

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO  
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETRÔNICA  
CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM AUTOMAÇÃO INDUSTRIAL

JOÃO PAULO BEDRECHUK

**ESTUDO DE CASO: APLICAÇÃO DE UM CONTROLE DE ENERGIA  
ESPECÍFICA EM REFINADORES A DISCO**

MONOGRAFIA DE ESPECIALIZAÇÃO

CURITIBA  
2016

JOÃO PAULO BEDRECHUK

**ESTUDO DE CASO: APLICAÇÃO DE UM CONTROLE DE ENERGIA  
ESPECÍFICA EM REFINADORES A DISCO**

Monografia de Especialização, apresentado ao Curso de Especialização em Automação Industrial, do Departamento Acadêmico de Eletrônica, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, como requisito parcial para obtenção do título de Especialista.

Orientador: Prof. Carlos Raimundo Erig de Lima.

CURITIBA  
2016

## RESUMO

BEDRETSCHUK, João Paulo. **Estudo de Caso: Aplicação de um Controle de Energia Específica em Refinadores a Disco**. 2016. 49 f. Monografia (Curso de Especialização em Automação Industrial), Departamento Acadêmico de Eletrônica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2017.

O presente trabalho aborda o estudo de caso da Fábrica de Papel e Celulose WestRock, mais especificamente o processo de preparação da pasta celulósica, para que se possa formar o papel a ser produzido, garantindo a ele os padrões de qualidade exigidos pelo mercado. Neste sentido, aborda-se o processo de refinação e o controle da intensidade de refino das fibras, principais aspectos do preparo de massa.

Os refinadores utilizados na fábrica são refinadores a disco e, o controle da intensidade de refino é realizada aproximando ou afastando os discos do refinador, de modo a aumentar ou diminuir os impactos impressos as fibras. Desta maneira, o controle de aproximação dos discos era anteriormente realizado de forma manual, pelo operador, baseando-se em alguns testes de laboratório.

Neste estudo, propomos a avaliação dos resultados da implementação de um controle automatizado de refino, visando entender quais os ganhos e melhorias proporcionados pelo mesmo.

O controle implementado utiliza os dados de potência de refinação, vazão e consistência da pasta celulósica, para realizar o controle de aproximação dos discos dos refinadores, baseado em um set-point pré definido pelo operador. Neste caso, o operador continua a determinar os níveis de refinação requeridos, porém o controle automático impede que, ao entrar uma maior quantidade de massa nos refinadores, a potência dos mesmos aumente consideravelmente, proporcionando um excesso de refinação e um consumo de energia muito elevado e desnecessário. O processo inverso também é controlado, impedindo que os refinadores refinem pouco as fibras devido a uma queda no fluxo de massa que passa por eles.

Considerando este controle de refino, a pasta celulósica passa a ser refinada de uma forma mais homogênea, impedindo que as fibras sofram perdas em características importantes durante a formação do papel.

Por fim, são avaliados os dados obtidos através de medidas reais da máquina em operação. O trabalho demonstra as melhorias proporcionadas pelo controle de energia específica de refino, tanto nos aspectos de qualidade e economia de energia, como no aumento da produção e, conseqüentemente na lucratividade da empresa.

A conclusão do estudo demonstra que o controle de refino está diretamente relacionado a qualidade do papel e produção do mesmo. Além disto, ao reduzir o consumo de energia dos refinadores, a fabricação do papel passa a ter um custo menor e, conseqüentemente a empresa passa a ter maior competitividade no mercado.

**Palavras chave:** Energia Específica. Automação. Refinação.

## ABSTRACT

BEDRETSCHUK, João Paulo. **Case Study: Application of a Specific Energy Control in Disc Refiner**. 2016. 49 f. Monografia (Curso de Especialização em Automação Industrial), Departamento Acadêmico de Eletrônica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2017.

The present paper approaches the case study in the WestRock Pulp and Paper Factory, more specifically the process of preparing the cellulosic pulp, so that the paper to be produced can be formed, making sure the quality standards required by the market. In this sense, are discussed the process and control of the refining intensity of the fibers, main aspects of the dough preparation.

The refiners used in the factory are disc ones, and the refining intensity control is performed by closing or opening the distance between the discs from the refiner in order to increase or decrease the printed impacts of the fibers. Previously the approach control of the disks was carried out manually by the operator, based on some laboratory tests.

In this study, we propose the evaluation of the results of implementation of an automated refining control, in order to understand the gains and improvements provided by it.

The implemented control uses the refining potency, flow and cellulose consistency data to perform a approximation control of the refiner discs, based on a setpoint defined by the operator. In this case, the operator continues to determine the required refining levels, but the automatic control prevents that its potency increases considerably, when a greater amount of dough enters the refiners, providing an excess of refining and a very high energy consumption that is unnecessary. The reverse process is also controlled, preventing refiners from refining the fibers sparingly because of a drop in the dough flow through them.

Considering this refining control, the cellulosic pulp is refined in a more homogeneous way, preventing the fibers from losing important characteristics during paper formation.

Finally, the data obtained through actual measurements of the machine in operation are evaluated. The paper shows the improvements provided by the refining using the energy control, both in terms of quality and energy savings, as well as increased production and, consequently, the company's profitability.

The conclusion of the study demonstrates that the refining control is directly related to the quality of the paper and its production. In addition, by reducing the energy consumption of refiners, papermaking becomes less expensive and, as a result, the company becomes more competitive in the market.

**Keywords:** Specific Energy. Automation. Refining.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 01 – Estrutura Celular das Fibras.....	15
Figura 02 – Ação do Processo de Refino da Polpa Celulósica.....	18
Figura 03 – Comparativo entre uma mesma quantidade de polpa refinada e não refinada.....	19
Figura 04 – Efeitos Primários do Processo de Refino.....	20
Figura 05 – Evolução da Celulose de Fibras Longas com o Refino.....	22
Figura 06 – Refinador Cônico.....	23
Figura 07 – Refinador a Disco.....	24
Figura 08 – (a) Mecanismo de Refino e (b) Forças Atuantes Durante o Processo de Refino.....	25
Figura 09 – Decomposição da Energia do Processo de Refinação em Baixa Consistência.....	27
Figura 10 – Conjunto de Refinadores.....	31
Figura 11 – Conjunto de Refinadores.....	32
Figura 12 – Refinador PILÃO modelo RTD 840.....	33
Figura 13 – Especificações técnicas dos refinadores PILÃO modelo RTD 840.....	34
Figura 14 – Painel de Controle e Acionamento dos Refinadores.....	36
Figura 15 – Processo de Controle de Refinação Atual.....	36
Figura 16 – Diagrama de Controle de Refinação Baseado em Energia Específica..	37
Figura 17 – Gráfico de Corrente dos Refinadores #1, #2 e #5.....	40
Figura 18 – Gráfico de Vazão de Polpa Celulósica nos Refinadores #1, #2 e #5.....	40
Figura 19 – Gráfico de Consistência da Polpa Celulósica nos Refinadores #1, #2 e #5.....	41
Figura 20 – Gráfico de Vazão de Massa Seca nos Refinadores #1, #2 e #5.....	42
Figura 21 – Blocos Lógicos de Cálculo do Set-point de Potência dos Refinadores..	43
Figura 22 – Bloco Lógico de Controle de Potência dos Refinadores.....	43

Figura 23 – Variação da Potência do Refinador #1 ao Longo de um Dia, Antes e Após a Implementação do Controle.....	44
Figura 24 – Potência Consumida Pelos Refinadores 1, 2 e 5 Entre os Meses de Maio a Outubro.....	45
Figura 25 – Variação da Taxa de Produção da MP#3.....	46



## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>9</b>
1.1	PROBLEMA .....	10
1.2	OBJETIVOS.....	11
1.2.1	Objetivo Geral .....	11
1.2.2	Objetivos Específicos .....	11
1.3	JUSTIFICATIVA.....	11
1.4	ESTRUTURA DO TRABALHO .....	12
<b>2</b>	<b>REFINAÇÃO DE POLPA CELULÓSICA E ENERGIA ESPECÍFICA.....</b>	<b>13</b>
2.1	AS FIBRAS E A PASTA CELULÓSICA.....	13
2.2	REFINAÇÃO E QUALIDADE DO PAPEL .....	16
2.3	PROCESSO DE REFINAÇÃO.....	17
2.4	TIPOS DE REFINADORES.....	22
2.5	ENERGIA DE REFINAÇÃO .....	25
<b>3</b>	<b>ESTUDO DE CASO.....</b>	<b>30</b>
3.1	WESTROCK – UNIDADE FABRIL DE TRÊS BARRAS .....	30
3.2	REFINADORES DA MÁQUINA DE PAPEL #3 .....	33
3.3	SISTEMA DE CONTROLE DE REFINAÇÃO ATUAL .....	34
3.4	SISTEMA DE CONTROLE DE REFINAÇÃO BASEADO NA ENERGIA ESPECÍFICA DE REFINO.....	37
<b>4</b>	<b>APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE DADOS .....</b>	<b>39</b>
4.1	COMPARATIVO DE DADOS.....	44
<b>5</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>47</b>
5.1	TRABALHOS FUTUROS .....	48
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>49</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O setor brasileiro de celulose e papel vêm contribuindo de forma expressiva para o desenvolvimento sócio-econômico do país. O Brasil é referência mundial no setor de florestas plantadas. Um de seus principais atributos é que 100% da produção de celulose e papel do país tem origem no plantio de eucalipto e pinus. (MENEZZO, 2012).

Considerando o crescente aumento da produção de papel e celulose no país, as empresas envolvidas neste ramo devem investir cada vez mais em novas tecnologias, visando a eficiência de seus processos e, conseqüentemente uma melhor competitividade de mercado (ANDRADE, 2006).

Neste sentido, a refinação de pasta celulósica se apresenta como uma importante parte do processo de fabricação do papel, considerando que a modificação das fibras decorrente do refino é responsável por uma parcela significativa dos custos de energia de uma fábrica de papel, podendo constituir de 10% a 40% do total de energia elétrica da unidade fabril (LUNDIN et al, 2009).

O refino da pasta celulósica é um processo mecânico realizado para preparar as fibras para a produção do papel e, as características deste refino estão diretamente relacionadas as propriedades do papel seco. O processo de refino afeta as propriedades estruturais, morfológicas e interativas das fibras, podendo aumentar o potencial de ligação entre as mesmas, devido a alterações nas fibras e suas paredes celulares, resultando em uma boa formação da estrutura do papel (LUNDIN et al, 2009).

O refino da polpa de celulose é uma das mais importantes unidades de operação em uma fábrica de papel, porque está diretamente associado a capacidade de formação do papel e suas propriedades. Os fenômenos que ocorrem no processo de refino são altamente complexos e de difícil compreensão. Como resultado desta complexibilidade, apenas algumas regras e aspectos tecnológicos de operação são conhecidos, porém o mapeamento matemático deste processo permanece inacabado (OLEJNIK, 2013).

A primeira teoria desenvolvida, com relação a refinação, foi proposta por Emerton em 1957, que compreende uma análise qualitativa referente a formação e quebra das conexões de hidrogênio e interações entre moléculas de água e

celulose. Posteriormente, Ebeling e Hietanen, em 1990, analisaram e classificaram os efeitos do refino como primários (encurtamento da fibra e fibrilação externa e interna) e secundários (OLEJNIK, 2013).

Até o momento atual, apenas alguns critérios que descrevem o processo de refino são aceitos universalmente. Os critérios mais conhecidos são CEL (Cutting Edge Length – Comprimento de corte de borda) e SEL (Specific Energy Load – Carga de Energia Específica), introduzidos por WULTSH e FLUCHER e reforçados por BRECHT e SIEWERT (OLEJNIK, 2013).

Pode-se descrever o conceito de Energia Específica de refinação como sendo a energia efetivamente utilizada para modificar as fibras. Esta energia é consumida por forças mecânicas de refinação, que proporcionam a deformação das fibras. O valor de energia específica é definido como a razão entre a energia consumida por unidade de massa de polpa celulósica (LUNDIN et al, 2009).

O conceito de energia específica pode ser utilizado para o controle de refino de massa através de um sistema de controle em malha fechada, baseado em um set-point de energia específica e no papel produzido na saída da máquina (WÄTZIG, 2011). Com as medições de fluxo e consistência da polpa que entra nos refinadores e, a pressão de entrada e saída dos mesmos, é possível realizar um controle tal que os níveis de refinação das fibras se mantenham constantes.

Considerando o exposto acima, este trabalho propõe o estudo de caso da aplicação de um sistema de controle, baseado no conceito de energia específica, visando a melhoria na qualidade final do papel produzido, o aumento da taxa de produção e a economia de energia devido ao controle de potência dos refinadores.

## 1.1 PROBLEMA

A garantia de um produto de qualidade e a eficiência de produção são hoje aspectos extremamente importantes no meio industrial. Considerando estes aspectos, este trabalho propõe o estudo de caso da aplicação de um controle de operação dos refinadores de uma fábrica de papel e celulose, visando compreender os benefícios do mesmo.

O sistema de refinação que se pretende estudar utiliza, atualmente, um controle baseado no ajuste de corrente dos refinadores realizado pela intervenção

dos operadores, que aumentam ou diminuem o set-point de corrente do conjunto de refinação de acordo com os resultados obtidos nas análises do papel produzido.

O presente trabalho tem a intenção de verificar quais seriam os ganhos estimados, com relação qualidade do papel produzido, taxas de produção e a redução do consumo de energia dos refinadores, ao se aplicar um controle de energia específica no sistema de refino da máquina de papel em estudo.

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 Objetivo Geral

Avaliar os ganhos proporcionados pela aplicação de um controle de energia específica no sistema de refino da máquina de papel em estudo, estimando os benefícios com relação a taxa de produção, qualidade do papel produzido e consumo de energia dos refinadores.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

- Entender a proposta teórica dos sistemas de controle de refino baseados na energia específica de refino, relacionando estes conceitos a realidade verificada na máquina de papel em estudo;
- Realizar a coleta de dados de processo antes e após a aplicação do controle de energia específica, comparando os resultados apresentados e demonstrando os pontos positivos do sistema de controle proposto;
- Avaliar os possíveis ganhos qualitativos e quantitativos com a aplicação do controle de energia específica no conjunto de refinadores;

## 1.3 JUSTIFICATIVA

A qualidade final do papel produzido em uma fábrica está diretamente atrelado a qualidade de refinação das fibras, realizada pelo conjunto de refinadores.

Por outro lado, a energia consumida pelos refinadores é extremamente alta, considerando o consumo dos demais setores da fábrica. Neste sentido, é possível perceber que o sistema de refino possui grande importância no processo de fabricação do papel.

Considerando o exposto, entende-se que, controlar o processo de refino da pasta celulósica é indispensável para as fábricas que pretendem se manter competitivas no mercado de papel atual.

Tendo em vista a economia energética e a melhoria na qualidade de produção que os estudos referentes a energia específica propõem, o presente trabalho se justifica por ter como objetivo, entender e propor a instalação de um controle de energia específica na fábrica de papel em estudo, melhorando a qualidade do papel e o reduzindo o consumo energético do processo de refino.

#### 1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

**Capítulo 1** – Introdução: serão apresentados o tema, o problema, os objetivos da pesquisa, a justificativa e a estrutura geral do trabalho.

**Capítulo 2** – Refinação de Polpa Celulósica e Energia Específica: Abordar os conceitos básicos de refinação e quais as principais características no refino da pasta celulósica, assim como os tipos de refinadores utilizados neste processo. Apresentar o conceito de energia específica de refinação e como é aplicado no controle dos refinadores;

**Capítulo 3** – Condições Atuais de Refinação na Fábrica de Papel: Apresentar a máquina de papel e as condições atuais de refino da pasta celulósica na fábrica de papel em estudo;

**Capítulo 4** – Coleta e Análise de Dados: Apresentar os dados coletados e realizar comparativos entre as condições anteriores e posteriores a aplicação do sistema de controle.

**Capítulo 5** – Considerações Finais: Análise dos resultados e avaliação final do estudo de caso.

## 2 REFINAÇÃO DE POLPA CELULÓSICA E ENERGIA ESPECÍFICA

A polpa celulósica nas indústrias papelarias é, certamente, o elemento indispensável para a produção de papel. A qualidade desta polpa e suas características físico-químicas são fatores determinantes no processo de formação do papel, assim como na qualidade do mesmo (GHAREHKHANI et al., 2014).

Após a produção da polpa celulósica, as fibras naturais ainda não apresentam as características necessárias para a formação de papel de qualidade que possa ser destinado a produção de embalagens, impressão, escrita, ou outra aplicação neste sentido (MENEGAZZO, 2012). Desta forma, para garantir uma produção de papel de qualidade, as fibras precisam ser submetidas a um tratamento que as proporcione propriedades mecânicas capazes de formar o papel com atributos como resistência mecânica, opacidade, porosidade, retenção a água, entre outros (BORTOLAN, 2012).

O tratamento mecânico realizado para preparar as fibras chama-se refinação, sendo este um dos mais significantes processos da indústria de papel e celulose e, conseqüentemente um dos maiores desafios científicos deste ramo industrial (GHAREHKHANI et al., 2014). De acordo com NUGROHO (2012, p. 01), o refino é um tratamento vital na preparação da pasta celulósica e, é o primeiro passo para o processo de fabricação do papel, determinando a qualidade de diversos aspectos do produto final. A principal função do refino da pasta celulósica é aumentar a capacidade de entrelaçamento das fibras, controlar seu comprimento, e minimizar o fracionamento das fibras (WHALLEY; MITCHELL, 1999) (BHARDWAJ; HOANG; NGUYEN, 2006).

### 2.1 AS FIBRAS E A PASTA CELULÓSICA

De acordo com BITTENCOURT (2004, p. 03), a produção da pasta celulósica para a formação de papel pode ser realizada com qualquer material fibroso, porém, para uma produção contínua e economicamente viável, alguns requisitos estratégicos são necessários com relação a matéria-prima, como:

- Disponibilidade constante, visando garantir o funcionamento da fábrica;

- Não deve se deteriorar facilmente com o tempo, permitindo sua estocagem e armazenamento;
- Os custos de colheita e transporte devem ser os menores possíveis;
- O custo de conversão em pasta celulósica e, posteriormente em papel, deve ser relativamente baixo, o rendimento deve ser alto e a qualidade boa;

Além destes requisitos, é extremamente importante levar em conta os aspectos físicos, químicos e anatômicos da matéria-prima, pois a qualidade da produção de papel e celulose está diretamente conectada a estes aspectos (DIAS; SIMONELLI, 2013).

As fibras presentes na pasta celulósica são, na maioria dos casos, provenientes da madeira de eucalipto, píceas, pinus e resíduos agrícolas, por melhor se enquadrarem nos quesitos acima. A estrutura celular das diferentes espécies de madeira é, de maneira geral, composta de celuloses, hemiceluloses e lignina (GHAREHKHANI et al., 2014).

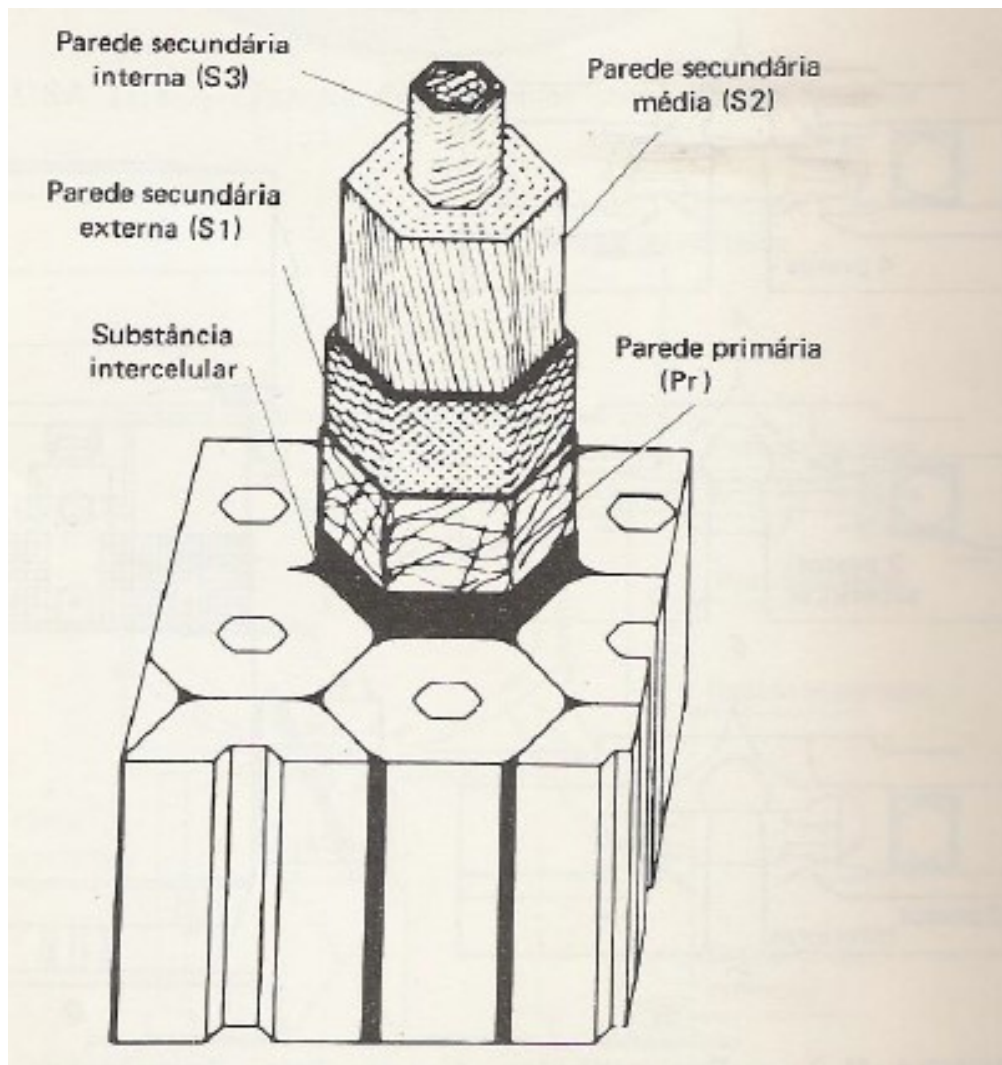
A matéria prima utilizada para a produção está diretamente ligada ao papel que se pretende produzir, a características das fibras, e a fatores econômicos. As polpas de eucalipto e pinus são muito utilizadas por possuírem características que proporcionam a boa formação do papel e padrões de qualidades específicos após sua fabricação. O eucalipto proporciona ao papel qualidades como opacidade, maciez, porosidade, lisura, absorção, estabilidade dimensional, boa formação, entre outras. Por outro lado, o pinus apresenta bons índices de alvura, comprimento de fibra, capacidade total de absorção de água, limpeza, pureza, etc (MENEGAZZO, 2012).

O processo de produção da celulose, genericamente denominado de polpação, é o tratamento físico-químico dado a matéria-prima fibrosa para desagregar as fibras de sua estrutura e eliminar os componentes prejudiciais ao procedimento de fabricação do papel (BITTENCOURT, 2004). Através de um tratamento mecânico, químico, térmico, ou uma combinação destes, as fibras são separadas da lignina, substância que mantém a rigidez e impermeabilidade da matéria-prima, para se tornarem a polpa celulósica, capaz de formar o papel após passar pelo tratamento necessário.

Independente de sua origem, as principais dimensões geométricas das fibras são comprimento, largura, e espessura da parede celular (MENEGAZZO, 2012).

Conforme apresenta a Figura 01, a estrutura das fibras pode ser dividida nas seguintes partes (BORTOLAN, 2012):

- Parede Primária (Pr): parte externa da fibra, constituída por fibrilas entrelaçadas que formam uma parede fina;
- Parede Externa (S1): formada por fibrilas paralelas entrelaçadas que ficam em contato com a parede primária;
- Parede Secundária Média (S2): parte da fibra onde se localiza a maior quantidade de celulose. Sua espessura varia conforme localização na árvore;
- Parede Secundária Interna: Formada por fibrilas dispostas em espiral;



**Figura 01 – Estrutura Celular das Fibras**

**Fonte: Preparação de Massa, Refinação (PIRES et al, 1988)**



## 2.2 REFINAÇÃO E QUALIDADE DO PAPEL

O processo de refinação da polpa celulósica está diretamente ligado as características finais do papel produzido. Neste sentido, uma polpa refinada corretamente proporcionara uma boa formação da folha e um papel com propriedades adequadas para o mercado consumidor.

A relação entre os parâmetros de qualidade do papel e as características da polpa refinada pode ser apresentada da seguinte forma (MENEGAZZO, 2012):

- Resistência à Tração: Força necessária para arrebentar o papel.
  - Proporcional: comprimento da fibra, diâmetro do lume e coeficiente de flexibilidade;
  - Inversamente proporcional: Espessura da parede da fibra, fração da parede e índice de Runkel;
- Resistência ao Rasgo: medida da energia total necessárias para o rasgamento completo do papel;
  - Proporcional: comprimento da fibra, diâmetro do lume, espessura da parede da fibra, índice de enfeltramento, fração da parede e índice de Runkel;
  - Inversamente proporcional: largura da fibra e coeficiente de flexibilidade;
- Resistência ao Arrebentamento: pressão necessária para produzir a ruptura do papel transmitida por um diafragma elástico de área circular;
  - Proporcional: comprimento da fibra, diâmetro do lume, coeficiente de flexibilidade e índice de Runkel;
  - Inversamente proporcional: espessura da parede da fibra e largura da fibra;

- Gramatura: propriedade que determina a concentração de fibras por área de papel produzido. Afeta as propriedades mecânicas do papel e algumas propriedades óticas;
  - Proporcional: espessura da parede da fibra e coeficiente de flexibilidade;
- Opacidade: determina a qualidade visual do papel para impressões e escrita;
  - Proporcional: espessura da parede da fibra;

Grande parte das características das fibras influencia diversas propriedades do papel ao mesmo tempo, tendo grande importância para a qualidade final do produto. Por outro lado, alguns aspectos das fibras proporcionam o aumento de uma propriedade e, ao mesmo tempo, a redução de outra. Desta forma, é necessário conhecer as especificações desejadas do papel a ser produzido e controlar o processo de refino para que se possa obter o resultado desejado.

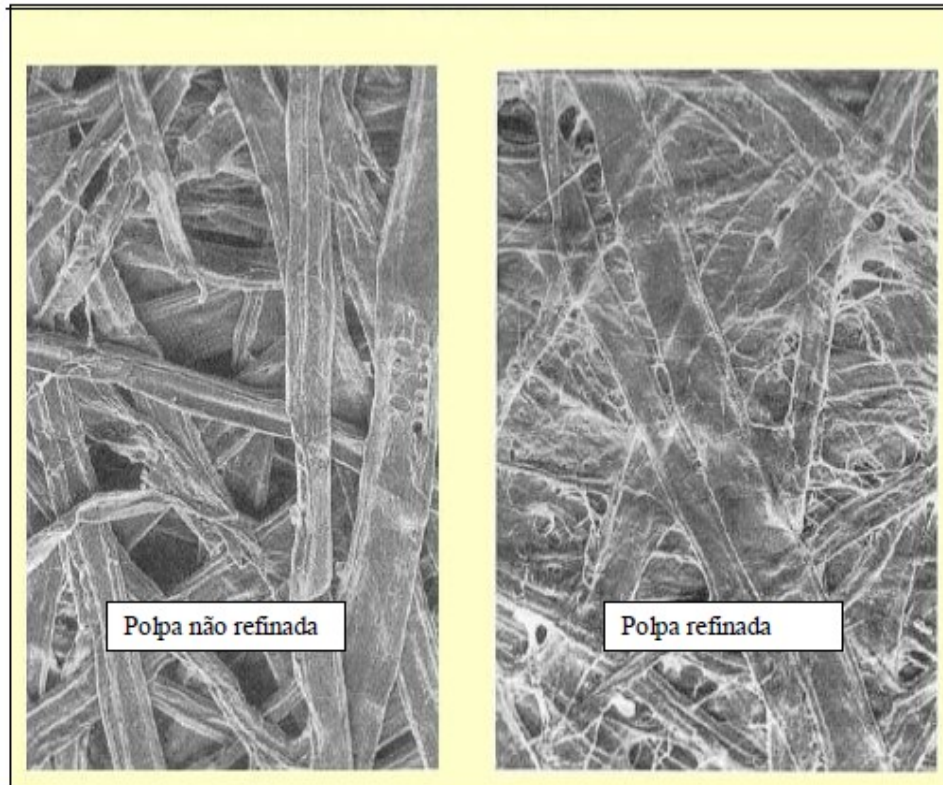
### 2.3 PROCESSO DE REFINAÇÃO

O processo de refinação tem por finalidade separar e modificar as fibras, provocando alterações em suas propriedades, de modo que as mesmas se tornem adequadas para o processo de formação do papel, através de condições de refino conhecidas (TORRES et al., 2012) (GHAREHKHANI et al., 2014). Desta maneira, o refino pode ser considerado como um tratamento mecânico dado as fibras para melhorar suas características físicas, aumentando sua capacidade de ligação e formação da folha (BORTOLAN, 2012). Através de impactos nas fibras, os refinadores são capazes de modificar as características das mesmas e torná-las aptas para a produção. Para executar esta tarefa, os refinadores necessitam de um alto nível de energia e, por este motivo são classificados como os maiores consumidores de energia das fábricas de papel e celulose (MENEZZO, 2012) (TORRES et al., 2012).

Cada tipo de polpa necessita de um nível de refinação específico e, de acordo com o grau de refino aplicado, diferentes receitas de fabricação de papel são

produzidas (MENEGAZZO, 2012). Neste sentido, é muito importante que o processo de refinação seja o mais estável possível, fornecendo uma polpa homogênea para a formação do papel.

A Figura 02 mostra uma imagem da polpa celulósica antes e após a refinação. É possível notar o aumento das possibilidades de ligações das fibras causadas por rupturas em suas paredes celulares.



**Figura 02 – Ação do Processo de Refino da Polpa Celulósica**

**Fonte: Estudo do Efeito do Tipo de Celulose Utilizada e Intensidade de Refino no Processo de Refino de Polpa Celulósica (BORTOLAN, 2012)**

Um dos principais efeitos da refinação é proporcionar a penetração de água nas fibras, tornando-a macia e inchada para facilitar a produção do papel (GREENWOOD et al, 2006). A Figura 03 apresenta a imagem de uma mesma quantidade de polpa celulósica antes e após a refinação. É possível perceber o aumento considerável da retenção de água nas fibras através do aumento do seu volume.



**Figura 03 – Comparativo entre uma mesma quantidade de polpa refinada e não refinada.**

**Fonte: Adaptado de Ultrasonic Sensor to Characterize Wood Pulp During Refining  
(GREENWOOD et al, 2006)**

Os efeitos do processo de refinação podem ser classificados como primários - fibrilação interna, fibrilação externa, formação de finos e encurtamento das fibras (Figura 04) - e secundários, relacionados com as propriedades físicas da folha formada.

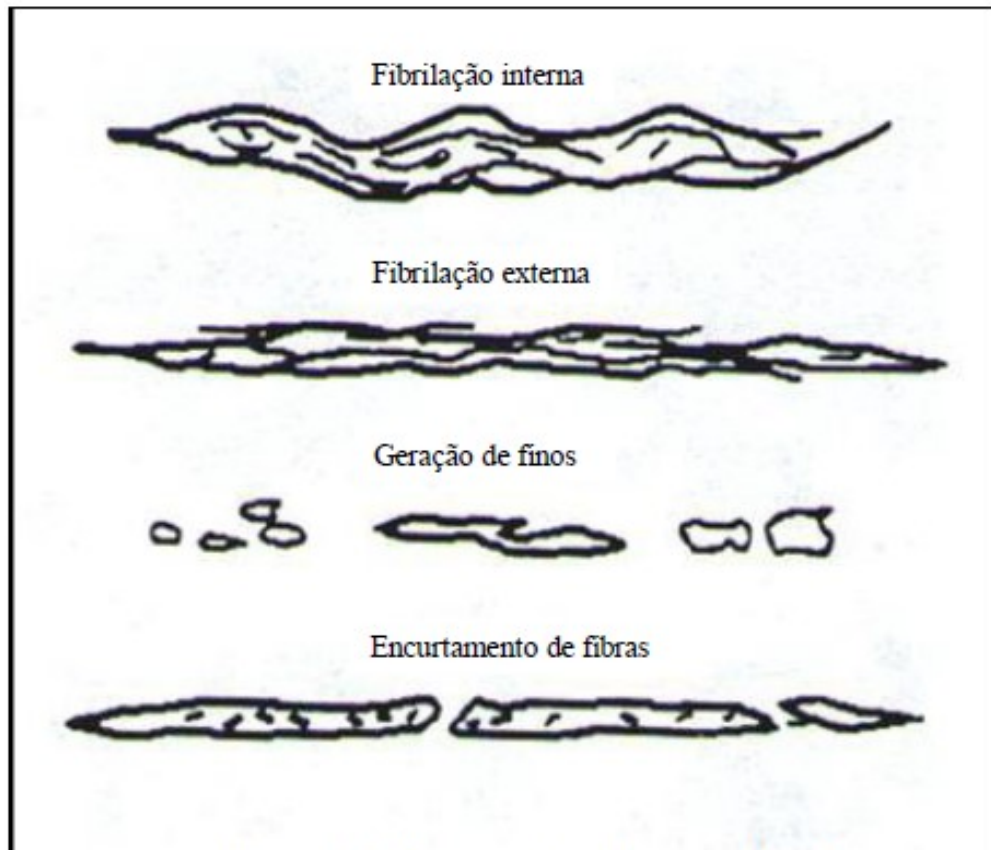


Figura 04 – Efeitos Primários do Processo de Refino

Fonte: Estudo do Efeito do Tipo de Celulose Utilizada e Intensidade de Refino no Processo de Refino de Polpa Celulósica (BORTOLAN, 2012)

As alterações primárias provocadas nas fibras pelo processo de refinação são:

- **Fibrilação Interna:** é o primeiro efeito da refinação sobre as fibras, causado pelas compressões cíclicas sobre a polpa dentro do refinador. Este efeito é muito estudado por diversos autores, pois acredita-se ser o mais importante no processo de refinação. A quebra das ligações entre as fibras, hemiceluloses e lignina faz com que a estrutura interna da célula se torne porosa e, conseqüentemente inchada, sendo este fenômeno uma evidência da fibrilação interna das fibras no processo de refinação. Uma conseqüência da fibrilação interna é o aumento da flexibilidade das fibras, que ocorre devido ao afrouxamento de sua parede celular, proporcionando a perda da resistência elástica e tornando sua estrutura mais flexível. A flexibilidade é um fator muito importante na produção do papel, tendo influência direta em suas propriedades físicas e

ópticas. Uma polpa celulósica que contém fibras mais maleáveis é capaz de proporcionar maior contato entre as mesmas e, conseqüentemente, aumentar a força de ligação entre elas (GHAREHKHANI et al., 2014) (TORRES et al., 2012);

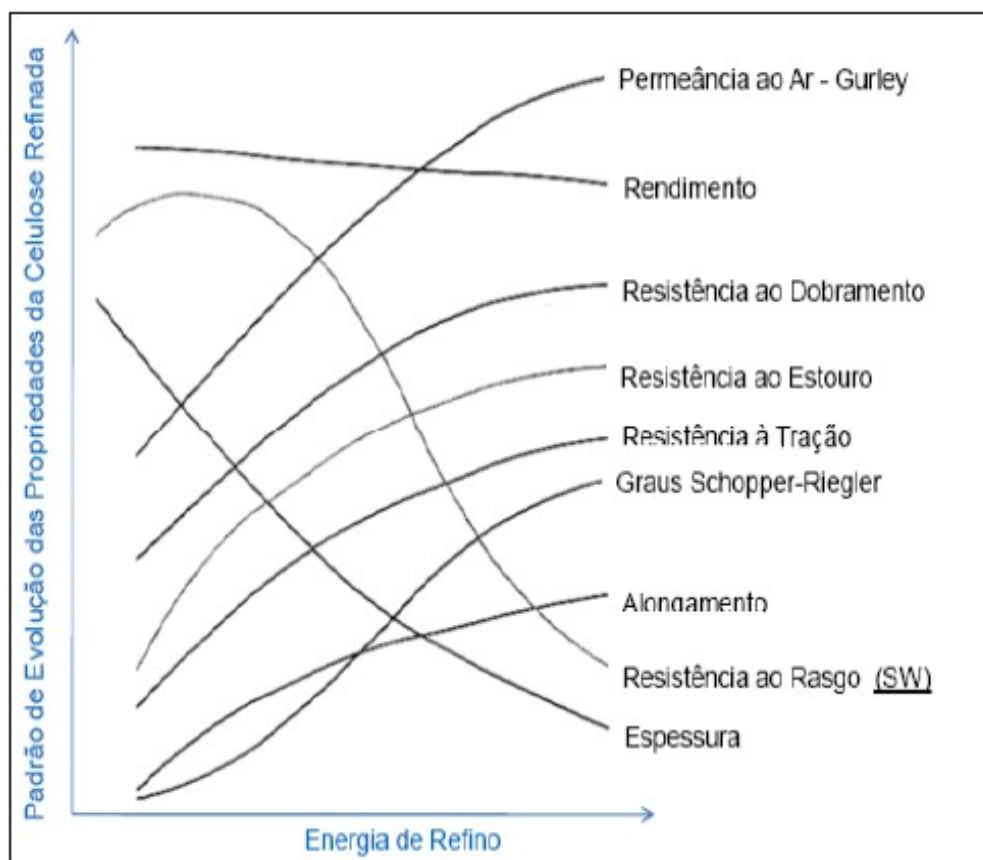
- **Fibrilação Externa:** é decorrente do arrancamento das camadas mais externas da fibra, proporcionando uma superfície fibrosa e aumentando a área superficial de microfibrilas. Desta forma, a fibrilação externa é a principal responsável pela melhoria na capacidade de ligação entre as fibras (GHAREHKHANI et al., 2014) (TORRES et al., 2012) (BORTOLAN, 2012);

- **Geração de Finos:** Os finos são pequenas partes externas das fibras que se desconectam da parede celular. A geração destes pequenos pedaços da parte externa da fibra são formadas devido a ação mecânica dos refinadores, ao triturar ou cortar uma parte da fibra. De maneira geral, a produção de finos é uma conseqüência não desejada do processo, pois prejudicam a medição do grau de refinação e a retenção de água na tela formadora da máquina. Por outro lado, em alguns casos, podem gerar um pequeno incremento na resistência do papel e em suas propriedades ópticas (opacidade), colaborando para o aumento dos pontos de contato entre as partículas (GHAREHKHANI et al., 2014) (TORRES et al., 2012) (MENEGAZZO, 2012);

- **Encurtamento das Fibras:** O encurtamento das fibras também ocorre devido a ação mecânica dos refinadores. No momento em que a fibra passa entre as bordas das barras do refinador, a mesma pode sofrer um corte total de sua estrutura, dividindo-a em duas partes, provocando seu encurtamento. Quando a parede celular da fibra é estreita e a mesma não possui muita flexibilidade, as chances de sofrer um encurtamento são maiores. Esta conseqüência do processo de refino é prejudicial para a formação e qualidade final do papel, reduzindo a resistência ao rasgo e ao arrancamento do papel (TORRES et al., 2012).

Quanto maior o tempo de refinação, maiores são as modificações sofridas pelas fibras e o consumo de energia pelos refinadores. Uma pasta refinada excessivamente perde propriedades importantes para a formação da folha e, proporciona ao papel produzido baixos níveis de qualidade, geralmente relacionados

a opacidade, porosidade e volume específico aparente (MENEGAZZO, 2012). Por outro lado, fibras sem refinação não permitem a formação de um papel que possa ser comercializado. Portanto, o nível de refinação deve estar balanceado de acordo com o papel a ser produzido, garantindo uma polpa com as propriedades necessárias par a sua formação. A Figura 05 demonstra o comportamento das propriedades do papel produzido em relação a energia ou intensidade de refino.



**Figura 05 – Evolução da Celulose de Fibras Longas com o Refino**

**Fonte: Estudo do Efeito do Tipo de Celulose Utilizada e Intensidade de Refino no Processo de Refino de Polpa Celulósica (BORTOLAN, 2012)**

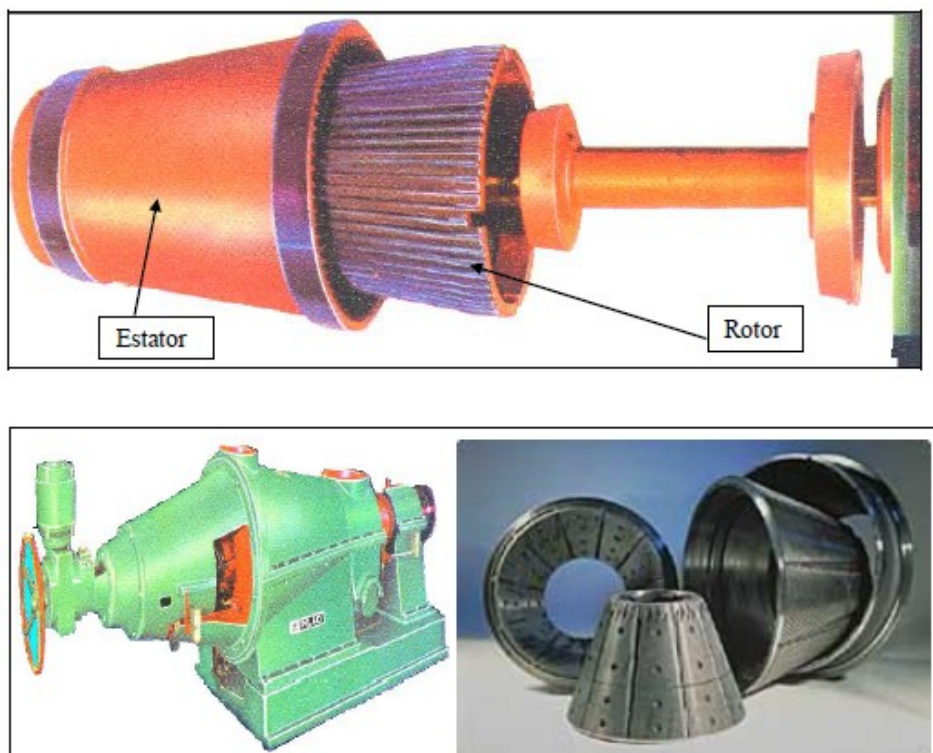
Considerando o alto consumo de energia necessário para a refinação e, a necessidade de se fornecer uma polpa uniforme para o processo, devido às altas velocidades de produção, é muito importante que o equipamento utilizado para realizar o refino da pasta seja o mais adequado possível (BORTOLAN, 2012).

## 2.4 TIPOS DE REFINADORES



Desde o início dos processos de refinação para a produção de papel até os dias de hoje, diversas máquinas refinadoras foram concebidas e utilizadas. Com o desenvolvimento tecnológico e os avanços científicos no estudo do processo de tratamento das fibras, as características dos refinadores evoluíram até o que temos hoje. De maneira geral, as máquinas mais difundidas na indústria papelreira atualmente podem ser classificadas em dois grupos: refinadores cônicos e refinadores de discos (BORTOLAN, 2012) (GHAREHKHANI et al., 2014). Cada tipo de refinador possui características específicas que podem influenciar na intensidade e na qualidade do refino da pasta celulósica (TORRES et al., 2012).

Os refinadores cônicos são constituídos por um cone externo estático e um cone interno girante, ambos com lâminas na direção axial, conforme Figura 06. Em geral, a extremidade de maior diâmetro possui também maior número de lâminas, com a intenção de aumentar o número de arestas e, conseqüentemente, a capacidade de refino. Através de um volante ou de um acionamento elétrico é possível movimentar o rotor longitudinalmente, aproximando ou afastando as lâminas, com a finalidade de controlar a intensidade de refinação da fibra e o consumo de energia do refinador (BORTOLAN, 2012);

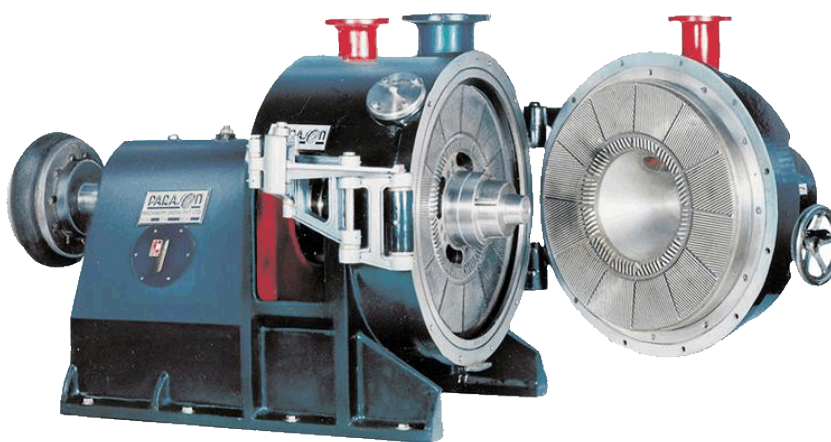


**Figura 06 – Refinador Cônico**

**Fonte: Adaptado de Estudo do Efeito do Tipo de Celulose Utilizada e Intensidade de Refino no Processo de Refino de Polpa Celulósica (BORTOLAN, 2012)**



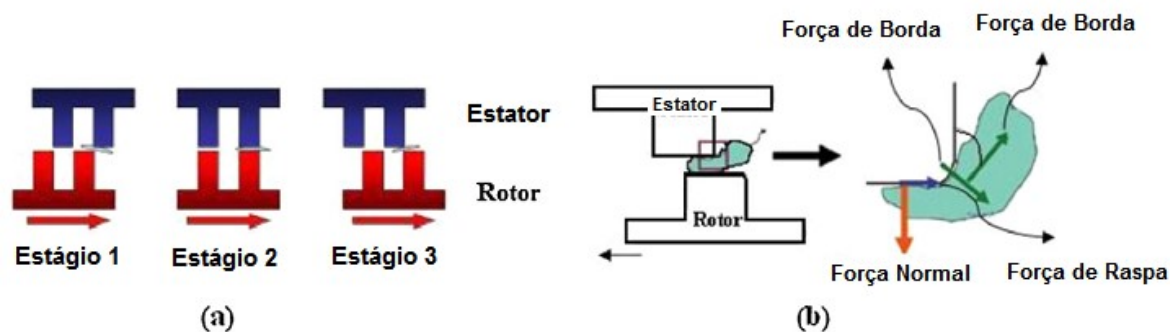
Os refinadores de discos consistem de duas placas paralelas ranhuradas, estator e rotor, por onde devem passar as fibras a serem refinadas (Figura 07) (GHAREHKHANI et al., 2014). Devido ao eixo de rotação do rotor ser perpendicular ao plano de ação do refinador, a máquina consegue ter um melhor aproveitamento das lâminas ou ranhuras do estator e do rotor, aumentando assim a eficiência de refinação. Além disso, devido a área de refinação ser maior que de outros refinadores, o refinador de discos é capaz de tratar uma maior quantidade de fibras ao mesmo tempo, possibilitando uma melhor utilização da energia (BORTOLAN, 2012).



**Figura 07 – Refinador a Disco**

**Fonte: Estudo do Efeito do Tipo de Celulose Utilizada e Intensidade de Refino no Processo de Refino de Polpa Celulósica (BORTOLAN, 2012)**

O processo de refino nos refinadores de discos consiste de três estágios (Figura 08): o primeiro estágio é onde as fibras são pegadas, entre as barras do estator e do rotor; no segundo estágio as fibras são comprimidas entre as barras durante o movimento do rotor; no terceiro estágio as forças de corte atuam entre as fibras devido ao contato simultâneo das mesmas entre fibras e barras (GHAREHKHANI et al., 2014) (NUGROHO, 2012).



**Figura 08 – (a) Mecanismo de Refino e (b) Forças Atuantes Durante o Processo de Refino**

Fonte: Adaptado de “Basic Effects of Pulp Refining on Fiber Properties – A Review”

(GHAREHKHANI et al., 2014)

Os refinadores de discos podem ser classificados em refinadores de disco simples ou refinadores de discos múltiplos. Os refinadores de disco múltiplo, em geral, proporcionam maior economia de energia no processo de refino (GHAREHKHANI et al., 2014).

O principal objetivo do estudo e desenvolvimento de novos refinadores é a redução do consumo de energia de refinação. Neste sentido, os fabricantes buscam entender o processo de refinação e propor soluções que consigam tornar este processo mais eficiente, garantindo os níveis de refinação e reduzindo a energia necessária para esta tarefa.

## 2.5 ENERGIA DE REFINAÇÃO

Atualmente, a energia necessária para realizar a refinação da pasta celulósica em uma indústria de papel pode variar de 15% a 18% da energia total fábrica, sendo, portanto, um dos processos que mais consome energia para a produção do papel. Neste sentido, diversas maneiras de aumentar a eficiência deste processo têm sido buscadas, na intenção de reduzir os custos de fabricação do papel (CUI et al, 2014).

Devido a sua extrema complexidade, os fenômenos que ocorrem com as fibras durante o processo de refinação ainda não foram completamente entendidos matematicamente. Por este motivo, não existe uma teoria única que explique tal mecanismo e nem um sistema de controle ideal para o processo (OLEJNIK, 2013).

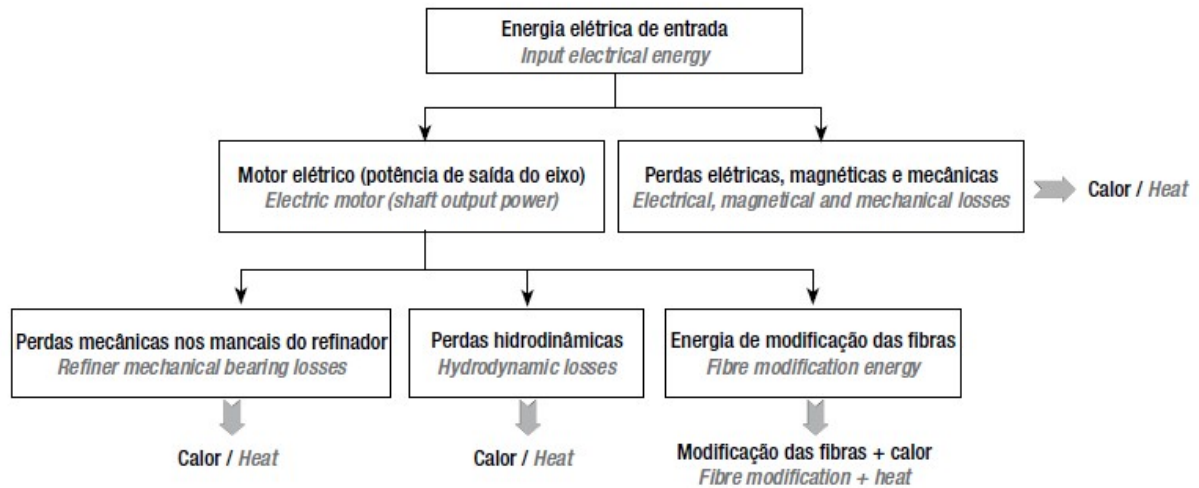
Uma das maneiras mais difundidas para reduzir o consumo energético e melhorar a estabilidade da refinação da polpa é o controle do refinador baseado em sua energia específica de refino. A energia específica de refino (SRE – Specific Refining Energy) apresenta a quantidade de energia efetivamente transferida para as fibras durante o processo de refino por unidade de massa. Desta maneira, quando a velocidade de refinação, o fluxo e a consistência da polpa celulósica são constantes, a intensidade de refino das fibras e a energia específica de refino são influenciadas somente pela potência da rede, tornando a relação entre intensidade e energia específica, linear e diretamente proporcional. Portanto, ao controlar a energia específica de refino, estamos também controlando a intensidade de refinação das fibras no refinador (GHAREHKHANI et al., 2014).

A energia total ( $E_T$ ), utilizada para o processo de refinação, pode ser dividida essencialmente em duas partes, a energia de funcionamento sem carga ( $E_{nl}$ ) e a energia que efetivamente realiza modificações nas fibras ( $E_{ef}$ ), conforme apresenta a equação (01).

$$E_T = E_{nl} + E_{ef} \quad (01)$$

A energia consumida pelo refinador sem carga é a energia necessária para manter o refinador acionado, quando seus discos estão afastados e, consequentemente nenhuma ação de refino efetivo é realizada. Desta forma, esta energia é dissipada pela estrutura física do refinador, decorrente de perdas no cobre, perdas magnéticas, perdas por dispersão, perdas nos mancais, devido ao atrito dos rolamentos, e perdas hidrodinâmicas, devido a forças de cisalhamento (Figura 08) (LUNDIN et al, 2009).

A energia efetiva de refino é a diferença entre a energia total fornecida para o refinador e a energia sem carga e, portanto, é a quantidade de energia que é realmente utilizada no processo para provocar as alterações necessárias nas fibras (Figura 09) (NUGROHO, 2012).



**Figura 09 – Decomposição da Energia do Processo de Refinação em Baixa Consistência**  
 Fonte: Análise Energética em Refinação de Baixa Consistência de Madeiras Coníferas (LUNDIN et al, 2009)

A equação (02) apresenta a potência efetiva ( $P_{ef}$ ) utilizada no processo de refinação, subtraindo a potência total ( $P_T$ ) pela potência de funcionamento sem carga ( $P_{n-l}$ ).

$$P_{ef} = P_T - P_{n-l} \quad (02)$$

Conhecendo a potência efetiva do processo de refinação, é possível determinar a energia específica de refinação, conforme apresenta a equação (03), onde  $MF$  é a massa de fibras no refinador.

$$SRE = P_{ef} / MF \quad (03)$$

A expressão da energia específica também pode ser apresentada em função da vazão de polpa pelo refinador ( $V_m$ ), da consistência ( $C_s$ ) e da densidade ( $\rho$ ) da polpa, conforme equação (04) (OLEJNIK, 2013).

$$SRE = P_{ef} / (V_m \cdot C_s \cdot \rho) \quad [kWh/ton \text{ de massa seca}] \quad (04)$$

De acordo com OLEJNIK (2013, p. 03) e OLSON et al (2002, p. 02), muitos cientistas caracterizam o processo de refinação como uma combinação do número

de impactos por unidade de massa e a intensidade destes impactos sobre as fibras. Ambos os parâmetros são responsáveis pela energia específica de refino (equação 05).

$$E = N \cdot I, [kWh/ton \text{ de massa seca}] \quad (05)$$

Relacionando estes dois parâmetros e a relação entre potência e massa, Kerekes, em 1990 desenvolveu a teoria do Fator C (NUGROHO, 2012), conforme equação (06) apresentada abaixo.

$$SRE = P_{ef} / MF = N \cdot I = \frac{C}{MF} \cdot \frac{P_{ef}}{C} \quad (06)$$

Onde C representa a capacidade do refinador em realizar impactos sobre as fibras e, seu valor é determinado pelas características construtivas do refinador, sua velocidade de rotação e pelas propriedades da polpa (TORRES et al., 2012). Para cada tipo de refinador o Fator C possui uma expressão diferente. Para os refinadores a disco, o fator é calculado conforme a equação (07).

$$C = 8 \cdot \pi^2 \cdot G \cdot D \cdot \rho \cdot c_F \cdot l_F \cdot z^3 \cdot n \cdot (1 + 2 \cdot \tan \phi) \cdot \left[ R_1^2 \cdot L + L^2 \cdot R_1 \cdot \sin \phi + \left( \frac{L^3}{3} \right) \sin^2 \phi \right] / w \cdot (1 + D) \quad (07)$$

Onde  $G$  é a largura das ranhuras do disco,  $D$  é a profundidade das ranhuras,  $l_F$  é o comprimento das fibras,  $z$  é o número de barras,  $n$  é a velocidade de rotação do refinador,  $\phi$  é o ângulo das barras,  $R_1$  é o menor raio do rotor,  $L$  é o comprimento da zona de refino e  $w$  é a espessura da fibra.

Entendendo que, no meio industrial, as características físicas dos refinadores e a velocidade de rotação dos mesmos é geralmente constante, a equação (08) pode ser simplificada conforme segue.

$$C = K \cdot \frac{\rho \cdot c_F \cdot l_F}{w} \quad (08)$$

Onde  $K$  é a constante que relaciona a velocidade de rotação do refinador e suas características estruturais.

Como é possível observar, o fator  $C$  é diretamente dependente de variáveis que podem ser controladas no processo, como o fluxo e a consistência da polpa, como de variáveis que são extremamente complexas de se controlar e mensurar, como o comprimento e a espessura da fibra. Neste sentido, a teoria do Fator  $C$  proporciona importantes informações para o estudo do processo de refinação, mas, devido a complexidade do controle das variáveis associadas a ele, não permite a aplicação de um controle preciso de refinação em um ambiente industrial.

Conforme já mencionado, a intensidade de refino determina as características da polpa que é utilizada para a formação da folha. Sendo assim, ao controlar a energia específica de refinação, se controla também o nível de refino da polpa e, conseqüentemente a qualidade final do papel. Ao passo que o controle de energia é realizado, o sistema se torna capaz de manter os níveis de refino estáveis e reduzir o consumo de energia desnecessário.

O sistema de controle de energia específica de refino se baseia nas medições e controle do fluxo e da consistência da polpa de entrada, determinando a energia que precisa ser fornecida ao refinador para que o mesmo mantenha a intensidade de refino da pasta celulósica estável e de acordo com o set-point determinado pelo operador (WÄTZIG, 2011).

O chamado set-point de energia específica determina os níveis de refinação pretendidos para o processo e, o controle de energia específica mantém a refinação estável controlando a aproximação e recuo dos discos de acordo com as condições de entrada da polpa. O set-point é determinado pela operação de acordo com as análises de qualidade do papel produzido no final da máquina e com os testes laboratoriais da pasta após a refinação.

Outra opção de controle deste processo é o chamado controle avançado de refinação que, se baseia em uma medição online do nível de refino da polpa após o tratamento, chamada medição de Freenes.

### 3 ESTUDO DE CASO

Teoricamente, a aplicação do controle de energia específica de refinação proporciona economia energética ao processo e estabilidade dos níveis de refinação da pasta celulósica. Fatores como estes aprimoram a qualidade do papel produzido e reduzem os custos de produção do mesmo. Neste sentido, implementar este controle de refino permite a empresa papelreira produzir um papel mais barato e de melhor qualidade.

Neste capítulo pretende-se apresentar, de maneira geral, a fábrica e a máquina de papel em estudo, especificar os equipamentos utilizados no processo de refinação da máquina, apresentar as condições normais de refinação para a produção do papel e, propor e demonstrar a aplicação do controle de energia específica no processo de refinação.

#### 3.1 WESTROCK – UNIDADE FABRIL DE TRÊS BARRAS

A fábrica de papel, localizada na cidade de Três Barras, é uma unidade fabril do grupo WestRock, empresa multinacional fundada no ano de 2015, através da fusão de duas outras grandes multinacionais do ramo papelero, MeadWestvaco e RockTeen.

Com uma produção média aproximada de 1.300,00 toneladas de papel por dia, a WestRock Três Barras possui duas máquinas de papel, produzindo papel Kraft Liner na Máquina de Papel #4 e, papel miolo na Máquina de Papel #3.

A Máquina de Papel #3, em estudo, produz em média 400 toneladas por dia de papel miolo. As gramaturas de papel produzido nesta máquina variam entre 100g/m<sup>2</sup>, 130g/m<sup>2</sup> e 170g/m<sup>2</sup>. As variações de gramatura são controladas pelo fluxo de massa enviado para a seção de formação do papel. Para produzir esta quantidade nas gramaturas especificadas, é necessário alimentar a máquina continuamente com uma polpa celulósica que permita a boa formação do papel e, proporcione as características necessárias para a produção de um papel de qualidade.

A pasta celulósica consumida pelas máquinas de papel da WestRock Três Barras é produzida pela própria empresa, que realiza desde a picagem da madeira até o cozimento e lavagem das fibras, passando por um tratamento prévio de refinação e controle de qualidade antes de ser enviado para as torres de estocagem. Das torres de estocagem a pasta celulósica é enviado para o setor de preparo de massa da máquina de papel, onde é tratada pelo processo de refinação das fibras.

A Máquina de Papel #3 possui atualmente 6 refinadores (Figuras 10 e 11), que operam em paralelo, para realizar o preparo das fibras antes de enviar as mesmas para a produção do papel. Em geral, 4 ou 5 destes refinadores realizam a refinação de fibra virgem de eucalipto, enquanto um deles faz a refinação de fibras provenientes de papel reciclado, proporcionando um mix de fibras capaz de otimizar a formação da folha de papel. Para gramaturas acima de 100 g/m<sup>2</sup>, o preparo de massa trabalha com os 6 refinadores ativos, para garantir o fornecimento de fibras suficiente para sustentar a velocidade de produção da máquina.



**Figura 10 – Conjunto de Refinadores**

**Fonte: Autoria Própria**





**Figura 11 – Conjunto de Refinadores**

**Fonte: Autoria Própria**

Atualmente, o controle de refinação da Máquina de Papel #3 é realizado manualmente, baseado nos resultados de análise laboratorial da pasta celulósica, na indicação de corrente dos refinadores e pelo “feeling” dos operadores do preparo de massa da máquina, que aproximam ou afastam os discos dos refinadores, acionando direta ou reversamente o motor de encosto de disco.

O controle da intensidade de refinação manual realizado na Máquina de Papel #3 da WestRock Três Barras apresenta diversos pontos negativos, como:

- Imprecisão de controle: ao encostar ou afastar os discos, o refinador se baseia na indicação de corrente do refinador, porém, o mesmo não consegue manter esta corrente estável, pois as condições de fluxo e consistência de massa de entrada variam, fazendo com que a corrente dos refinadores oscile continuamente;
- Refinação não homogênea: considerando que todos os refinadores trabalham em paralelo, eles não realizam a refinação com a mesma intensidade, pois as características mecânicas do equipamento provocam diferenças de carga entre os mesmos, não sendo a corrente uma referência confiável;
- Intensidade de refinação variável: considerando que a proximidade dos discos é fixada pelos operadores, as variações de consistência e fluxo proporcionam ao processo o aumento ou a redução da intensidade de refino;
- Alto consumo de energia: considerando que as variações de carga dos refinadores não são levadas em consideração, temos o desperdício de

energia no processo de refino quando a carga dos refinadores aumenta desnecessariamente;

A aplicação do controle de energia específica de refinação nesta máquina visa eliminar ou reduzir estes pontos negativos existentes atualmente, melhorando a qualidade do tratamento das fibras e reduzindo a energia consumida neste processo.

### 3.2 REFINADORES DA MÁQUINA DE PAPEL #3

Os refinadores utilizados na Máquina de Papel #3 são refinadores da marca PILÃO, modelo RTD 840, reformados pela empresa ERGEN, conforme Figura 12.



**Figura 12 – Refinador PILÃO modelo RTD 840**

**Fonte: Autoria Própria**

Os refinadores RTD 840 são refinadores a disco, tipo TRI-DISC, possuindo três discos de refinação, dois estáticos e um disco central rotativo de superfície dupla, que são capazes de refinar diversos tipos de fibra. O rotor deste refinador é montado sobre um eixo que gira livremente sobre os mancais, com deslocamento axial nos dois sentidos entre os discos estáticos, proporcionando a flutuação do disco rotativo.

A folga entre os discos do refinador é determinada através do sistema eletromecânico de avanço do estator, que estabelece mais ou menos pressão entre

os discos. O mecanismo de ajuste dos discos é constituído de um sistema automático composto de um motoredutor de rosca sem fim, acionado por um motor de dupla rotação e reversível. O ajuste dos discos pode também ser realizado manualmente, através de um volante.

Os refinadores RTD 840 são alimentados na tensão 4160 voltz, e sua potência instalada pode variar entre 700 e 2000 HP. A Figura 13 apresenta as especificações dos refinadores RTD 840 instalados na Máquina de Papel 3 da WestRock.

Descrição	Unid.	RTD-42"	
Potência Instalada	HP	700 - 2000	
Rotações 50 HZ	RPM	428 - 600	
Rotações 60 HZ	RPM	400 - 600	
Capacidade de Produção	T/D	100 - 900	
Peso aproximado	Kg	7400	
Momento de Inércia	UTM.m <sup>2</sup>	2,9	
	Kg.m <sup>2</sup>	29,0	
Velocidade do Cabeçote 60 HZ	mm/min	lento	1,05
		rápido	6,51
Velocidade do Cabeçote 50 HZ	mm/min	lento	0,86
		rápido	5,36
Carga de Solo	Kg/cm <sup>2</sup>	1,524	
Capacidade do Tanque de óleo do eixo principal	ml	7900	
Pressão Mínima de Entrada de Massa	Kg/cm <sup>2</sup>	1,5	
Pressão Máxima de Entrada de Massa	Kg/cm <sup>2</sup>	3,5	
Pressão Máxima de Saída de Massa	Kg/cm <sup>2</sup>	5,0	
Aumento de pressão no Refinador	Kg/cm <sup>2</sup>	1,5 Max. (De acordo com configuração dos Discos)	
Pressão Mínima da água de Selagem das gaxetas	Kg/cm <sup>2</sup>	1,0 a 1,5 acima da pressão de entrada de Massa	
Consistência - Massa	%	Até 6%	
Consumo de água de selagem das gaxetas.	l/min	5,0 a 18,0 (Ver Nota 4)	

**Figura 13 – Especificações técnicas dos refinadores PILÃO modelo RTD 840**

**Fonte:**

### 3.3 SISTEMA DE CONTROLE DE REFINAÇÃO ATUAL

Para realizar o controle do processo de refinação, a operação utiliza como parâmetros principais as seguintes medições:

- Consistência da polpa de entrada dos refinadores: medição realizada por medidores de consistência online, instalados na linha geral de entrada de polpa para os refinadores;

- Consistência da polpa de saída dos refinadores: medição realizada por medidores de consistência online, na saída geral dos refinadores;
- Fluxo de polpa de saída dos refinadores: medição realizada por medidores de fluxo instalados na linha de saída de polpa de cada refinador;
- Medição de Freenes da polpa de entrada dos refinadores: medição realizada em laboratório através de amostras coletadas periodicamente na linha geral de entrada dos refinadores;
- Medição de Freenes da polpa de saída dos refinadores: medição realizada em laboratório através de amostras coletadas periodicamente na linha de saída de cada refinador e nos tanques de mistura de pós refinação;
- Indicação de corrente dos refinadores: medição realizada no motor que aciona o disco central dos refinadores, relacionada diretamente com a potência consumida pelo refinador;

Além destas medidas, fatores como a indicação de vácuo no final de mesa formadora e padrões de qualidade do papel produzido também apresentam influências no controle de refinação.

Baseando-se nas medições apresentadas, o controle do processo é realizado pelos operadores, através dos seguintes instrumentos:

- Válvula de controle de fluxo de polpa: controla o fluxo de massa na saída de cada refinador;
- Válvula de controle de diluição da polpa: controla a quantidade de água de diluição acrescentada a polpa antes de a mesma ser enviada aos refinadores;
- Válvula de controle de gramatura: controla o fluxo de polpa refinada enviada para a produção do papel na mesa plana;
- Motoredutores de encosto dos discos dos refinadores: controla a aproximação e afastamento dos discos de cada refinador;

O controle realizado atualmente é intuitivo e pouco preciso, dependendo da percepção e sensibilidade do operador com relação ao processo. A Figura 14

apresenta o painel utilizado pelos operadores para realizar o acionamento e o controle dos refinadores, encostando ou afastando os discos.

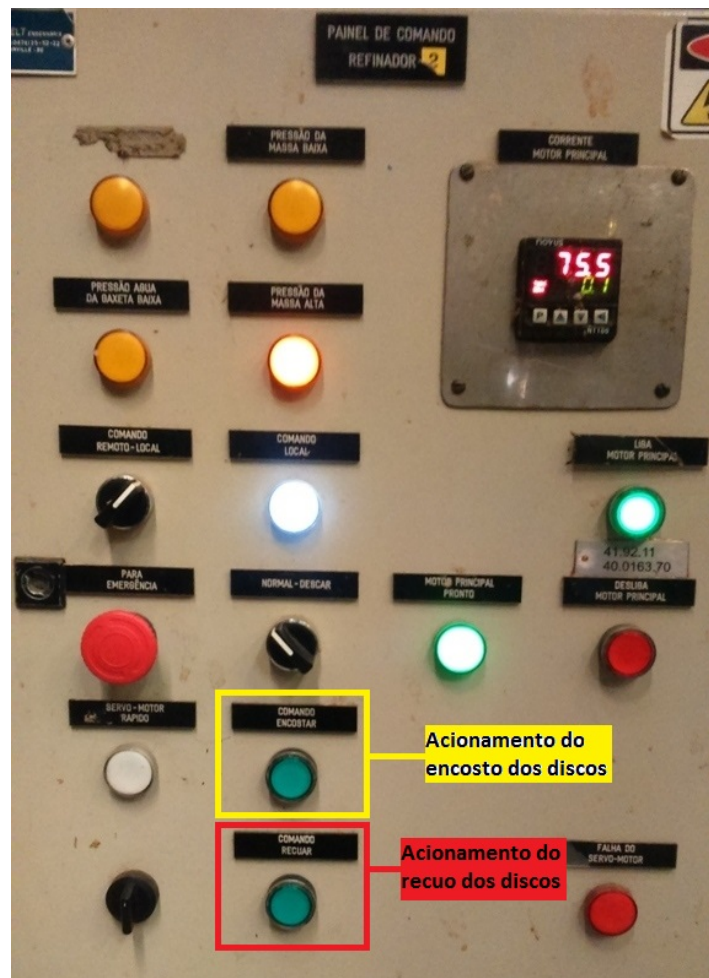


Figura 14 – Painel de Controle e Acionamento dos Refinadores

Fonte: Autoria Própria

De maneira geral, pode-se apresentar o processo de controle de refinação atual da seguinte maneira (Figura 15):

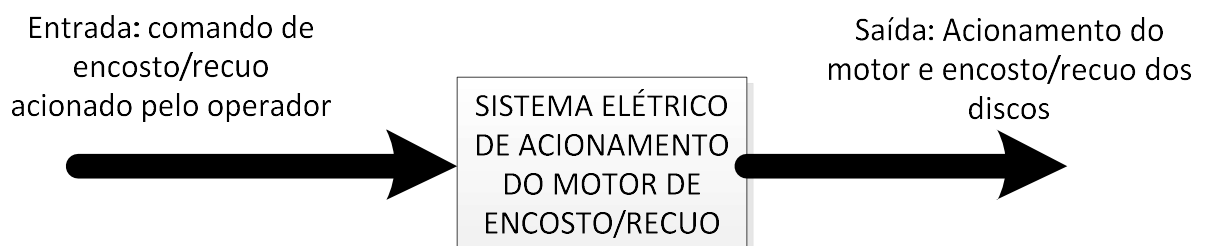


Figura 15 – Processo de Controle de Refinação Atual

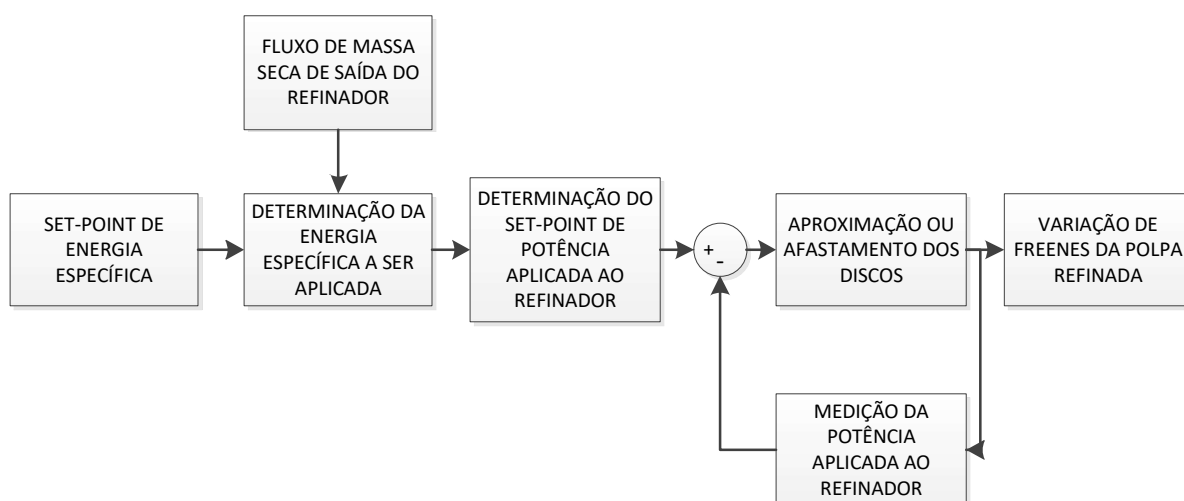
Fonte: Autoria Própria

Ao perceber a necessidade de um maior ou menor nível de refinação no processo, baseado nas medições já citadas, o operador aciona o comando de aproximação ou afastamento dos discos e observa o comportamento das variáveis do sistema, que irão determinar se a intervenção foi eficiente ou não. Neste sistema de controle em malha aberta não temos um parâmetro determinante para o controle do refino, apenas a sensibilidade do operador frente as variáveis de processo.

### 3.4 SISTEMA DE CONTROLE DE REFINAÇÃO BASEADO NA ENERGIA ESPECÍFICA DE REFINO

A implementação do controle de refinação baseado em energia específica tem como principal intenção reduzir o consumo de energia dos refinadores, realizando um controle preciso na intensidade de refinação da pasta celulósica e, conseqüentemente impedindo que ocorram perdas consideráveis de energia. O controle de energia específica retira a responsabilidade do operador em manter a intensidade de refino da pasta celulósica estável.

O diagrama de controle de energia específica pode ser apresentado conforme a Figura 16.



**Figura 16 – Diagrama de Controle de Refinação Baseado em Energia Específica**

**Fonte: Autoria Própria**

O set-point de energia específica é determinado pelo operador baseado nas condições de produção e medições de freenes realizadas em laboratório. Ao

determinar o set-point de energia específica, o mesmo é comparado com o fluxo de massa seca ( $\phi_{MS}$ ) que sai do refinador, calculado através da relação entre as medidas de consistência ( $CS\%$ ) e fluxo de pasta celulósica ( $\phi_S$ ), conforme equação (09).

$$\phi_{MS} = CS\% \cdot \phi_S / 100 \quad (09)$$

A relação entre o fluxo de massa seca e o set-point de energia específica determina a potência energética a ser transferida para a pasta celulósica por unidade de massa que saí do refinador. Somando a potência efetiva aplicada a polpa com a potência de operação do refinador sem carga, é possível determinar o set-point de potência a ser fornecida ao mesmo. Para alcançar o set-point determinado, o sistema de controle aciona o motor de encosto dos discos, de maneira direta para aumentar a potência sobre a pasta e, de maneira reversa para reduzir a mesma.

Com o objetivo de garantir a fidelidade do sistema, a medição de potência do refinador é comparada ao set-point, realizando um controle em malha fechada com realimentação negativa.

Por fim, ao aumentar ou reduzir a potência aplicada a pasta celulósica, o sistema controla as oscilações dos níveis de refinação, impedindo consumos energéticos desnecessários ou a falta de refino da polpa, que pode prejudicar a qualidade final do papel.

## 4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE DADOS

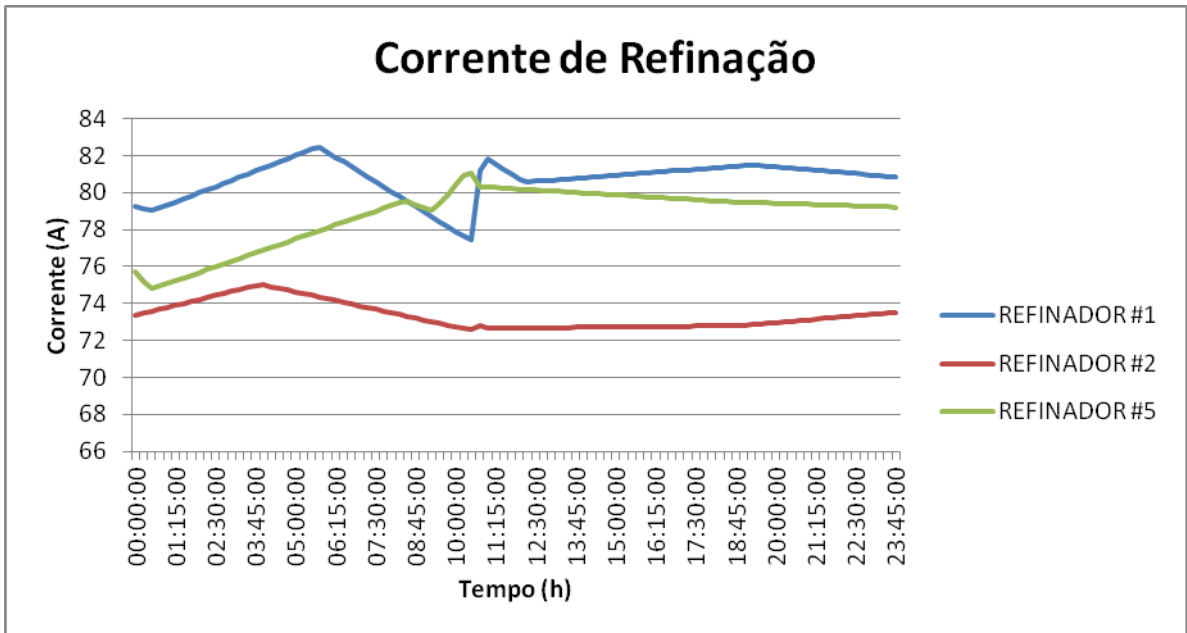
Os dados utilizados para analisar o processo de refinação da Máquina de Papel #3 foram coletados utilizando o software de registro, análise e visualização de dados PI System, que registra os dados de processo em tempo real, armazenando todo o histórico de informações em sua base de dados. Desta maneira, foram coletados os dados necessários para a análise do processo de refinação e suas variantes.

Para delimitar as variáveis envolvidas na análise, os dados utilizados foram coletados em períodos em que a máquina se manteve em operação normal e contínua, sem alterações consideráveis em parâmetros relevantes ao estudo. Considerando isto, os dados coletados não envolvem situações de parada ou reinício de máquina, períodos de troca de gramatura ou alterações de receita de massa.

Ainda para fins de análise, os dados coletados foram de 3 dos 6 refinadores ativos, considerando que 2 deles utilizam polpas diferentes dos demais e, de acordo com a demanda de polpa refinada, um dos refinadores restantes pode estar desativado para troca de discos ou manutenção.

A Figura 17 apresenta o gráfico da variação de corrente nos refinadores ao longo de um dia, em condições normais de produção, antes da implementação do controle de energia específica. É possível notar que, devido as condições de processo, principalmente variações de fluxo e consistência, a corrente sobre os refinadores se altera constantemente, o que indica que os mesmos estão fornecendo mais ou menos energia a quantidade de fibras que passa por eles. De maneira geral, pode-se dizer que, por consequência das oscilações de fluxo e consistência, uma maior ou menor quantidade de massa entra nos refinadores, fazendo com que os mesmos sofram oscilações de carga e, conseqüentemente refinem as fibras de maneira não homogênea.

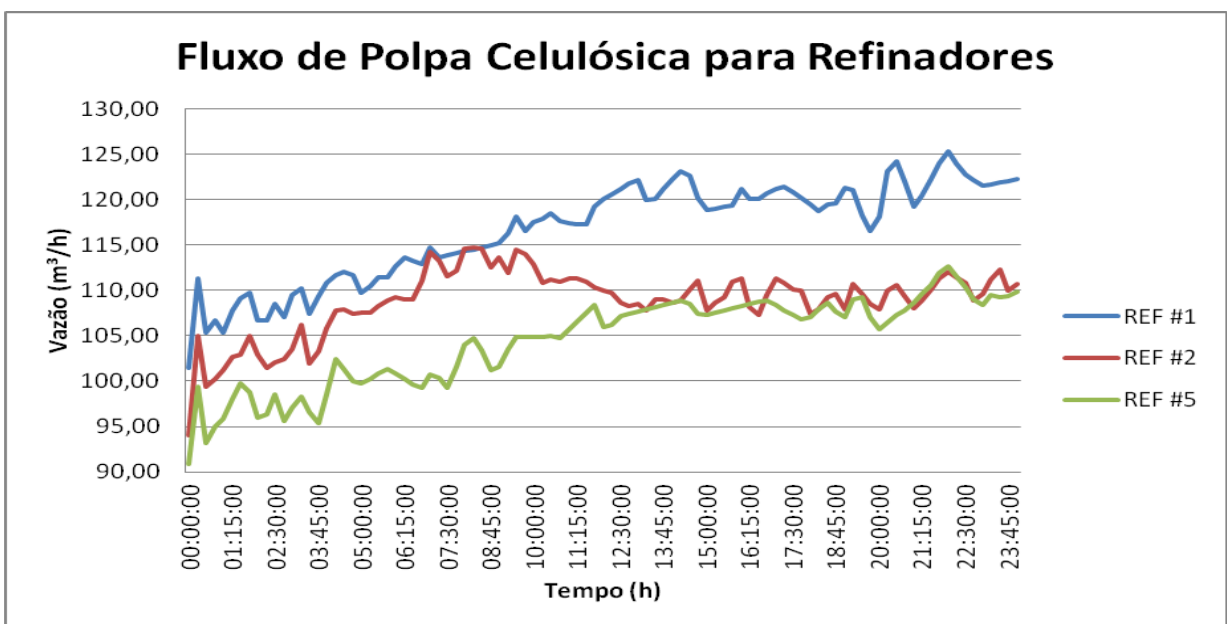




**Figura 17 – Gráfico de Corrente dos Refinadores #1, #2 e #5.**

Fonte: Autoria Própria

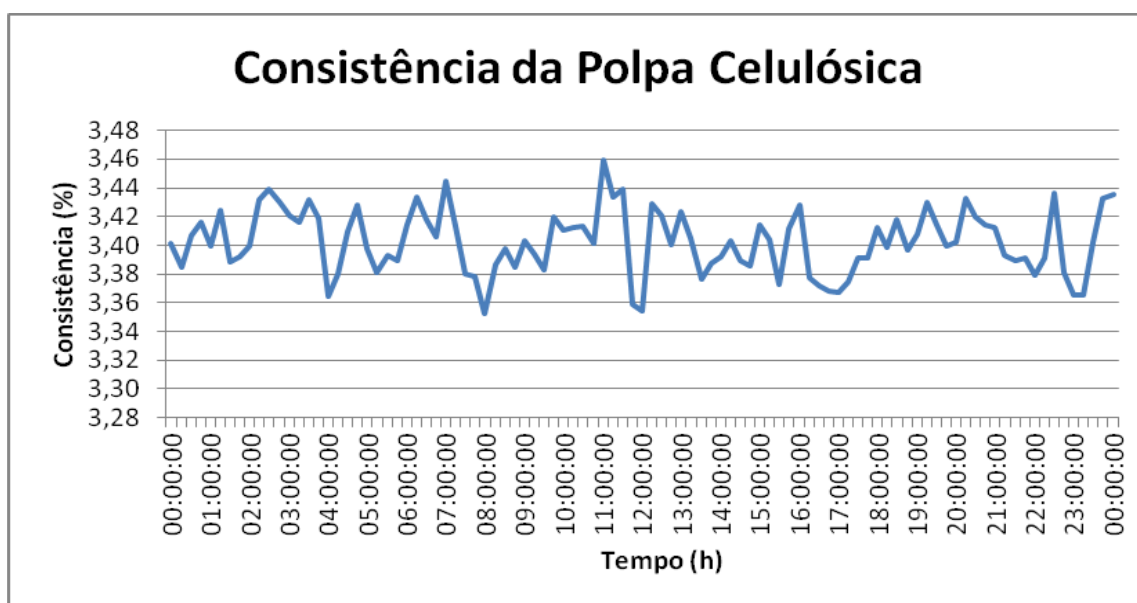
A variação de fluxo nos refinadores para o mesmo intervalo de tempo está apresentada na Figura 18. Nesta figura é possível notar que o controle de fluxo de polpa celulósica é bastante impreciso e sofre diversas variações, o que impacta diretamente no processo de refino, alterando a quantidade de massa processada por unidade de tempo.



**Figura 18 – Gráfico de Vazão de Polpa Celulósica nos Refinadores #1, #2 e #5.**

Fonte: Autoria Própria

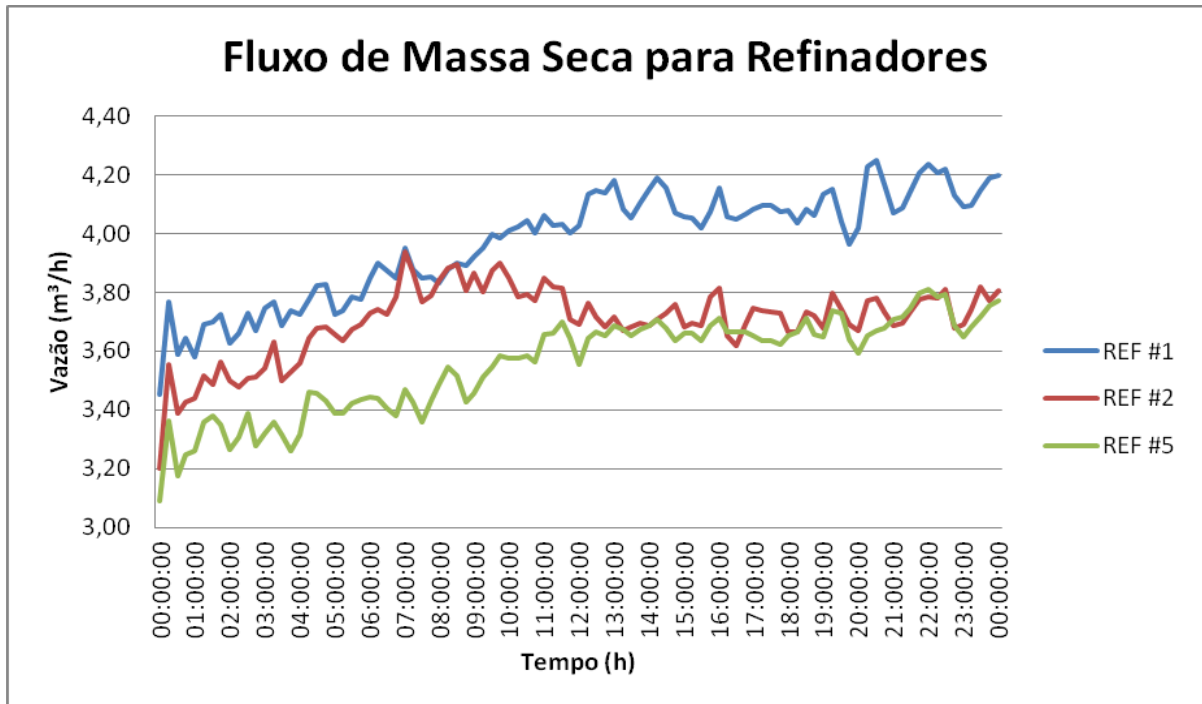
Antes de ser enviada para os refinadores, a pasta celulósica passa por tanque de massa, com a finalidade de homogeneizar a mesma e controlar sua consistência. Em geral, a consistência de polpa enviada para os refinadores é controlada com um set-point entre 3% e 4%. A Figura 19 apresenta o gráfico da variação de consistência em função do tempo para o mesmo período apresentado nos gráficos anteriores. É possível notar que, em média a consistência fornecida aos refinadores é de 3,40%.



**Figura 19 – Gráfico de Consistência da Polpa Celulósica nos Refinadores #1, #2 e #5.**

**Fonte: Autoria Própria**

As oscilações de consistência e vazão fazem com que a quantidade de massa seca que passa pelos refinadores em cada intervalo de tempo oscile e, consequentemente a carga entre os discos aumente e diminua com estas variações. Neste sentido, a potência consumida pelos refinadores depende diretamente destas oscilações. A Figura 20 apresenta o gráfico da vazão de massa seca que passa pelos refinadores, calculada a partir da multiplicação entre os valores de vazão e consistência.

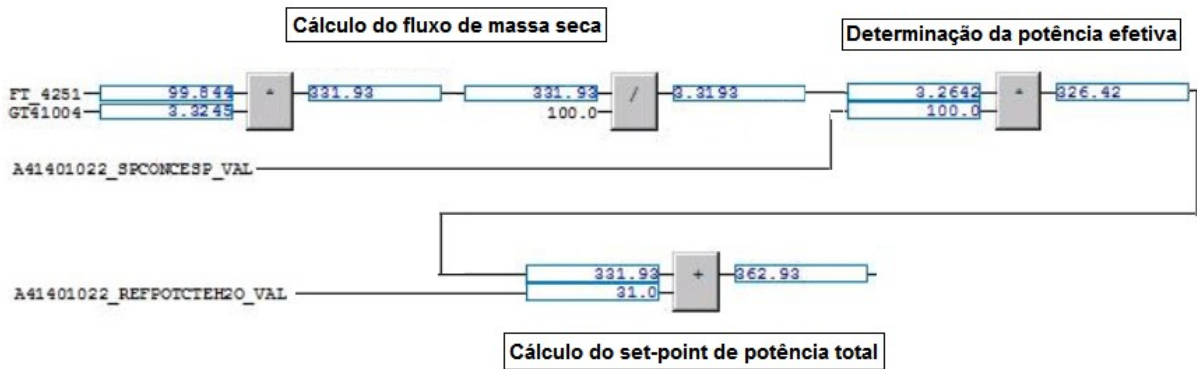


**Figura 20 – Gráfico de Vazão de Massa Seca nos Refinadores #1, #2 e #5.**

**Fonte: Autoria Própria**

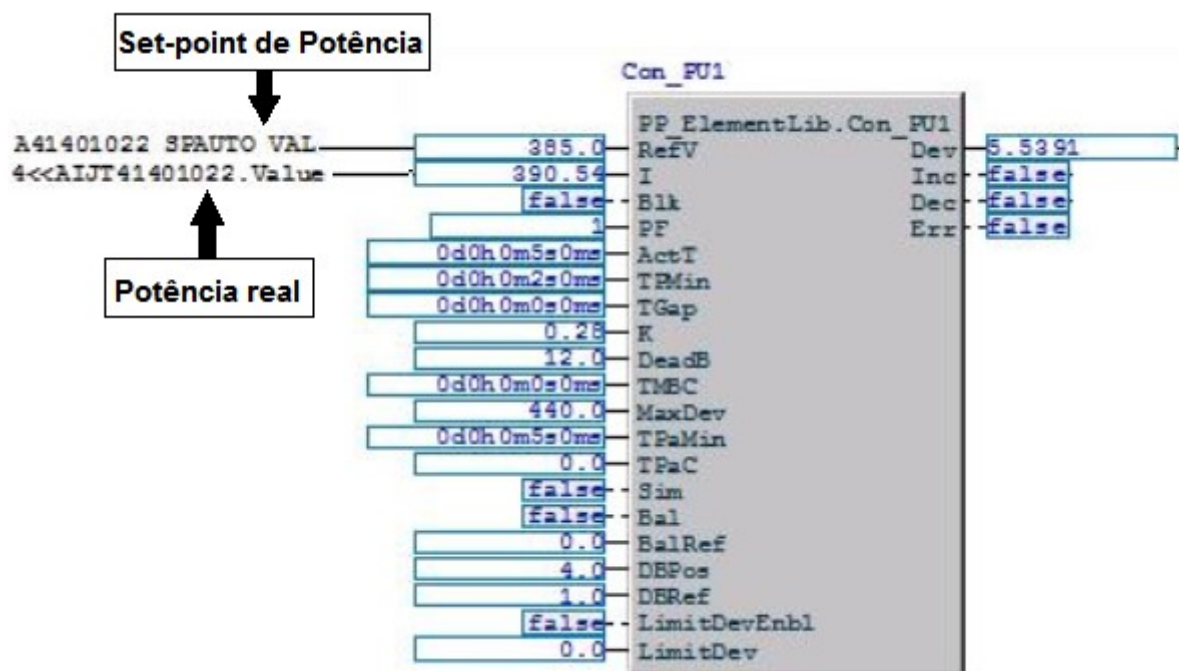
Para reduzir os impactos da oscilação energética dos refinadores no refino das fibras e no consumo de energia do processo, foi realizada a implementação do controle de refinação baseado na teoria da energia específica transferida para a polpa. Desta maneira, foram modificados os dispositivos de controle e acionamento do refinador, permitindo a atuação de um controle automático sobre o motor de encosto dos discos e, a lógica do sistema foi modificada, implementando-se o controle de refino baseado na energia específica de refinação.

A lógica de controle implementada tem como base o diagrama já apresentado na Figura 16. Desta maneira, o controlador se baseia no set-point de energia específica, na potência do refinador sem carga e nas medições de vazão e consistência para determinar o set-point de potência. A Figura 21 mostra a lógica que determina o set-point de potência do refinador.



**Figura 21 – Blocos Lógicos de Cálculo do Set-point de Potência dos Refinadores**  
**Fonte: Autoria Própria**

Após determinar o set-point de potência ao qual o refinador deve ser conduzido, foi implementada a lógica de controle da potência do motor principal, usada para controlar o motor de encosto dos discos. Conforme apresenta a Figura 22, para realizar este controle foi utilizado um bloco de comparação de valores, que compara o set-point desejado com a potência real do refinador. Quando o desvio entre os dois valores atinge o limite configurado, o bloco aciona o motor de encosto por um determinado tempo, até que a potência atinja um valor próximo ao do set-point. Desta maneira, o controle do encosto do refinador pode ser classificado como controle regulatório.



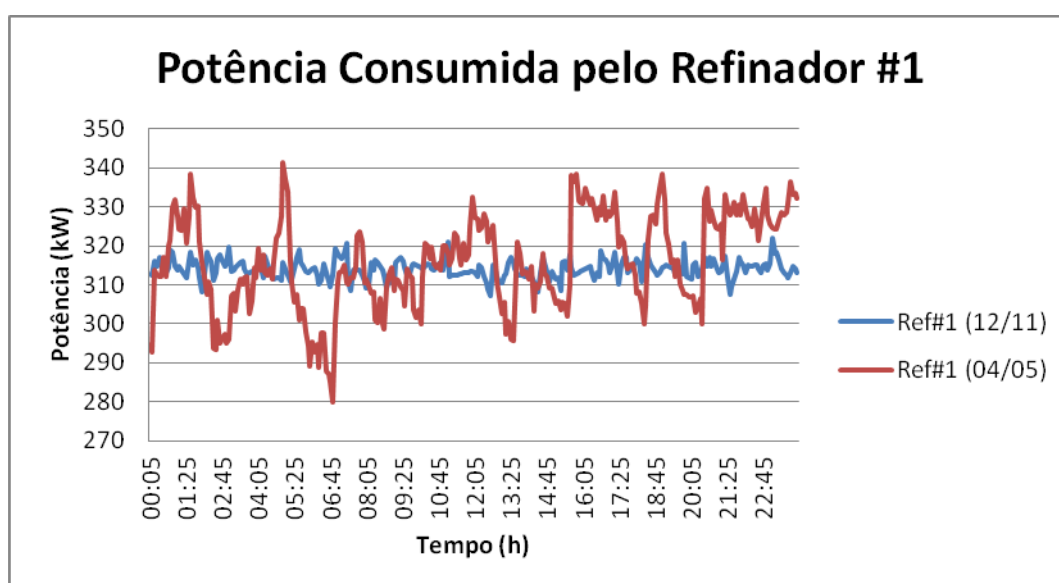
**Figura 22 – Bloco Lógico de Controle de Potência dos Refinadores**

Fonte: Autoria Própria

Após a implementação da lógica, foi necessário um período de adaptação e ajustes para configurar corretamente o controle do motor de encosto, devido as variações de processo e condições dos refinadores.

#### 4.1 COMPARATIVO DE DADOS

O resultado da implementação do controle de energia específica pode ser verificado através da Figura 23, que apresenta as variações de potência do Refinador #1 antes e após a implementação. Como é possível notar, o controle de energia específica proporciona uma maior estabilidade na potência consumida pelo refinador. Como consequência deste controle, a energia transferida as fibras se mantém sempre próxima ao set-point de energia específica determinado, fazendo com que a polpa refinada tenha maior homogeneidade e permita uma melhor formação do papel.

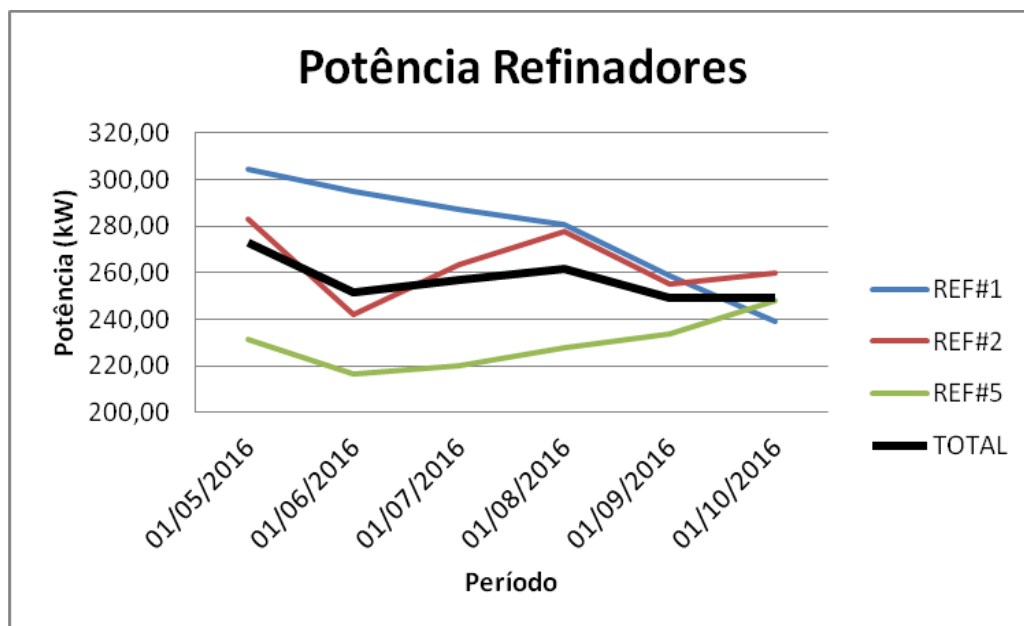


**Figura 23 – Variação da Potência do Refinador #1 ao Longo de um Dia, Antes e Após a Implementação do Controle.**

Fonte: Autoria Própria

Durante o período de implementação e adaptação dos operadores, é possível notar o decrescente consumo de energia do conjunto. O gráfico da Figura 24

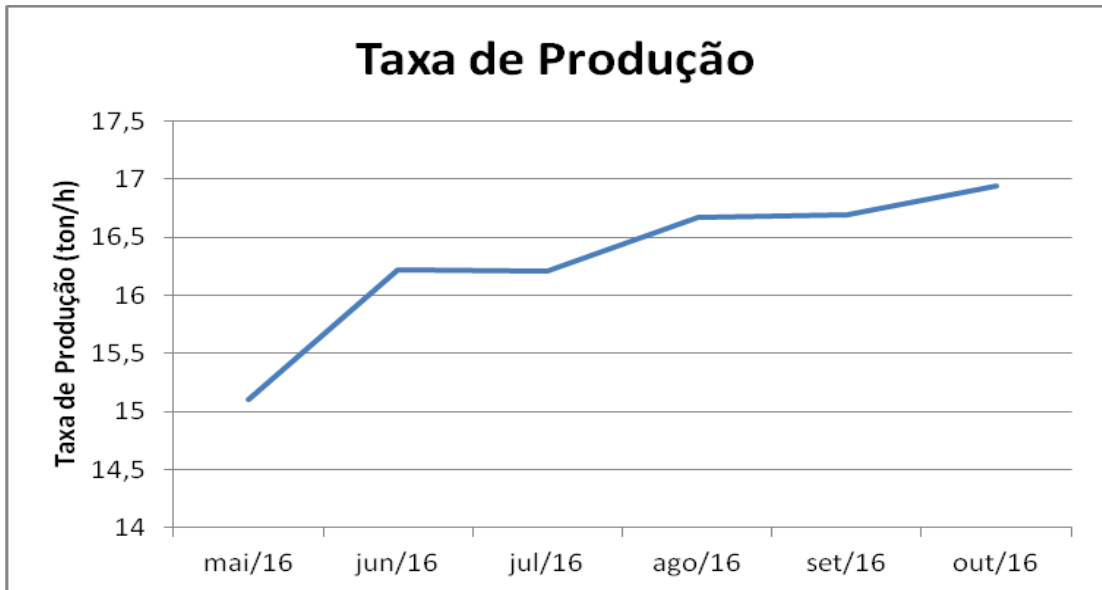
apresenta a potência consumida pelos refinadores 1, 2 e 5 entre os meses de maio e novembro. A média de consumo dos três refinadores no último mês medido é de 249,01kW, contra um valor inicial, medido no mês de maio, de 273,09kW, o que apresenta uma queda de 24,09kW. Considerando que a máquina opera 24 horas ao dia durante todo o mês, sofrendo apenas algumas paradas esporádicas, a economia de energia em um período de um mês será de aproximadamente 17MWh. Este ganho tende a aumentar de acordo com a prática dos operadores no novo sistema.



**Figura 24 – Potência Consumida Pelos Refinadores 1, 2 e 5 Entre os Meses de Maio a Outubro**  
**Fonte: Autoria Própria**

Com relação as melhorias de qualidade, também é possível perceber uma melhora significativa, principalmente nos testes que estão diretamente relacionados a refinação. Como exemplo, o teste de resistência a compressão, que indica a força de ligação entre as fibras, passou de valores que oscilavam em torno de 12kgf nos meses de maio e junho para um valor de 14kgf no mês de novembro, demonstrando a melhoria proporcionada pela estabilidade da refinação na ligação entre as fibras e na formação da folha.

A taxa de produção da Máquina de Papel #3 também apresentou bons resultados após a implementação do controle, saindo de uma taxa média de 15,09ton/h no mês de maio para 16,94ton/h em outubro, demonstrando o potencial do sistema. A Figura 25 apresenta a variação da taxa média de produção ao longo dos meses.



**Figura 25 – Variação da Taxa de Produção da MP#3**

**Fonte: Autoria Própria**

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A teoria de controle de refinação baseado na energia específica de refino se apresenta como uma alternativa de controle bastante viável e promissora. Apesar da proposta do sistema de controle avançado se mostrar mais precisa e eficaz, o custo de instalação e manutenção deste sistema tornam o mesmo pouco atrativo a maioria das máquinas de papel. Desta forma, o controle de energia específica traz diversas vantagens, dentre elas, o custo relativamente baixo de implementação, a não necessidade de manutenção em novos equipamentos de medição, a redução do consumo de energia, a melhoria na qualidade do papel e o aumento da taxa de produção por consequência de uma melhor formação da folha.

Ao avaliar as condições de refino anteriores a aplicação do sistema de controle, nota-se a dependência direta da qualidade frente a ação dos operadores. O controle de refino se baseava nas medições de laboratório e na percepção do operador com relação a necessidade de aumentar ou diminuir os níveis de refinação em determinados momentos, na tentativa de manter os níveis de potência do mesmo. Este tipo de controle se mostra pouco eficiente devido as diversas influências externas que o sistema poderá sofrer. A aplicação de um sistema de controle limita as falhas humanas e estabiliza o processo de refinação que, consequentemente proporciona melhorias ao processo.

No presente estudo de caso, foi possível perceber as mudanças proporcionadas pela aplicação do controle de refino. Um dos principais fatores apresentados é a economia de energia no processo de refino. A taxa média de 17MWh ao mês equivale a uma economia energética de aproximadamente 10% da energia de refinação consumida anteriormente. Juntamente a isto, é importante perceber que, mesmo reduzindo o consumo de energia, a máquina de papel foi capaz de aumentar sua taxa de produção mensal em 1,85ton/h entre o primeiro e o último mês de medições. Estes valores comprovam que a aplicação do sistema de controle proporciona ganhos reais ao sistema, reduzindo o consumo de energia e aumentando a capacidade de produção.

Além dos ganhos já citados, o papel produzido também obteve melhorias com relação a qualidade do mesmo. O controle da energia de refino fornecido a polpa apresenta ganhos consideráveis na formação do papel.



Considerando o supracitado, é possível concluir que, a aplicação do controle de energia específica de refinação proporciona ganhos consideráveis na produção do papel e economia de energia. Por consequência, os custos para a fabricação do papel são reduzidos e o aumento da taxa de produção disponibiliza uma maior quantidade de papel para a venda, garantindo um aumento considerável nos lucros da companhia.

### 5.1 TRABALHOS FUTUROS

Como sugestão para trabalhos futuros, pode-se considerar:

- Estudo da viabilidade da aplicação de um controle de refinação avançado, através da implementação de um medidor de freenes online nas linhas de massa;
- Realizar o estudo da lucratividade proporcionada pela aplicação do sistema de controle de refino nesta máquina de papel;

## REFERÊNCIAS

ANDRADE, Alan Sulato de; **Qualidade da Madeira, Celulose e Papel Pinus Taeda L.: Influência da Idade e Classe de Produtividade**. 2006. 107 f. Dissertação (Programa de Pós Graduação em Engenharia Florestal). Curitiba: Universidade Federal do Paraná. 2006.

BHARDWAJ, Nishi K.; HOANG, Viet; KGUYEN, Kien L. **A Comparative Study of the Effect of Refining on Physical and Electrokinetic Properties of Various Cellulosic Fibres**. 2006. 8 f. Science Direct. 2006.

BITTENCOURT, Eduardo; **Parâmetros de Otimização no Processo de Fabricação de Celulose e Papel**. 2004. 73 f. Dissertação (Programa de Mestrado em Engenharia Florestal). Curitiba: Universidade Federal do Paraná. 2004.

BORTOLAN, Rafael Henrique. **Estudo do Efeito do Tipo de Celulose Utilizada e da Intensidade de Refino da Polpa Celulósica**. 2012. 58 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Programa de Pós Graduação Lato Sensu em Tecnologia de Celulose e Papel). São Paulo: Universidade Presbiteriana Mackenzie, 2012.

CUI, Li; MEDDEB-MOUELHI, Fatma; LAFRAMBOISEA, François; BEAUREGARD, Marc. **Effect of Commercial Cellulases and Refining on Kraft Pulp Properties: Correlations Between Treatment Impacts and Enzymatic Activity Components**. 2014. 7 f. Elsevier. 2014.

DIAS, Oriane Avancini; SIMONELLI, George. **Qualidade da Madeira Para a Produção de Papel**. 2013. 15 f. Goiânia: Enciclopédia Biosfera. 2013.

GHAREHKHANI, Samira; SADEGHINEZHAD, Emad; KAZI, Salim Newaz; YARMAND, Hooman; BADARUDIN, Ahmad; SAFAEI, Mohammad Reza; ZUBIR, Mohd Nashrul Mohd. **Basic Effects of Pulp Refining on Fiber Properties — A Review**. 2014. 19 f. Elsevier. 2015.

GREENWOOD, M. S.; PANETTA, P. D.; BOND, L.J.; MCCAW M. W. **Ultrasonic Sensor to Characterize Wood Pulp During Refining**. 2006. 4 f. Science Direct. 2006.

LUNDIN, Tom; WURLITZER, Fernanda; PARK, Song Won; FARDIM, Pedro. **Análise Energética em Refinação de Baixa Consistência de Madeira de Coníferas**. 2009. 20 f. O Papel, vol. 70. 2009.

MENEGAZZO, Miguel Lara. **Características Morfológicas de Celuloses Branqueadas de Pinus e Eucalyptus em Analisador Óptico Automático de Fibras**. 2012. 77 f. Dissertação (Programa de Mestrado em Ciências Florestais). Botucatu: Faculdade de Ciências Agrônômicas da UNESP. 2012.

NUGROHO, Dimas Dwi Prasetyo. **Low Consistency Refining of Mixtures of Softwood & Hardwood Bleached Kraft Pulp: Effects of Refining Power**.

2012. 66 f. Dissertação (Programa de Mestrado em Engenharia de Tecnologia de Papel e Celulose). Asian Institute of Technology. 2012.

OLEJNIK, Konrad; **Impact of Pulp Consistency on Refining Process Conducted under Constant Intensity Determined by SEL and SEC Factors.** 2013. 19 f. Bioresurces. 2013.

OLSON, James A.; DROZDIK, Janis; MARTINEZ, Mark; GARNER, Robert; ROBERTSON, Gordon; KEREQUES, Richard. **Characterizing Fibre Shortening in Low-consistency Refining Using a Comminution Model.** 2001. 8 f. ELSEVIER. 2003.

TORRES, C. E.; NEGRO, C.; FUENTE, E.; BLANCO, A. **Enzymatic Approaches in Paper Industry for Pulp Refining and Biofilm Control.** 2012, 18 f. Appl Microbiol Biotechnol.

WATZIG, Daniel. **Reducing Energy Costs Through Closed Loop Refiner Control.** 2011. 4 f. PaperCon. 2011.

WHALLEY, R.; MITCHELL, D. **Pulp Refining At Resonance.** 1998. 23 f. West Yorkshire: Departament of Mechanical and Manufacturing Engeneering. 1999.

YAMANDA, Hooman; BADARUDINA, Ahmad; SAFAEIB, Mohammad Reza; ZUBIRA, Mohd Nashrul Mohd. **Basic Effects of Pulp Refining on Fiber Properties – A Review.** 2014. 19 f. Malaysia: University of Malaya, 2014.