de funcionários que diretamente trabalham no processo, dado fornecido pela empresa, depreciação de equipamentos, pá carregadeira e caminhão com caçamba, assumindo 18 anos de utilização e estufas com 18 anos de vida útil. Os custos fixos apresentaram variação somente com relação com a quantidade de estufas utilizadas no processo, conforme demonstrado na Tabela 5, com a secagem estática em estufas apresentando os piores resultados.

<b>Custo Fixo por Tonelada de Minério</b>			
	<b>Cenário 1</b>	<b>Cenário 2</b>	<b>Cenário 3</b>
<b>Estático Ar livre</b>	<b>R\$ 2,05</b>	<b>R\$ 2,05</b>	<b>R\$ 2,05</b>
<b>Estático Estufa sem tela</b>	<b>R\$ 4,10</b>	<b>R\$ 5,51</b>	<b>R\$ 4,57</b>
<b>1 vez por hora Ar livre</b>	<b>R\$ 2,05</b>	<b>R\$ 2,05</b>	<b>R\$ 2,05</b>
<b>1 vez por hora Estufa sem tela</b>	<b>R\$ 2,60</b>	<b>R\$ 2,92</b>	<b>R\$ 2,7603</b>
<b>1 vez por turno Ar livre</b>	<b>R\$ 2,05</b>	<b>R\$ 2,05</b>	<b>R\$ 2,05</b>
<b>1 vez por turno Estufa sem tela</b>	<b>R\$ 2,76</b>	<b>R\$ 3,15</b>	<b>R\$ 2,92</b>
<b>1 vez por dia Ar livre</b>	<b>R\$ 2,05</b>	<b>R\$ 2,05</b>	<b>R\$ 2,05</b>
<b>1 vez por dia Estufa sem tela</b>	<b>R\$ 3,31</b>	<b>R\$ 4,17</b>	<b>R\$ 3,62</b>

Tabela 5: Custos fixos dos cenários

O custeio por absorção ideal é calculado com os custos variáveis acrescidos dos custos fixos, sem haver a inclusão de perdas normais ou anormais. Os custos ideais do processo seguem conforme a Tabela 6.

<b>Custo Ideal por Tonelada de Minério</b>			
	<b>Cenário 1</b>	<b>Cenário 2</b>	<b>Cenário 3</b>
<b>Estático Ar livre</b>	<b>R\$ 2,05</b>	<b>R\$ 2,05</b>	<b>R\$ 2,05</b>
<b>Estático Estufa sem tela</b>	<b>R\$ 4,10</b>	<b>R\$ 5,51</b>	<b>R\$ 4,57</b>
<b>1 vez por hora Ar livre</b>	<b>R\$ 2,61</b>	<b>R\$ 3,08</b>	<b>R\$ 2,78</b>
<b>1 vez por hora Estufa sem tela</b>	<b>R\$ 3,16</b>	<b>R\$ 3,86</b>	<b>R\$ 3,44</b>
<b>1 vez por turno Ar livre</b>	<b>R\$ 2,43</b>	<b>R\$ 2,73</b>	<b>R\$ 2,54</b>
<b>1 vez por turno Estufa sem tela</b>	<b>R\$ 3,12</b>	<b>R\$ 3,78</b>	<b>R\$ 3,06</b>
<b>1 vez por dia Ar livre</b>	<b>R\$ 2,18</b>	<b>R\$ 2,28</b>	<b>R\$ 2,21</b>
<b>1 vez por dia Estufa sem tela</b>	<b>R\$ 3,43</b>	<b>R\$ 4,38</b>	<b>R\$ 3,78</b>

Tabela 6: Custos por absorção ideal dos cenários

As leiras estáticas ao ar livre possuem os menores custos, entretanto, não sendo significativamente mais baratas que em leiras revolvidas 1 vez por dia, porém havendo grande diferença nos tempos de secagem. Enquanto os custos associados a frequência de revolvimento do minério são significativos, o impacto do tempo de secagem e necessidade de maior número de estufas para comportar as leiras acaba por ser mais significativo. O revolvimento do minério 1 vez por turno em estufas representa o melhor custo-benefício, R\$ 3,12, R\$ 3,78 e R\$ 3,06 para os cenários 1, 2 e 3 respectivamente, por possuir os menores custos de secagem dentre as estufas e não apresentar probabilidade de reumidificação, que não foi considerada no modelo, resultando em melhor capacidade de programar a produção. Os piores resultados obtidos foram em uma secagem estática em uma estufa sem tela, obtendo R\$ 4,10, R\$ 5,51 e R\$ 4,57 nos cenários 1, 2 e 3 respectivamente.

#### 4.5.Comparação com Processos Tradicionais

Secadores naturais apresentam como vantagens baixas ou nenhuma emissão de gases de efeito estufa quando comparadas a métodos de secagem tradicionais na indústria como secadores rotatórios ou secadores rápidos, também conhecidos como secadores tubular de ar de arraste. Enquanto estes têm potencial de serem utilizados de forma não poluente, os custos energéticos para aquecimento do ar a temperaturas entre 500°C e 800°C tornam sua utilização proibitiva sem a queima de combustíveis. A escolha, portanto, do combustível define seu custo variável, apresentados na tabela 7 conforme dados fornecidos pela empresa.

Custo Variável (R\$/ton produto final)				
Secador	GN (3,29 R\$/m <sup>3</sup> )	Biomassa 40% umidade (0,31 R\$/kg)	BPF (2,90 R\$/kg)	Carvão 32% cinzas (0,21 R\$/Kg)
Secador rotatório	54,62	20,81	47,64	6,27
Secador rápido	38,74	14,76	33,79	4,45

Tabela 7: Custos Variáveis para secadores utilizando diferentes combustíveis. Dados fornecidos pela empresa

Os custos variáveis destes secadores apresentam uma escala diferente de preço quando comparadas a secadores naturais. Os custos por metro cúbico de gás natural já incluem os custos de aquisição de equipamentos, havendo diminuição do custo após 10 a 15 anos, não sendo fornecidos os dados de custo sem a aquisição de equipamentos.

Custo por Absorção Ideal (R\$/ton produto final)				
Secador	GN	Biomassa 40% umidade	BPF	Carvão 32% cinzas
Secador rotatório	56,34	24,60	49,95	11,54
Secador rápido	40,70	18,79	36,33	9,95

Tabela 8: Custos por absorção ideal para secadores utilizando diferentes combustíveis. Dados fornecidos pela empresa

Os custos por absorção ideal dos secadores tradicionais apresentados na tabela 8 demonstram que mesmo no cenário 2 ao utilizar secagem sem revolvimento do minério, dentre os testes o que apresentou os custos mais elevados, a secagem natural resultaria em custos significativamente menores. O carvão, opção mais poluente, possui os únicos custos comparáveis aos de um secador natural, entretanto quando inclusos os custos de operação, manutenção, energia elétrica e equipamentos resulta em um custo 80,63% maior por tonelada que o pior resultado adquirido em um secador natural, R\$ 5,51 por tonelada adquirido no cenário 2 estático em uma estufa sem tela.

## 5. Conclusões

O artigo abordou a utilização de secadores solares em uma mineração de rochas fosfáticas avaliando seus custos e viabilidade econômica. A pesquisa bibliográfica realizada encontrou poucos exemplos de secadores solares sendo utilizados na mineração, porém sendo encontrados diversos exemplos na agricultura que poderiam ser adaptados conforme as necessidades do material a ser secado. A partir de dados climáticos foram criados cenários para representar as diferentes estações do ano. Com base nos dados dos cenários criados e testes realizados pela empresa foram utilizados modelos matemáticos para estimar os tempos de secagem em diferentes condições climáticas, formas de secagem e frequências de revolvimento das leiras. Os tempos de secagem foram então utilizados para calcular os custos variáveis e fixos dos processos de secagem natural, assim como seus custos por absorção ideal. Estes, foram então comparados com métodos de secagem tradicionais na indústria, como secadores rotatórios e secadores rápidos, com diferentes tipos de combustíveis concluindo-se que o uso da secagem natural é viável para a mineração, representando uma oportunidade pouco utilizada ainda pela indústria e de alto potencial.

Secadores naturais apresentam significativa oportunidade econômica para mineradoras de pequeno e médio porte ao reduzir significativamente os custos associados ao processo de secagem, uma das principais operações do processo de beneficiamento. Com relação ao objetivo específico do trabalho foram identificadas como vantagens os secadores naturais apresentam: (i) capacidade de escalonamento menos custosa que secadores tradicionais ao utilizar estufas de produção barata e de capacidade técnica de construção de ampla disponibilidade; (ii) emissões nulas ou baixíssimas dependendo da forma ou quantidade de revolvimentos do minério; (iii) os custos de operação utilizando carvão, a opção mais poluente, são 80,63% maior por tonelada do que o pior resultado obtido com um secador natural, R\$ 5,51 por tonelada adquirido no cenário 2 estático em uma estufa sem tela. Já como desvantagens os secadores naturais possuem: (i) necessidade de programação da produção com semanas de antecedência; (ii) necessidade de utilização de área proporcional ao tamanho da produção, criando potencial problema ambiental dependendo do tamanho da mineração.

Os secadores naturais apresentam vantagens extremamente significativas para mineradoras em um mercado cada vez mais consciente com os impactos ambientais, sendo uma alternativa pouco explorada para a indústria demonstrado pela baixa disponibilidade de estudos de casos ou pesquisas realizadas sobre o assunto aplicadas a mineração. Como oportunidades de estudos futuros recomenda-se a análise de custos para diferentes tipos de minérios em zonas do país mais próprias para o uso de secadores solares, a análise de tempos de atravessamento para o minério em mineradoras de larga escala, tempos de secagem utilizando secadores solares de melhor eficiência que os utilizados neste estudo e a avaliação da diminuição de emissões ao utilizar secadores naturais.

Agradecimentos:

A Água Fertilizantes por disponibilizar os dados, especialmente ao engenheiro Anderson Visconcini e ao CEO da Água Fertilizantes Fernando Talarico.

Ao professor Diego Marques do instituto de geociências da UFRGS, pelo auxílio na programação em Python.

Aos meus orientadores, pela paciência e por me ajudarem a executar este trabalho.

E aos meus pais, por todo o apoio, que sem este não teria conseguido ter chegado aqui.

## Referências:

Ahmed, S. F., Khalid, M., Vaka, M., Walvekar, R., Numan, A., Rasheed, A. K., & Mubarak, N. M. (2021). Recent progress in solar water heaters and solar collectors: A comprehensive review. *Thermal Science and Engineering Progress*, 25, 100981.

Al-Madani, H. (2006). The performance of a cylindrical solar water heater. *Renewable Energy*, 31(11), 1751-1763.

Aste, N., Del Pero, C., & Leonforte, F. (2014). Water flat plate PV–thermal collectors: a review. *Solar Energy*, 102, 98-115.

Buriol, G. A., Streck, N. A., Petry, C., & Schneider, F. M. (1995). Transmissividade à radiação solar do polietileno de baixa densidade utilizado em estufas. *Ciência Rural*, 25, 1-4.

Chaedir, B. A., Kurnia, J. C., Sasmito, A. P., & Mujumdar, A. S. (2021). Advances in dewatering and drying in mineral processing. *Drying Technology*, 39(11), 1667-1684.

Chouksey, V. K., Singh Yadav, A., Raha, S., Shrivastava, V., & Shrivastava, S. P. (2022). A theoretical parametric analysis to optimize the bed depth of packed bed solar air collector. *International Journal of Green Energy*, 19(7), 775-785.

Da Silva, E. L., & Menezes, E. M. (2005). Metodologia da pesquisa e elaboração de dissertação. UFSC, Florianópolis, 4a. edição, 123.

dos Santos, J. C. P., & Roriz, M. (2007). Influência do ângulo de incidência na transmitância de luz natural através de materiais transparentes. *Ambiente Construído*, 7(4), 123-135.

Eswara, A. R., & Ramakrishnarao, M. (2013). Solar energy in food processing—a critical appraisal. *Journal of food science and technology*, 50(2), 209-227.

Ferreira, A. G., Maia, C. B., Valle, R. M., & Cortez, M. F. B. (2006). Balanço energético de uma chaminé solar. *RECIEV*, 15, 37-43.

HEGAZY, Adel A. Thermohydraulic performance of air heating solar collectors with variable width, flat absorber plates. *Energy conversion and management*, v. 41, n. 13, p. 1361-1378, 2000.

Hirai, H., Katamura, K., Mamacly, F. P., & Fujimura, T. (1987). Development and mine operation at Rio Tuba nickel mine. *International Journal of Mineral Processing*, 19(1-4), 99-114.

[http://labren.ccst.inpe.br/atlas2\\_tables/RS\\_glo.html](http://labren.ccst.inpe.br/atlas2_tables/RS_glo.html) (acesso 15/01/2023)

<https://clima.inmet.gov.br/GraficosClimatologicos/DF/83377> (acesso 12/01/2023)

<https://www.cia.gov/the-world-factbook/countries/brazil/#economy> (acesso 19/12/2022)

IBRAM. 2021. Infográfico – Mineração em Números – 2021 (acesso 19/12/2022)

Jung, C. F. (2003). Metodologia científica. Ênfase em pesquisa tecnológica, 3(41), 41.

Kale, S. G., & Havaldar, S. N. (2022). Performance enhancement techniques for indirect mode solar dryer: A review. *Materials Today: Proceedings*.

Li, S., Wang, H., Meng, X., & Wei, X. (2017). Comparative study on the performance of a new solar air collector with different surface shapes. *Applied thermal engineering*, 114, 639-644.

Lingayat, A., Zachariah, R., & Modi, A. (2022). Current status and prospect of integrating solar air heating systems for drying in various sectors and industries. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 52, 102274.

Martinez, G. A. (2018). Caracterização petrográfica e geoquímica das rochas glimeríticas do complexo alcalino-carbonatítico Três Estradas, Lavras do Sul, RS.

Mustayen, A. G. M. B., Mekhilef, S., & Saidur, R. (2014). Performance study of different solar dryers: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 34, 463-470.

Naidu, G. M., & Agarwal, J. P. (1981). A theoretical study of heat transfer in a flat-plate solar collector. *Solar energy*, 26(4), 313-323.

Obeidat, F. (2018). A comprehensive review of future photovoltaic systems. *Solar Energy*, 163, 545-551.

Palacin, J. J. F., Lacerda Filho, A. F., de Castro Melo, E., & Teixeira, E. C. (2009). Secagem combinada de café cereja descascado. *Revista Engenharia na Agricultura-REVENG*, 17(3).

Patil, R., & Gawande, R. (2016). A review on solar tunnel greenhouse drying system. *Renewable and sustainable energy reviews*, 56, 196-214.

Peng, D., Zhang, X., Dong, H., & Lv, K. (2010). Performance study of a novel solar air collector. *Applied Thermal Engineering*, 30(16), 2594-2601.

Pereira, E. B., Martins, F. R., de Abreu, S. L., & R  ther, R. (2006). Atlas brasileiro de energia solar (Vol. 1). S  o Jos   dos Campos: Inpe.

Reisser J  nior, C., Radin, B., Bergamaschi, H., Matzenauer, R., Didone, I. (2003). Rela  es Entre a Temperatura do Ar em Ambientes de Estufa com e sem Tela Antiinsetos e no Ambiente Externo. Congresso Brasileiro de Agrometeorologia (13.: 2003: Santa Maria)

Sangpradit, K. (2014). Study of the solar transmissivity of plastic cladding materials and influence of dust and dirt on greenhouse cultivations. *Energy Procedia*, 56, 566-573.

Tamayo, E. T., Guadalupe, J. L., Mediaceja, Y. R., D  az, E. J., Pazmi  o, J  come, J. R., D  az, C. M. (2017). Mathematical modeling of the natural solar drying process in lateritic mineral deposits. *International Journal of Mechanics* Volume 11, 2017