

REDUÇÃO DO CONSUMO ESPECÍFICO DE ENERGIA NO PROCESSO ELETROLÍTICO DE ZINCO APLICANDO A METODOLOGIA DO TOC*

Cláudio Fontanas Alves Pereira¹
Diogo Marcílio Alves da Silva²
Douglas Santiago Apolinário³
Filipe Campos Teodoro⁴
Johnaton Alves Carvalho Rodrigues⁵
Marcos Guilherme Corrêa Ávila⁶
Ricardo Cristian Vieira⁷
Reginaldo Cândido Rodrigues⁸
Warley José Gomes Pereira⁹

Resumo

A utilização de métodos de melhoria contínua permite às empresas reduzir custos, aumentar produtividade e assim, agregar maior valor aos seus stakeholders. Motivado pela significância do custo da energia elétrica no Cash Cost do Zinco, o presente trabalho discute e apresenta a aplicação da metodologia TOC (Theory of Constraints) e as medidas implementadas através desta para a redução do consumo específico de energia na eletrólise de zinco na empresa Nexa Resources de Três Marias. Pode-se constatar que a metodologia tem sido muito eficaz, tendo as ações impactado significativamente no KPI estudado, elevando a Unidade de Três Marias ao primeiro quartil de consumo de energia em eletrólise]

Palavras-chave: Eletrólise de Zinco; Consumo específico de energia; TOC (Theory of Constraints)

REDUCTION OF TANKHOUSE POWER CONSUMPTION IN THE ELECTROLYTIC ZINC PROCESS APPLYING TOC METHODOLOGY

Abstract

Proper use of continuous improvement methods enables companies to reduce costs, increase productivity and thus add value to their stakeholders. Motivated by the significance of the cost of electric energy in the Zinc Cash Cost, the present work discusses and presents the application of the TOC (Theory of Constraints) methodology and the improvements implemented through it to reduce the tankhouse power consumption, in zinc electrolysis at Nexa Resources, Três Marias. It can be verified that the methodology has been very effective, having the actions impacted significantly in the studied KPI, elevating the Três Marias Unit to the first quartile in tankhouse power consumption

Keywords: Zinc electrolysis; Tankhouse power consumption; Theory of Constraints.

¹ Técnico Químico, Técnico Especialista de Produção, Metalurgia, Nexa Resources, Três Marias, Minas Gerais, Brasil.

² Engenheiro Metalurgista, Engenheiro Pleno / Utilidades, EM&U, Nexa Resources, Três Marias, Minas Gerais, Brasil.

³ Engenheiro Mecânico, Engenheiro Sênior / Engenharia de Confiabilidade, EM&U, Nexa Resources, Três Marias, Minas Gerais, Brasil.

⁴ Engenheiro Eletricista, Técnico de Operação / Supervisor de Eletrólise, Metalurgia, Nexa Resources, Três Marias, Minas Gerais, Brasil.

⁵ Engenheiro Eletricista, Técnico Especialista de Manutenção / Automação, EM&U, Nexa Resources, Três Marias, Minas Gerais, Brasil.

- ⁶ *Engenheiro Metalurgista, Engenheiro Sênior, Sistemas de Gestão, NexaResources, Três Marias, Minas Gerais, Brasil.*
- ⁷ *Engenheiro Químico, Engenheiro Pleno / Especialista de Processos, Processos e PCP, NexaResources, Três Marias, Minas Gerais, Brasil.*
- ⁸ **Engenheiro Metalurgista**, *Gerente de Metalurgia, Metalurgia, NexaResources, Três Marias, Minas Gerais, Brasil.*
- ⁹ **Engenheiro Eletricista**, *Gerente Geral Industrial / Gerente Geral Metalurgia, NexaResources, Três Marias, Minas Gerais, Brasil*

1 INTRODUÇÃO

O Zinco (Zn), como todos os metais, é um composto natural inerente ao meio-ambiente e suas principais aplicações são em processos de galvanização, fundição de peças, construção civil e indústria automobilística, principalmente em virtude da sua oxidação preferencial em relação a outros metais. Já o óxido de zinco é muito utilizado na fabricação de pneus, medicamentos, ração animal e tinta, dentre outros produtos.

O principal processo produtivo de zinco é o hidro/eletrometalúrgico, o qual é responsável por cerca de 87% da produção desse metal (BROOK HUNT, 2009), em geral, a partir de minérios sulfetados contendo a esfarelita (ZnS).

ANexaResources localizada na cidade de Três Marias, Minas Gerais, é a única empresa do mundo com *know-how* capaz de processar de forma integrada os concentrados silicatado e sulfetado. Além disso, possui minas próprias para o seu suprimento, o que lhe confere vantagem competitiva em relação aos produtores e compradores de concentrados.

A produção da Nexa Três Marias, que era de aproximadamente 10 mil toneladas/ano em 1970, atingiu 116 mil toneladas/ano em 2000 e, atualmente, corresponde à cerca de 200 mil toneladas/ano.

A competitividade de uma indústria de zinco, dentre outros fatores, requer um baixo consumo de energia, por se tratar do principal insumo de todo processo. Em Três Marias, o custo da energia elétrica utilizada no processo eletrolítico é responsável por cerca de 50% do custo de extração (i.e., transformação do zinco contido no concentrado em zinco metálico) e desse percentual, mais de 80% correspondem à energia consumida nas eletrólises.

A busca constante por Melhoria Contínua em seus processos, em prol de maior competitividade, levou a Unidade de Três Marias a implementar a metodologia da Teoria das Restrições, do inglês *Theory of Constraints* (TOC), fazendo desta uma forma eficaz e eficiente de gerir os processos críticos e gargalos da sua operação.

Sendo a eletrólise uma das etapas mais críticas do processo, foi criado um grupo de TOC, onde são realizadas reuniões diárias de acompanhamento dos KPI's da Eletrólise, sendo o consumo específico de energia um dos principais destes, para garantir a estabilidade e otimização através de ações de rotina (curto e médio prazo), além do desenvolvimento de projetos de melhoria, conforme será apresentado adiante.

Diante disso, propôs-se com este trabalho:

- I. Aplicar o Método de trabalho TOC para governança do indicador de consumo de energia através de uma equipe multidisciplinar;
- II. Implantação de medidas estudadas que resultem na redução do consumo específico de energia da eletrólise;

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 Teoria das Restrições

A Teoria das Restrições foi desenvolvida pelo físico israelense Eliyahu M. Goldratt, que baseou-se na lógica de raciocínio utilizada na Física para explicar os fenômenos que acontecem nas organizações, especialmente nas industriais. A maior contribuição de Goldratt foi dar destaque ao fato de que todo sistema produtivo contém uma restrição, e esta determina sua capacidade. A partir daí, ele

concentrou-se em desenvolver ferramentas que permitissem o gerenciamento otimizado das restrições, e conseqüentemente do sistema (TABOADA et al, 2008). Um dos diferenciais da metodologia é a abordagem sobre a programação da produção chamada de “Tambor-Pulmão-Corda” – TPC. Essa abrangência propõe que a produção seja programada em função das restrições. Diante disso, avaliou-se a eletrólise como sendo a corda do processo, o que significa que é a etapa responsável por manter o fluxo de produção constante.

2.2 Consumo Específico de Energia Elétrica – Melhorias e Resultados

O consumo específico de energia elétrica de uma eletrólise pode ser determinado a partir da seguinte equação (Equação 1):

$$\text{Consumo Esp. CC} = \frac{[(\text{Tensão/cél} \times \text{Corrente Aplicada}) \times \text{N}^\circ \text{ Célis}]}{\text{Produção Catodo}} \quad (1)$$

Tendo em vista que a Corrente Aplicada e o Número de células são variáveis constantes e a produção de catodo uma função da corrente aplicada, tem-se a Tensão por célula como a única variável de atuação para impactar no consumo específico de energia elétrica.

A tensão por célula, por sua vez, pode ser determinada através da seguinte equação (Equação 2):

$$\text{Tensão/Cél} = (E_A - E_C) + \eta_A + \eta_C + (RI)_{\text{electr.}} + (RI)_{\text{contatos}} + (RI)_{\text{barras}} \quad (2)$$

Sendo:

$(E_A - E_C)$ - diferença de potencial entre o potencial reversível para a reação redox anódica e potencial reversível para a reação redox catódica;

η_C - Sobretensão para a reação catódica : ~0,067 V

η_A - Sobretensão para a reação anódica : ~0,750 V

$(RI)_{\text{electr.}}$ - Queda de tensão à resistência ôhmica da solução;

$(RI)_{\text{contatos}}$ - Queda de tensão à resistência ôhmica dos contatos elétricos;

$(RI)_{\text{barras}}$ - Queda de tensão à resistência ôhmica das barras;

No presente trabalho do grupo do TOC, foram realizadas ações com foco nos termos da equação referentes às quedas de tensão do eletrólito, dos contatos e das barras.

Através das reuniões diárias, várias iniciativas e projetos de melhoria foram identificados e implementados de forma a potencializar as quedas de tensão, conforme serão detalhadas adiante.

2.2.1 Queda de tensão à resistência ôhmica da solução

As ações realizadas referentes a queda de tensão à resistência ôhmica da solução tem como objetivo aumentar o fluxo de cargas (corrente) num processo de eletrodeposição. Nesse sentido, o grupo focou em duas principais ações:

i) Controle automático de temperatura do eletrólito

Diante das oscilações de temperatura do eletrólito, foi desenvolvido o controle automático de velocidade dos ventiladores das torres de resfriamento pela temperatura de saída da solução da sala de eletrólise. A temperatura estável na faixa de 40,5°C garante uniformidade da densidade da solução (interação dos

elétrons) beneficiando o consumo de energia. Além do controle automático, foi criado um alarme visual (poka-yoke) na tela do supervisor da sala de controle. A figura 1 apresenta o gráfico da temperatura de saída da sala antes e depois da melhoria.

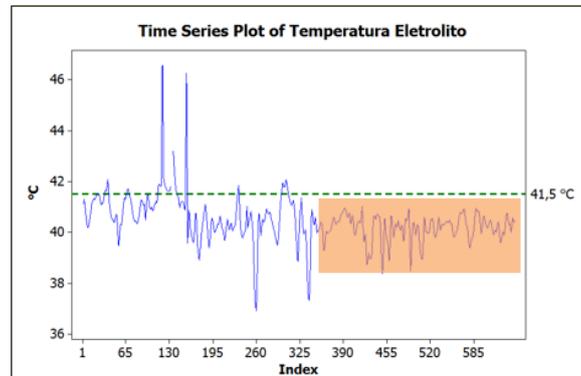


Figura 1. Gráfico de temperatura antes e após o controle automático

ii) Redução do teor de magnésio na solução neutra concentrada

O magnésio apresenta forte influência sobre a resistividade do eletrólito (menor melhor). Sendo assim, foi realizado um trabalho específico nas autoclaves com o foco em melhorar a performance de remoção de magnésio da solução. Houve a redução de aproximadamente 3 gramas de magnésio por litro de solução, conforme apresentado na figura 2.

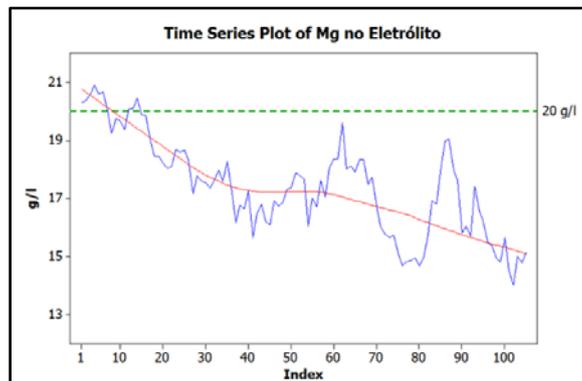


Figura 2. Concentração de Magnésio na Solução Neutra

2.2.2 Queda de tensão à resistência ôhmica dos contatos elétricos

Foram realizadas ações referentes a queda de tensão à resistência ôhmica dos contatos elétricos objetivando melhorar o fluxo de corrente entre os contatos. Nesse sentido, as principais ações do grupo foram:

i) Substituição das Barras Equipotenciais e de Cabeça

Devido ao ataque da solução de sulfato de zinco sobre as barras e o seu tempo de uso, os contatos elétricos entre os eletrodos e a superfície da barra são prejudicados, gerando dissipação de energia por efeito Joule. Além disso, a distribuição de corrente na sala de eletrólise fica desbalanceada. Diante do significativo impacto sobre o consumo de energia, foi padronizada a substituição de 100% das barras (cabeça e equipotenciais) a cada 2 anos. A figura 3 apresenta a condição do contato antes da substituição e a figura 4, a nova barra equipotencial. A

figura 5 apresenta imagem termográfica da Barra de Cabeça antes da substituição e a figura 6 após a troca.



Figura 3. Contatos desgastados Barra Equipotencial



Figura 4. Barra equipotencial nova

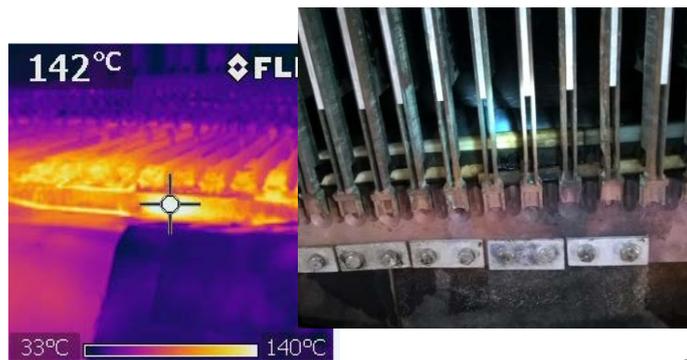


Figura 5. Barra de Cabeça com Aquecimento – Fim de Vida Útil

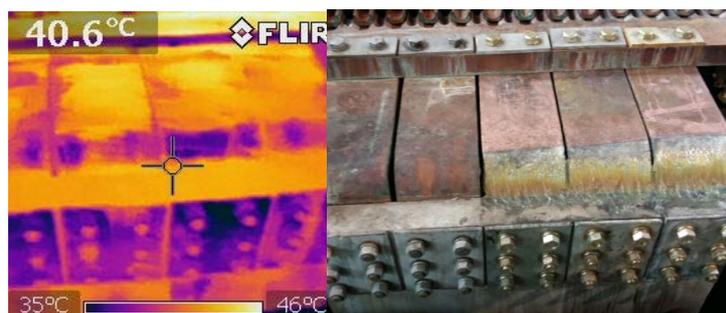


Figura 6. Barra de Cabeça substituída – Temperatura normal de operação

ii) Aumento do ritmo de substituição de Anodos de Chumbo

O processo de eletrolise é composto por dois eletrodos responsáveis pelo fluxo de elétrons, sendo o Anodo (polo positivo) que transfere os elétrons para o Catodo (polo negativo). Figura 7 apresenta o conceito do Anodo e Catodo em eletrolise.

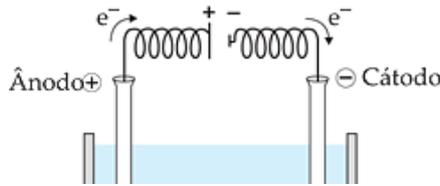


Figura 7. Representação do Anodo e Catodo em Eletrólise

Esse fluxo de corrente em relação ao tempo de utilização desgasta o anodo na região dos contatos de cobre e na “saia de Pb” (XXXXXXXXXXXX) de deposição de bióxido de manganês gerado durante a decomposição do Zn. Atualmente a vida útil dos anodos na planta Nexa Três Marias é de 45 meses, assim, necessita-se da troca rotineira afim de garantir o fluxo perfeito de corrente entre os eletrodos. A figura 8 demonstra cerca de 45% dos anodos acima da vida útil no início do trabalho.

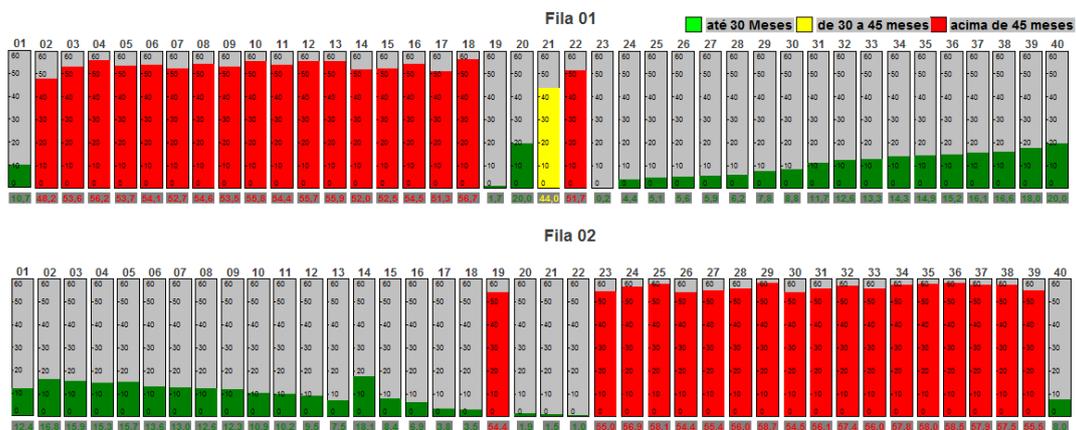


Figura 8. Quadro de Acompanhamento da Vida útil de Anodos na Eletrólise apresenta concentração de anodos sendo utilizados após a vida útil determinada.

A figura 9 apresenta o resultado da evolução na substituição dos anodos, reduzindo de 45% para 18% a quantidade de anodos acima da vida útil sendo utilizados na eletrólise.

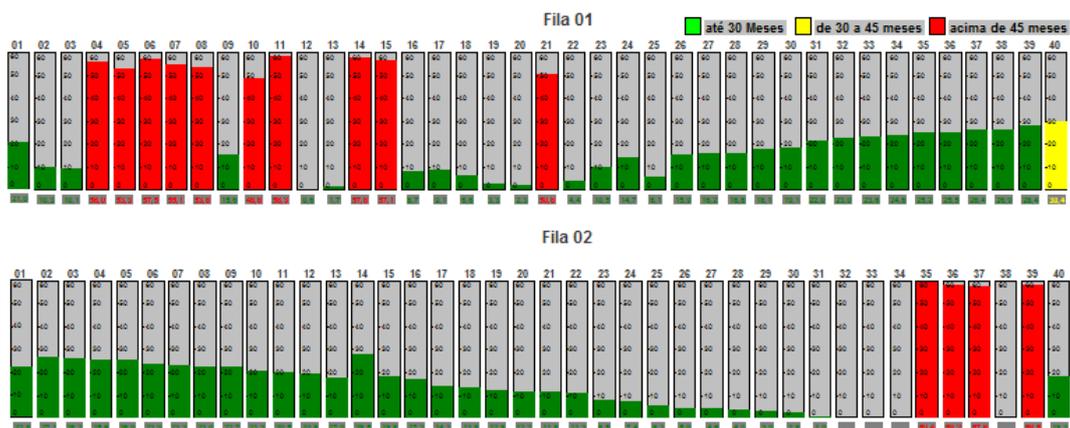


Figura 9. Quadro de Acompanhamento da Vida útil de Anodos na Eletrólise após aumento do ritmo da troca dos eletrodos.

2.2.3 Queda de tensão à resistência ôhmica das barras

A transferência de energia dos transformadores/retificadores de corrente contínua até a Cuba Eletrolítica é realizada através de barramento de alumínio que passam

por galerias, apoiados por suportes e isoladores que visam a menor fuga de corrente possível. Nesse sentido, foram realizadas ações para reduzir a queda de tensão através de intensificação do *housekeeping*. Abaixo as principais ações realizadas.

i) Limpeza dos barramentos das Galerias de Barramentos de Alumínio.

Embora as galerias de barramentos sejam fechadas, pode ocorrer a projeção de material sobre os mesmos devido limpeza nas cubas eletrolíticas e possíveis derramamentos de solução de sulfato de Zn. Quando esse material atinge as barras, gera fugas de corrente por caminhos preferenciais superficiais. As Figuras 10 e 11 apresentam a Galeria de Barramentos antes (Figura 10) e depois (Figura 11) da limpeza.



Figura 10. Imagem de parte da Galeria de Barramentos com concentração de sulfatação gerando caminhos para fuga de corrente.



Figura 11. Imagem de parte da Galeria de Barramentos após limpeza.

ii) Limpeza das Estruturas e Isoladores de barramentos.

A estrutura das cubas eletrolíticas não estão eximes de vazamento e infiltração. Essa condição gera estalactites de sulfato de Zn através dos isoladores de tensão da estrutura civil das cubas oferecendo caminhos preferenciais de fuga de corrente para a massa (terra).As Figuras 12 e 13 apresentam a Estrutura da Sala Civil antes (Figura 12) e depois (Figura 13) da limpeza.



Figura 12. Estrutura Civil da Sala de Cubas Eletrolíticas com sulfatação nos isoladores.



Figura 13. Estrutura Civil da Sala de Cubas Eletrolíticas após limpeza.

Com a limpeza das Galerias e da Sala Civil, pôde-se comprovar, através de medição de Tensão VCC para ponto comum de Aterramento, a queda da tensão conforme Tabela 1, demonstrando a eficácia das ações.

Tabela 1. Medição de Tensão VCC para ponto comum de Aterramento apresentando redução após o processo de limpeza da Estrutura Civil da Sala de Cubas Eletrolíticas.

nexus	Medição de Tensão (Vcc) ET D - 08/12/2017 e 14/12/2017																	
	Fila 1						Central						Fila 2					
	Sustentação Dutos			Sustentação da Sala D									Sustentação Dutos					
	Antes	Depois	Delta	Antes	Depois	Delta	Antes	Depois	Delta	Central	Antes	Depois	Delta	Antes	Depois	Delta	Antes	Depois
Estruturas	Metal		Delta	Civil A	Delta	Civil B	Delta	Central	Civil C	Delta	Civil D	Delta	Antes	Depois	Delta	Antes	Depois	Delta
1	6,70		0,10	0,07		0,50		0,20	0,61	0,55	-0,06	0,68	1,10	0,42	20,60	6,44	-14,16	
2	24,00	24,10	0,10	0,10		0,30		0,10	0,60	1,25	0,65	0,57	1,42	0,85	25,50	23,30	-2,20	
3	2,30		0,10	0,20		0,15		0,10	0,70	1,30	0,60	0,79	0,82	0,03	13,80	7,92	-5,88	
4	33,20	20,80	-12,40	0,20		0,12		0,20	0,84	0,60	-0,24	0,80	0,61	-0,19	23,00	37,70	14,70	
5	41,00	34,70	-6,30	0,13		0,16		0,10	0,40		-0,40	0,70	0,70	0,00	58,00	62,80	4,80	
6	27,00	21,40	-5,60	0,00		0,12		0,00	0,20		-0,20	0,60	0,11	-0,49	12,00	12,40	0,40	
7	28,30	29,20	0,90	0,30		0,15		0,00	0,10		-0,10	0,70	0,87	0,17	22,00	20,78	-1,22	
8	29,00	39,00	10,00	0,40	0,28	-0,12	0,10	0,18	0,30			0,30			21,00	31,70	10,70	
9	29,90	22,90	-7,00	0,35	0,36	0,01	0,20	0,20	0,35			0,52			13,80	6,50	-7,30	
10	2,26			0,18		0,30		0,20	0,56			0,58			20,00	18,60	-1,40	
11	6,00			0,10		0,30		0,12	0,75			0,75			5,00			
12	9,08			0,29		0,27		0,40	0,40			0,40			19,00			
13	15,50			0,27		0,20		0,20	0,20			0,48			5,00			
14	6,40			0,50	0,37	-0,13	0,58	0,16	0,20			0,67			0,90			
15	5,05			0,40	0,32	-0,08	0,48	0,10	0,00			0,60			2,90			
16	4,40			0,33		0,17		0,10	0,10			0,10			8,30			
17	5,10														2,00			
18	3,00																	
			-20,30			-0,32												-1,56

Dado a importância do resultado, foi elaborado um plano de limpeza para as galerias e estruturas afim de garantir a sustentabilidade dessa ação e mitigar as fugas de correntes por caminhos preferenciais.

iii) Desenvolvimento de suporte das barras equipotenciais.

As barras equipotenciais são apoiadas em suporte isolante. Visando melhorar a eficiência de isolamento, foi realizado o desenvolvimento de novo suporte, mais robusto, com melhor encaixe na barra e maior área de apoio sobre as cubas eletrolíticas. Além disso, oferece maior resistência à perfuração dos *paralines* (recobrimento). As Figuras 14 e 15 apresentam os suportes como eram antes (figura 14) e os novos suportes (figura 15).



Figura 14. Suportes anteriores individualizados de fácil remoção e encaixe parcial.



Figura 15. Novo suporte inteiriço.

2.2.4 Substituição de Transformador/Retificador da Eletrólise D

O processo de eletrólise necessita de uma fonte de energia para forçar o fluxo de corrente elétrica (processo não espontâneo). Na eletrólise da NEXA de Três Marias são utilizados transformadores e retificadores que transformam a energia elétrica da rede com frequência alternada para frequência contínua. A figura 16 apresenta o fluxo de fornecimento de energia para a cuba eletrolítica.

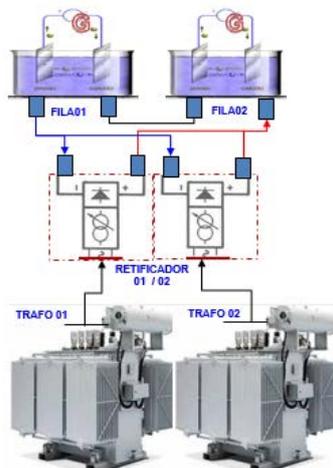


Figura 16. Fluxo de fornecimento de energia com frequência contínua para a Cuba de Eletrólise.

Em 2017 houve a necessidade da substituição de um dos transformadores de fornecimento de energia para a eletrólise. O novo equipamento (reformado) apresentou melhor performance na transformação de energia em relação ao antigo, ou seja, menores perdas internas. Os principais fatores que beneficiaram a redução de perdas foram: substituição da massa cobre dos enrolamentos e a modificação do sistema injeção de Óleo Isolante para resfriamento da Parte Ativa do transformador resultando em menor temperatura dos enrolamentos. O histórico de potência dos transformadores apresenta diferença entre o equipamento D2 em relação ao equipamento D1, após a substituição citada acima, esse delta aumentou, impactando positivamente para o consumo de energia (ver figura 17).

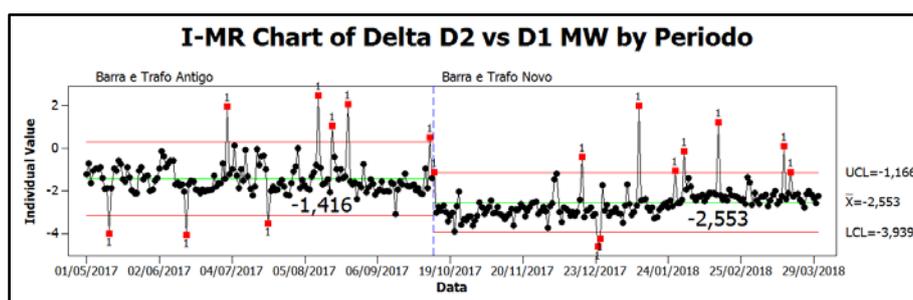


Figura 17. Carta de Controle de comparação do Delta de Potência do Transformador D2 em relação ao transformador D1, período de transformador “Antigo” e “Novo”.

2.2.5 Testes de representação em Escala Piloto

O processo de produção de zinco é composto por diversas variáveis que podem influenciar no consumo de energia. De forma a maximizar os resultados da eletrólise, são realizados testes em escala piloto, como: variação de concentração de elementos da solução de sulfato de Zn, temperatura, densidade de corrente elétrica e etc. Desta forma, definem-se os melhores parâmetros em escala laboratorial antes de serem replicados no processo industrial.

2.3 Resultados

Conforme citado no item 2.2, equação (1), o consumo específico de energia de uma eletrólise pode ser determinado a partir de:

$$\text{Consumo Esp. CC} = \frac{[(\text{Tensão/cél} \times \text{Corrente Aplicada}) \times \text{N}^\circ \text{ Célis}]}{\text{Produção Catodo}} \quad (1)$$

As ações supracitadas neste trabalho foram focadas na redução da Tensão da Sala de Eletrólise, assim, permitindo um menor consumo de energia elétrica por tonelada produzida de Zn. A linha de tendência do gráfico explicitado na Figura 18 demonstra a evolução do indicador de tensão.

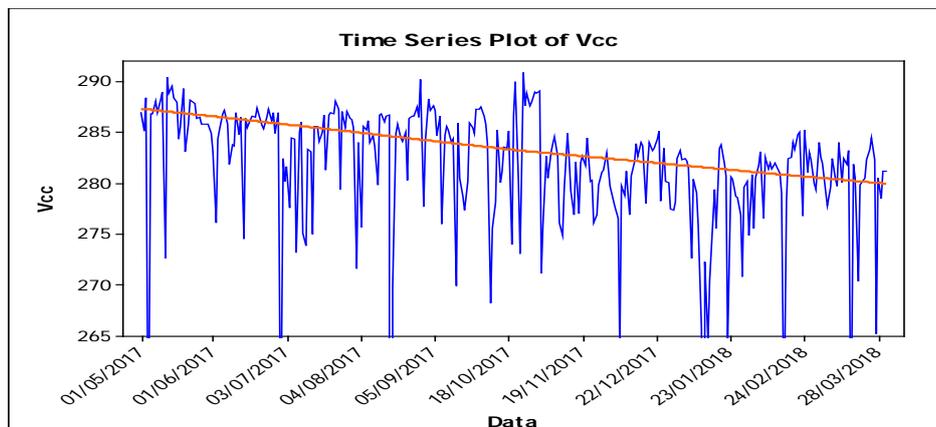


Figura 18. Gráfico de linha com os valores de Tensão VCC da Sala de Eletrólise.

A média da Tensão na Sala de Eletrólise reduziu 3,2 VCC, reflexo das melhorias dos indicadores de resistência do eletrólito, do contato, das barras e da Eficiência da Retificação.

Diante da significativa redução de tensão, houve uma expressiva melhora do KPI Consumo Específico de Energia, conforme evidenciado na Figura 19.

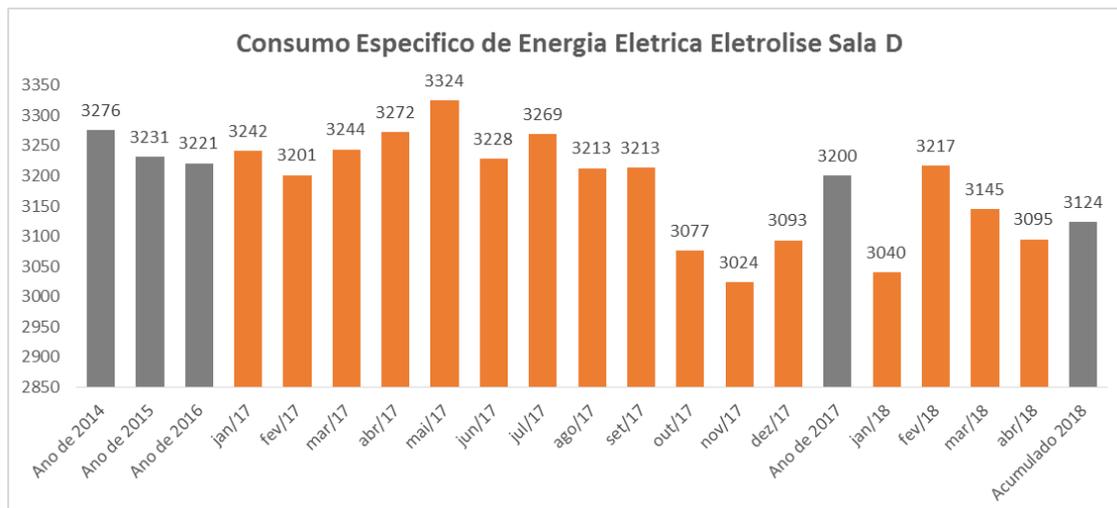


Figura 19. Gráfico Histórico do Consumo Específico de Energia da Sala de Eletrolise D

3 CONCLUSÃO

Diante do trabalho realizado, pode-se concluir que o Consumo Específico de Energia Elétrica em uma Sala de Eletrolise é fortemente influenciado por diversos parâmetros e fatores. A resistência ôhmica dos contatos elétricos e das barras estão diretamente relacionados ao perfeito contato dos condutores de energia da Sala de Eletrolise, através da condição de Barras Equipotenciais e Barras de Cabeça, vida útil dos eletrodos (Anodo). Outro ponto de suma importância é o *Housekeeping* do sistema de distribuição de corrente para eliminar as Estalactites que é a principal forma de gerar Fuga de Corrente. Através da metodologia TOC percebeu-se que o foco da equipe na identificação, planejamento e execução das ações foi um diferencial para o alcance do resultado apresentado nesse trabalho.

REFERÊNCIAS

1. BROOK HUNT. The longterm outlook for zinc, Zinc metal service. [S.l.]: Mining & Metal Consultants, 2009.
2. Umicore. Manual de processo e operação de eletrolise. UM Engineering NR Manual 2102.2-E-700-MBA-9900: p. 01-54. 2001
3. Pereira, Warley JG, et al. Estudo dos Fatores que Influenciam no Consumo de Energia em Eletrolise; 2012; UNIUBE – Universidade de Uberaba
4. Mendes, Tatine O. Influência da Temperatura da Eletrolise de Zinco; 2013; Centro Universidade Sete Lagoas;
5. Taboada, Calos, et al. Implantação da Teoria das Restrições. 2008. [acesso em 16 abril 2018] Disponível em: <https://www.logisticadescomplicada.com/implantacao-teoria-das-restricoes/>