

# O controle da eficiência energética na moagem - A aplicação na Caraíba Metais S/A

Carlos Eduardo Pereira \*  
Joaquim Donizetti Donda \*\*

1. INTRODUÇÃO
2. O CIRCUITO DE MOAGEM DA CARAÍBA METAIS  
E CONSIDERAÇÕES TEÓRICAS
3. PROCEDIMENTO ADOTADO NA CARAÍBA METAIS
4. DETERMINAÇÃO AUTOMÁTICA DE WI OPERACIONAL  
A CORRIGIDO E DE EFICIÊNCIA DA MOAGEM
5. CONCLUSÕES
6. BIBLIOGRAFIA

\* Gerente de Processo da Caraíba Metais  
S/A

\*\* Engenheiro da Caraíba Metais S/A



# Resumo

## I - O CIRCUITO DE MOAGEM DA CARAÍBA METAIS E ASPECTOS TEÓRICOS

Faz-se uma apresentação do circuito de moagem da Caraíba Metais, ressaltando suas dimensões ( 4 moinhos - 800t/h). Discute-se a teoria de Bond, os limites de sua aplicação e os ajustes necessários para sua utilização no caso do Minério Caraíba.

## II - WI OPERACIONAL

Descreve-se sua aplicação para os moinhos da Caraíba, analisando-se a performance dos mesmos através da comparação entre o índice de moabilidade obtido em moinho de laboratório (moinho de Bond) e

o obtido operacionalmente. Mostra-se como utilizar este parâmetro como controle da eficiência energética (12.000 kw) do circuito de moagem e como direcionador do balanço das massas deste circuito.

Apresenta-se dados para comparação entre os moinhos ao longo de um determinado período de operação e traça-se comparações entre as performances dos moinhos para uma mesma pilha homogeneizada de minério.

## III- CONTROLE DA MOAGEM COM A UTILIZAÇÃO DO WI OPERACIONAL

Apresenta-se a forma de obtenção do WI operacional instantaneamente e como aplicá-lo, a partir daí, no controle automático do processo de moagem, obtendo-se continuamente no painel de comando a eficiência energética do processo.

# 1. Introdução

Diante da alta fração de energia envolvida na etapa de moagem, quando comparada com outras operações na área de Tratamento Mineral, é evidente a importância de parâmetros confiáveis de medida de eficiência energética. O objetivo desse trabalho é a apresentação do método adotado para tal na instalação da Caraíba Metais.

## 2. O circuito de moagem da Caraíba Metais e considerações teóricas

O circuito de moagem da Caraíba Metais é constituído por quatro moinhos de bolas de 16,5' x 25', acionados por motores síncronos, acoplamento por embreagem. A potência dos motores é de 3000 Kw, totalizando 12 000 Kw.

A moagem é efetuada em estágio único, em circuito fechado, a úmido. Cada moinho é alimentado em média por 200 t/h de minério de cobre.

A classificação é efetuada por hidrociclones cujo overflow constitui a alimentação da flotação (1).

A redução de tamanho de partículas minerais tem sido abordada de diversas maneiras ao longo do tempo.

A Terceira Teoria de Cominuição, apresentada em 1952 por Fred C. Bond (2), tem sido objeto de várias reavaliações, estando atualmente limitado o campo de sua aplicação para minérios de determinadas características, dentre os quais, o minério de cobre da Caraíba Metais (3).

A equação básica da Teoria de Bond é a seguinte:

$$W = 10 W_i \left( \frac{1}{\sqrt{F_{80}}} - \frac{1}{\sqrt{F_{80}}} \right) \quad (1)$$

Onde:

W - energia a ser aplicada em kilowatt-hora por tonelada curta de material a ser reduzido de tamanho

F<sub>80</sub> - diâmetro em micrometros da malha na qual é passante 80% da alimentação

F<sub>80</sub> - diâmetro em micrometros da malha na qual é passante 80% do produto

W<sub>i</sub> - Work Index, energia em kilowatt-hora por tonelada curta para reduzir um dado material homogêneo de tamanho teoricamente infinito até 80% passante em 100 micrometros. É determinado por testes padronizados por Bond.

De acordo com o desenvolvimento de BOND, esta equação é válida para as seguintes condições, tratando-se de moinhos de bolas:

Moagem a úmido, circuito fechado, em moinhos de diâmetro livre interno de 8 pés, para  $F_{80}$  inferior a 4000  $\mu\text{m}$ .

A energia calculada é a energia a ser aplicada no eixo pinhão do moinho incluindo perdas mecânicas no sistema, mas não leva em consideração perdas no motor ou em outros componentes, como embreagem ou redutores.

Posteriormente, com os estudos de C.A. ROWLAND (4), foram introduzidas correções para a equação de BOND e também apresentação do método para avaliação da eficiência de moagem.

O método apresentado por C.A. ROWLAND (5), consiste na obtenção dos denominados  $W_i$  operacional e  $W_i$  operacional corrigido, como será visto a seguir.

São facilmente obtidas, nos sistemas de moagem industrial, a energia consumida, a massa alimentada e as distribuições granulométricas da alimentação e do produto.

Aplicando-se fatores de correção para as perdas no motor e outros componentes, obtém-se a energia aplicada no eixo pinhão, dispondo-se então de:

$$W, F_{80}, P_{80}$$

Substituindo esses valores na equação (1) obtém-se o denominador  $W_i$  operacional.

$$W = 10 W_{iO} \left( \frac{1}{\sqrt{P_{80}}} - \frac{1}{\sqrt{F_{80}}} \right) \text{ ou,}$$

$$W_{iO} = \frac{W}{10} \left( \frac{\sqrt{P_{80}} \times \sqrt{F_{80}}}{\sqrt{F_{80}} - \sqrt{P_{80}}} \right) \quad (2)$$

Quando a moagem é efetuada sob condições diferentes daquelas citadas no desenvolvimento de Bond e listadas anteriormente, devem ser aplicados fatores de correção propostos por ROWLAND (5), que são os seguintes, para o circuito da Caraíba Metais:

- Fator de eficiência, ligado ao diâmetro do moinho:  $EF_1$

Para moinhos de diâmetro livre superior a 8 pés existe um ganho na eficiência, crescente até o limite de 12,5 pés. O fator é dado por:

$$EF_1 = \left( \frac{8}{D} \right)^{0,2} \quad (3)$$

Acima de 12,5 pés de diâmetro, o fator é o mesmo que o aplicado para esse diâmetro, cujo valor é 0,914.

- Fator de correção para alimentação grosseira:  $EF_2$

O tamanho ideal de alimentação para moinho de bolas é 100% passante em 3360  $\mu\text{m}$ , o qual requer aproximadamente o mesmo tamanho de bolas na carga.

Quanto mais grosseira a alimentação do moinho, maior o tamanho de bola necessário para quebrar o material, levando a uma grande amplitude na distribuição de tamanho das bolas, tornando a carga menos eficiente.

Comparando-se dados de plantas com os de laboratório, verifica-se a influência do tamanho da alimentação, da relação de redução, ou de ambos.

Esses fatores são relacionados por:

$$EF_2 = \frac{R_r + (W_i - 7) \times \left( \frac{F - F_0}{F_0} \right)}{R_r} \quad (4)$$

$$\text{Onde: } F_0 = 4000 \sqrt{\frac{13}{W_i}} \text{ tamanho ótimo de alimentação} \quad (5)$$

$$R_r = \frac{F_{80}}{P_{80}} \text{ Relação de redução} \quad (6)$$

$W_i$  = determinado em testes de moabilidade.

O  $W_i$  operacional obtido, conforme citado anteriormente, deve ser dividido por esses dois fatores, obtendo-se então o  $W_i$  operacional corrigido. A eficiência da moagem será dada então através do relacionamento entre o  $W_i$  operacional corrigido e o  $W_i$  determinado nos testes padronizados de laboratório, pelos índices:

$$\text{Fator de eficiência} = \frac{W_{iOc}}{W_i} \quad (7)$$

$$\text{Eficiência de moagem} = \frac{W_i}{W_{iOc}} \times 100\% \quad (8)$$

### 3. Procedimento adotado na Caraíba Metais

As pilhas de homogeneização constituem a alimentação da moagem (1). São duas pilhas de, em média, 12000 t cada. Enquanto uma é retomada a outra está em confecção.

Através de amostragem automática obtém-se amostras para controle processual da britagem e constituição de massa de material representativo de toda a pilha.

Uma vez completada a pilha, essa massa de material é fracionada em porções que se destinam à análises mineralógicas, granulométricas e para determinação do  $W_i$  da mesma, através de teste padronizado de Bond, em moinhos de bolas. Os dados obtidos são fundamentais para a etapa posterior de moagem e flotação.

O controle granulométrico do overflow dos ciclones, produto da moagem, é efetuado instantaneamente por PSMs (Particle Size Monitor) que fornecem continuamente no painel da sala de controle a porcentagem passante em 105 micrometros.

Dispõe-se então de indicação contínua e automática, para manutenção da granulometria do overflow dentro de limites aceitáveis para a etapa posterior de flotação.

Do overflow dos ciclones também são retiradas frações por amostradores automáticos a intervalos regulares, obtendo-se amostras para análise granulométrica.

Desta forma, dispõe-se de dados consistentes para controle processual da moagem e especificamente para determinação da eficiência da moagem, no que diz respeito às distribuições granulométricas e  $W_i$ .

Com as leituras dos registradores de energia dissipada na moagem (Kilowattímetros), alimentação dos moinhos (balanças), mais os dados anteriormente citados, é possível a determinação da eficiência de moagem, como é visto no exemplo:

Moinho 02  
 Pilha de Homogeneização - 108  
 Massa Alimentada - 30 954 t  
 Consumo de Energia no Período - 463 674 Kwh  
 $F_{80}$  - 14 438  $\mu\text{m}$   
 $P_{80}$  - 149  $\mu\text{m}$   
 Wi da pilha - 15,18 Kwh/st  
 Fator de Eficiência Motor/Embreagem - 0,93

### 3.1. Determinação do Wi operacional (WiO)

a) Energia consumida, por tonelada de minério:

$$W_m = \frac{463\ 674}{30\ 954} \times 0,93 = 13,93 \text{ Kwh/t}$$

b) Energia consumida, por tonelada curta de minério:

$$W = W_m \times 0,9072 \text{ :.}$$

$$W = 13,93 \times 0,9072 = 12,64 \text{ Kwh/st}$$

Aplicando a equação (2):

$$W_{iO} = 17,17 \text{ Kwh/st}$$

### 3.2. Determinação do Wi operacional corrigido (WiOc)

a)  $EF_1$  :

$$EF_1 = 0,914 \text{ (moinho de diâmetro maior que 12,5 pés)}$$

b)  $EF_2$  :

Aplicando equações (6), (5) e (4)

$$EF_2 = 1,245$$

$$\text{Então: } W_{iOc} = \frac{17,17}{1,245 \times 0,914} = 15,09 \text{ Kwh/st}$$

### 3.3. Determinação do fator de eficiência

$$\text{Fator de eficiência} = 0,99 \text{ (equação (7))}$$

### 3.4. Determinação da eficiência da moagem

$$\text{Eficiência da moagem} = 100,6\% \text{ (equação (8))}$$

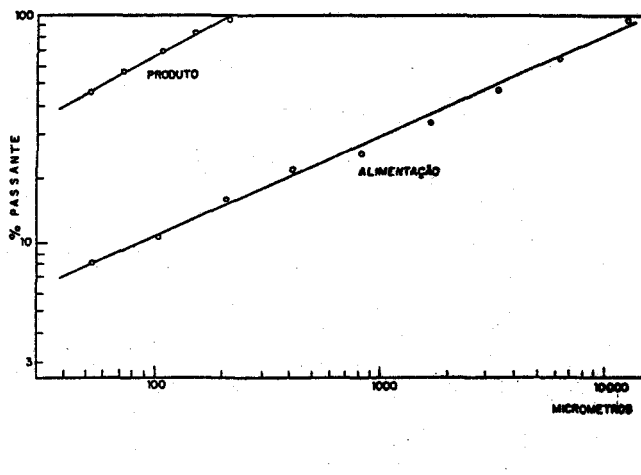
Os valores obtidos para o fator de eficiência e eficiência da moagem, significam que foi obtido um bom rendimento energético do moinho, pois, para o primeiro índice, valores superiores a 1,00 e para o segundo valores inferiores a 100%, são indicativos de que houve maior consumo de energia do que o necessário para reduzir o material de tamanho. (6)

Confeccionada uma pilha de homogeneização, alterações no  $P_{80}$  e no consumo de energia por tonelada de minério terão como consequência uma determinada eficiência energética de moagem, pois o  $F_{80}$  e o Wi da mesma são constantes.

Existem limitações para o  $P_{80}$ , devido ao grau de liberação necessário para a etapa posterior de

concentração. O grau de liberação ideal para esta flotação é conseguido com distribuição granulométrica do overflow que corresponde a  $P_{80}$  em torno de 150  $\mu\text{m}$ . Então, este é o outro fator que praticamente permanece constante. A manutenção da distribuição granulométrica do overflow dentro de faixas aceitáveis é conseguida através da aplicação de PSM, conforme citado anteriormente. Curvas de distribuição granulométrica típicas da alimentação e do produto do circuito de moagem e classificação são apresentados na fig. 01.

Figura 1 - Curvas granulométricas típicas da alimentação e produto da moagem



O objetivo é obter sempre o máximo possível de aproveitamento da energia aplicada aos moinhos e a meta é fator de eficiência menor ou igual a 1, admitindo-se no máximo o valor de 1,10. A ocorrência de valores superiores a esse último, com determinada frequência, é indicativa da existência de elementos não relacionados exclusivamente com balanço de massa, responsáveis pelo baixo aproveitamento da energia (7).

O problema básico consiste então em adequar os balanços de massas dos moinhos para que se tenha o menor consumo possível de energia por tonelada de minério atravessada, com a manutenção do  $P_{80}$  no valor anteriormente citado (150  $\mu\text{m}$ ).

Como a potência dos motores dos moinhos é praticamente constante, a produção destes deve ser a maior possível, com granulometria do produto que atenda as especificações da flotação.

O balanço de massa que tem se revelado mais adequado é apresentado na fig. 02. No primeiro dia de retomada de cada pilha homogeneizada são efetuados os ajustes necessários para aquela pilha e estes parâmetros são mantidos o mais constantes possível nos dias seguintes de retomada, num mínimo de 5,5.

Na tabela I são apresentados os dados que resumem o desempenho de um dos moinhos (MN 02) durante a retomada de 5 pilhas de homogeneização, abrangendo um período de 2 meses.

Durante a retomada das pilhas 108,109,110 houve bom aproveitamento da energia aplicada ao moinho.

Nas pilhas 111 e 113 como pode ser observado, houve baixo aproveitamento de energia.

O consumo específico de energia para a pilha 111 foi praticamente o mesmo das pilhas 108,109 e 110, apesar do Wi do teste de moabilidade e o  $F_{80}$  apresentarem os menores valores dentre as pilhas em questão.

Figura 02 - Fluxograma e balanço metalúrgico do circuito de moagem/classificação

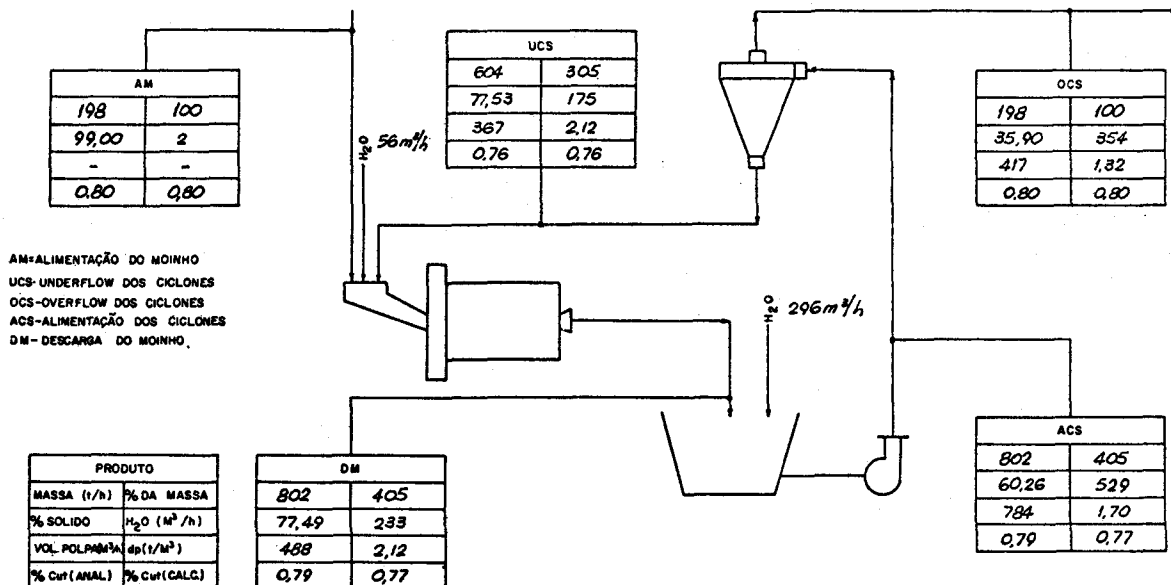


Tabela I - Desempenho do MN 02 no período: 27/11/83 - 25/01/84

PARÂMETROS	PILHAS DE HOMOGENEIZAÇÃO				
	108	109	110	111	113
Tamanho da alimentação P80 (µm)	14 438	15 217	13 637	10 130	11 712
Tamanho do produto P80 (µm)	149	146	144	151	148
Consumo de energia no período (kwh)	463 674	483 485	346 320	402 824	140 968
Produção no período (t)	30 954	32 900	23 602	27 456	9 178
Consumo específico de energia (kwh/t)	14,98	14,70	14,67	14,67	15,36
Fator de eficiência motor/embreagem	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93
Consumo de energia por tonelada de curta de minério (kwh/st)	12,64	12,40	12,38	12,38	12,96
Wi operacional - WIO (kwh/st)	17,17	16,61	16,56	17,33	17,76
Fator de eficiência ligado ao diâmetro do moimho - EF1	0,914	0,914	0,914	0,914	0,914
Fator de correção para alimentação grosseira - EF2	1,245	1,226	1,218	1,180	1,202
Wi operacional corrigido - WIOc (kwh/st)	15,09	14,82	14,87	16,07	16,17
Wi do teste de moabilidade (kwh/st)	15,18	14,73	14,83	14,31	14,61
Fator de eficiência	0,99	1,01	1,00	1,12	1,11
Eficiência da moagem	101%	99%	100%	89%	90%

Deveria ter havido aumento na produção do moimho, em relação as pilhas retomadas anteriormente. No entanto as tentativas de adequação do balanço de massa para conseguir o aumento de produção não conduziram a isso.

Para a pilha 113 verifica-se o maior consumo específico de energia do período e também a menor produção no período.

Isto ocorreu devido a problemas mecânicos que levaram a frequentes paradas do moimho. Como para ser retirado de operação o mesmo permanece por determinado tempo acoplado sem alimentação de minério, para moagem do material da carga circulante, o resultado é aumento no consumo específico de energia. Ou seja: o consumo específico de energia é função também do número de paradas do moimho no período.

Na tabela II são apresentados os dados referentes ao desempenho dos 4 moinhos durante a retomada de uma pilha de homogeneização ( pilha 108 ).

Tabela II - Retomada da pilha 108 Desempenho dos moinhos

PARÂMETROS	MOINHOS			
	MN 01	MN 02	MN 03	MN 04
Tamanho da alimentação P80 (µm)	14 438	14 438	14 438	14 438
Tamanho do produto P80 (µm)	149	149	152	152
Consumo de energia no período (kwh)	438 565	463 674	27 125	453 550
Produção no período (t)	28 894	30 954	1 735	29 139
Consumo específico de energia (kwh/t)	15,18	14,98	15,63	15,56
Fator de eficiência motor/embreagem	0,93	0,93	0,93	0,93
Consumo de energia por tonelada de curta de minério (kwh/st)	12,81	12,64	13,19	13,13
Wi operacional - WIO (kwh/st)	17,40	17,17	18,12	18,04
Fator de eficiência ligado ao diâmetro do moimho - EF1	0,914	0,914	0,914	0,914
Fator de correção para alimentação grosseira - EF2	1,245	1,245	1,250	1,250
Wi operacional corrigido - WIOc (kwh/st)	15,29	15,09	15,86	15,79
Wi do teste de moabilidade (kwh/st)	15,18	15,18	15,18	15,18
Fator de eficiência	1,01	0,99	1,04	1,04
Eficiência da moagem	99%	101%	96%	96%

Para os moinhos 01 e 02 a eficiência está próxima dos valores padrões.

Verifica-se menor eficiência para os moinhos 03 e 04. Os mesmos apresentavam revestimentos com desgaste acentuado, conduzindo a ineficiência no levantamento da carga.

#### 4. Determinação automática de Wi operacional corrigido e de eficiência energética da moagem

Atualmente encontra-se em adaptação um dos circuitos de moagem para acompanhamento

automático da eficiência energética e do Wi operacional corrigido e este controle será efetuado da seguinte maneira:

Como foi visto anteriormente, são necessários os seguintes dados para determinação do Wi operacional corrigido e eficiência da moagem:

- W
- F<sub>80</sub>
- P<sub>80</sub>
- Wi do teste de moabilidade

Para uma mesma pilha de homogeneização, fixada a granulometria do produto da moagem, todos os termos e fatores necessários para o cálculo do Wi operacional corrigido, fator de eficiência e eficiência da moagem tornam-se constantes, com exceção da energia consumida por tonelada de minério.

Então, temos:

- W - variável
- F<sub>80</sub> - constante
- Wi do teste de moabilidade - constante
- P<sub>80</sub> - deve ser mantido constante, através do controle automático da granulometria do overflow com PSM
- Fator de eficiência motor/embreagem = 0,93
- Fator de conversão tonelada curta - tonelada métrica = 0,9072

Nesse caso podemos considerar, para:

#### 4.1. Equação 2

$$\frac{1}{10} \times \left( \frac{\sqrt{P_{80}} \times \sqrt{F_{80}}}{\sqrt{F_{80}} - \sqrt{P_{80}}} \right) = K_1$$

#### 4.2. Equação 5

$$F_o = 4000 \sqrt{\frac{13}{W_i}} = K_2$$

#### 4.3. Equação 6

$$R_r = \frac{F_{80}}{P_{80}} = K_3$$

#### 4.4. Equação 4

$$EF_2 = \frac{K_3 + (W_i - 7) \times \left( \frac{F_{80} - K_2}{K_2} \right)}{K_3} = K_4$$

$$4.5. EF_1 = 0,914 = K_5$$

$$4.6. 0,93 \times 0,9072 = 0,844 = K_6$$

- Para a obtenção do Wi operacional corrigido:

$$WiOc = Wm \times \frac{K_1 \times K_6}{K_4 \times K_5}$$

Fazendo:  $\frac{K_1 \times K_6}{K_4 \times K_5} = Ka$ , temos:  $WiOc = Wm \times Ka$

- Para a obtenção do fator de eficiência:

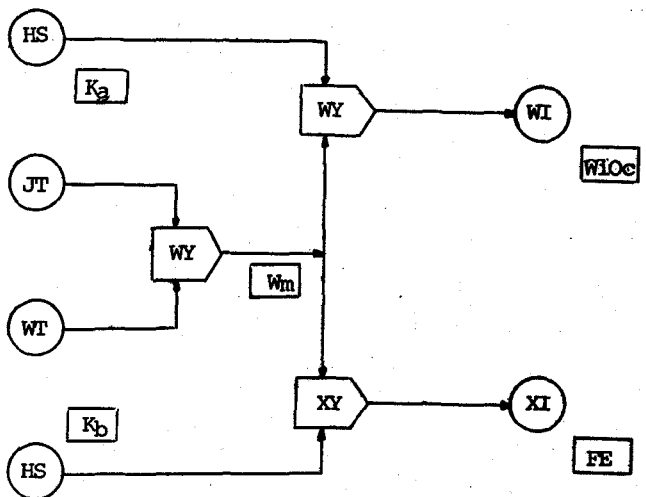
$$FE = \text{Fator de eficiência} = \frac{WiOc}{Wi} = Wm \times \frac{Ka}{Wi}$$

Fazendo  $\frac{Ka}{Wi} = Kb$ , então: Fator de eficiência = Wm x Kb

Portanto, um multiplicador, instrumento de utilização normal em controle de processo, alimentado com sinais dos indicadores de potência e massa alimentada, fornecerá a energia consumida por tonelada métrica de minério moído.

A partir deste valor e com a utilização de outros multiplicadores, ajustáveis, aos quais sejam fornecidos os valores de Ka e Kb, poderão ser obtidos o Wi operacional corrigido e o Fator de eficiência. Para cada pilha de homogeneização os fatores de multiplicação serão calculados e ajustados nos instrumentos, o que representa, em média, um ajuste semanal.

Tal forma de controle pode ser visualizada na malha abaixo:



Desta forma é possível obter instantânea e continuamente, no painel de controle da usina, estes dois dados de grande utilidade para avaliação de alterações nas diferentes variáveis de controle dos moinhos.

### 5. Conclusões

Conforme visto no desenvolvimento do trabalho, o circuito de moagem da Caraíba Metais é um circuito muito pesado, com uma potência instalada muito grande. Torna-se, portanto, de fundamental importância o controle de sua eficiência energética e sua operação a níveis cada vez mais otimizados.

Este trabalho mostra, de forma simples, um exemplo prático industrial de aplicação da teoria de Bond e desenvolvimentos posteriores de Rowland como formas de controle deste circuito, fornecendo subsídios de grande importância para acompanhamento do comportamento de um dado moinho em função do tempo bem como permitindo a comparação entre moinhos num dado intervalo de tempo.

É muito importante ressaltar que o método proposto para determinação automática e contínua do fator de eficiência energética e do Wi operacional corrigido é inédito e se constitui em grande benefício operacional uma vez que a disponibilidade de tais fatores no painel de comando tenderá a levar a usina para uma operação com rendimento energético otimizado e máxima tonelagem atravessada por moinho, redundando em diminuição de custos e aumento de produção.

## 6. Bibliografia

- (1) PEREIRA, C.E. & GUIMARÃES, S.A. A usina de concentração da Caraíba Metais. In: ENCONTRO NACIONAL DE TRATAMENTO DE MINÉRIOS E HIDROMETALURGIA, 10. Belo Horizonte, maio 1984.
- (2) BOND, F.C. Crushing and Grinding Calculation. Part I. Allis Chalmers Bulletin, British Chemical Engineering, 07R9235C, 1951.
- (3) OBLAD, A.E., et alii. Aplicação e dimensionamento de moinhos de barras e de bolas. In: FUNDAÇÃO INSTITUTO TECNOLÓGICO DO ESTADO DE PERNAMBUCO. Tratamento de minérios e hidrometalurgia in memoriam Prof. Paulo Abib Andery. Recife, 1980.
- (4) ROWLAND, C.A. Jr. Comparison of work index calculated from operation data with those from laboratory test data, Allis Chalmers Bulletin, The Institution of Mining and Metallurgy, London, 07P5122, 1973.
- (5) ROWLAND, C.A.Jr. The tools of power - The bond work index a tool to measure grinding efficiency. Allis Chalmers Bulletin, AIME, Denver, 22P10758, 1976.
- (6) ROWLAND, C.A.Jr. Report from visit to Caraíba Metais. Milwaukee, April 1983.
- (7) ROWLAND, C.A.Jr. Private communication to PEREIRA, C.E., Jaguarari, Caraíba Metais, Feb. 1983.