

**Eixo Temático: Inovação e Sustentabilidade**

**O CONTROLE ESTATÍSTICO DE PROCESSO (CEP) E A AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA (ACV) COMO FERRAMENTAS DE GESTÃO AMBIENTAL**

**STATISTICAL PROCESS CONTROL (SPC) AND LIFE CYCLE ASSESSMENT (LCA) AS ENVIRONMENTAL MANAGEMENT TOOLS**

Angelica Peripolli, Marcio Burger Mansilha e Leandro Cantorski da Rosa

**RESUMO**

A avaliação do ciclo de vida serve como auxílio na tomada de decisão para a escolha de processos e produtos, considerando os impactos causados ao meio ambiente. O presente trabalho analisa através de gráficos de controle as emissões de fluoretos na produção global de alumínio primário de 1990 a 2013. Para a realização da pesquisa foi efetuado um levantamento bibliográfico a respeito da avaliação do ciclo de vida (ACV) e do controle estatístico de processos. Foram analisados gráficos de controle estatístico utilizando como referência de metas o Protocolo de Quioto. Os resultados indicam que os processos das tecnologias com anodos Prebake e Soderberg não estão sob controle, mas, melhoram, comprovando a redução das emissões.

**Palavras-chaves:** Avaliação Ciclo de Vida, Controle estatístico de processo, Ferramenta de gestão ambiental.

**ABSTRACT**

The assessment of life cycle serves as an aid in decision making for choosing processes and products considering the impacts to the environment. The present work analyzes through control charts emissions of fluorides in the global production of primary aluminum from 1990 to 2013. For conducting the research a literature review was made regarding the assessment of the life cycle (LCA) and the statistical control processes. Charts were analyzed using statistical control as benchmarks the Kyoto Protocol. The results indicate that the processes of technologies with Soderberg and Prebake anodes are not under control, but improve, confirming the reduction of emissions.

**Keywords:** Life Cycle Assessment, Statistical process control, Environmental management tool.

## 1 INTRODUÇÃO

A avaliação do ciclo de vida consiste numa ferramenta de gestão ambiental para calcular o impacto ambiental dos produtos e/ou dos sistemas durante as diferentes fases do ciclo de vida (CARLEN, 2011). A ACV serve como auxílio na tomada de decisão para a escolha de processos e produtos, considerando os impactos causados ao meio ambiente.

Existe uma conscientização ambiental na escolha dos materiais, observando-se critérios de preservação, recuperação e responsabilidade ambiental. A avaliação do ciclo de vida (ACV) é conhecida internacionalmente por LCA (*Life cycle assessment*), consistindo num instrumento de avaliação do impacto ambiental associado a um produto ou processo que compreende etapas que vão desde a retirada das matérias-primas elementares da natureza que entram no sistema produtivo (berço) à disposição do produto final após o uso (túmulo) (CHEHEBE, 1998). Neste sentido, a pesquisa analisa as emissões de fluoreto como gás que contribui para o efeito estufa, sendo este, um dos principais impactos ambientais.

O trabalho avaliou a utilização do controle estatístico de processos (CEP) através da análise de gráficos de controle de emissões de fluoretos na produção global de alumínio primário de 1990 a 2013.

Utilizou-se como referência para os limites de especificação dos gráficos de controle a redução média prevista no Protocolo de Quioto para controle de gases, em especial do fluoreto, com base em um levantamento com conceitos e definições da avaliação do ciclo de vida, da produção e das tecnologias utilizadas no processo de fundição do alumínio.

Neste sentido, buscou-se a resposta para a seguinte indagação: de que forma pode ser utilizado o controle estatístico de processo e a avaliação do ciclo de vida como ferramentas de gestão ambiental, no controle das emissões de fluoretos na produção global de alumínio primário?

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 Controle estatístico de processo

Um processo é uma transformação de entradas em saídas (produto acabado), devendo o resultado atender às exigências de um cliente, acatando as características de qualidade. Para tanto, o processo deve apresentar estabilidade. O controle estatístico de processo (CEP) tem por objetivo conhecer o processo, monitorando a estabilidade e acompanhando seus parâmetros ao longo do tempo (ROSA, 2009).

O controle estatístico de processo (CEP) é uma poderosa coleção de ferramentas de resolução de problemas, sendo útil na obtenção de estabilidade do processo e na melhoria da capacidade reduzindo-se a variabilidade (MONTGOMERY, 2004).

A estabilidade dos processos é importante, já que, processos instáveis podem resultar em produtos defeituosos, de baixa qualidade, com perda de produção e de perda de confiança do cliente (WERKEMA, 1995).

A identificação e eliminação das fontes de variabilidade permite a produção de produtos com características mais próximas das especificações, contribuindo para a redução de prejuízos decorrentes da produção (OLIVEIRA, 2011).

Segundo Benneyan (2001), os métodos estatísticos são utilizados como importantes recursos para detectar mudanças em vários tipos de processos. Os gráficos estatísticos de controle, desenvolvidos por Walter Shewhart em 1924, são destacados para serem usados em processos químicos e industriais, empregando procedimentos estatísticos para descrever e monitorar melhorias num processo.

O início formal do controle estatístico de processo deu-se por volta de 1924, quando Walter Shewhart desenvolveu e aplicou os gráficos de controle nos Bell Telephone Laboratories, sendo um dispositivo simples de construir e utilizar (COSTA, 2011).

### 2.1.1 Gráfico de controle

Os gráficos ou cartas de controle são usados para salientar a ocorrência de causas especiais, de modo que possam ser eliminadas. Estas causas são a fonte que acarretam variabilidade nas medidas e que não podem ser devidamente explicadas por uma distribuição, como seria se o processo estivesse sob controle estatístico. Existem dois tipos de gráfico de controle: para variáveis e para atributos, sendo que, sua finalidade principal é monitorar o processo, verificando se ele sob o controle estatístico e indicar sua faixa de variação (HENNING, 2014).

Os principais indicativos da presença de causas especiais num processo são: os pontos fora dos limites de controle, um deslocamento, ou seja, uma mudança de nível indica que o processo se deslocou em relação àquela característica que está sendo avaliada; a tendência, ou seja, um aumento ou queda gradual no nível dos pontos no gráfico indicam que o processo está se alterando e, os ciclos, que são padrões consistentes de pontos de altos e baixos que se repetem periodicamente. Há também causas comuns, que se referem às muitas fontes de variação que estão atuando em um processo que está sob controle estatístico e são causas inevitáveis inerentes ao processo.

O uso dos gráficos de controle é uma ferramenta benéfica, trazendo melhorias e garantia da qualidade, redução de custos, crescente desaparecimento de refugo e resolução de diversos problemas da produção relacionados com especificações, métodos, etc. (ROSA, 2009).

Vários tipos de gráficos de controle já foram desenvolvidos e aperfeiçoados, mas todos precisam definir parâmetros, como: tamanho da amostra, centralização e limites de controle (GAUTÉRIO, 2014).

Quando a variável a ser avaliada é contínua ou mensurável, o usual é monitorar o processo por um par de gráficos de controle: uma para monitorar a centralidade e outro para monitorar a dispersão da variável. Para o presente estudo utilizou-se o gráfico para valores individuais e amplitude móvel. Este pode ser usado na avaliação da produção de pequenos lotes, processos em que medidas individuais são necessárias ou, ainda, quando as observações da característica de qualidade não são independentes.

## 2.2 Avaliação do ciclo de vida

Considera todo o ciclo de vida da geração da energia (planejamento, construção, desativação das instalações de usina, extração, processamento e utilização da matéria-prima, etc.). A emissão de gases de efeito estufa (GEE), que ocorre nas fases do ciclo de vida anterior e posterior à geração de energia pode corresponder a 90% das emissões do ciclo total (WEISSER, 2007).

Diferentes gases contribuem para o efeito estufa, pelo levantamento das Nações Unidas pode-se citar: dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) metano ( $\text{CH}_4$ ), óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ), hidrofluorcarbonos (HFC), perfluorcarbonos (PFC) e hexafluoreto de enxofre ( $\text{SF}_6$ ) (UNFCCC, 1998).

De acordo com o Intergovernamental Painel Clima Change (IPCC), a influência humana no sistema climático é clara. Foram identificadas cinco razões preocupantes que implicam no aquecimento global: sistemas únicos e ameaçados, eventos climáticos extremos, distribuição dos impactos, impactos globais agregados e eventos singulares de grande escala (IPCC, 2014).

Com vistas a reduzir a emissão de gases causadores e que contribuem para o efeito estufa, ao longo dos anos, realizou-se diversas discussões, fóruns e reuniões contemplando diversos países. Em 1997 foi firmado o Protocolo de Quioto trazendo compromissos reais e estabelecendo reduções de emissões de GEE entre os países incluídos neste protocolo. O objetivo principal do Protocolo de Quioto foi o de estabelecer metas concretas de redução de emissão de gases causadores do efeito estufa. Entre os objetivos estabelecidos está o de redução de gases de efeito estufa em 40 países desenvolvidos e em transição para economias de mercado, chegando a uma média de 5,2% abaixo das emissões de 1990. O período de compromisso ocorreu entre os anos de 2008 a 2012 (UNFCCC, 1998).

### 2.2.1 Produção de alumínio

O alumínio não é encontrado diretamente em estado metálico. A mineração da bauxita deve apresentar no mínimo 30% de óxido de alumínio (alumina) para que seja viável economicamente. É encontrada principalmente na Austrália, América Latina e África. Depois de extraída, segue para etapas de refinaria e redução. A redução da alumina calcinada é realizada em cubas eletrolíticas em altas temperaturas no processo conhecido como Hall-Héroult (ABAL, 2014).

O alumínio primário é produzido em três estágios – no primeiro, o minério de bauxita é extraído, depois é refinado em óxido de alumínio, ou alumina, e finalmente é fundido em lingotes de alumínio, utilizando grandes quantidades de eletricidade. A produção de alumínio compreende diversas reações químicas:

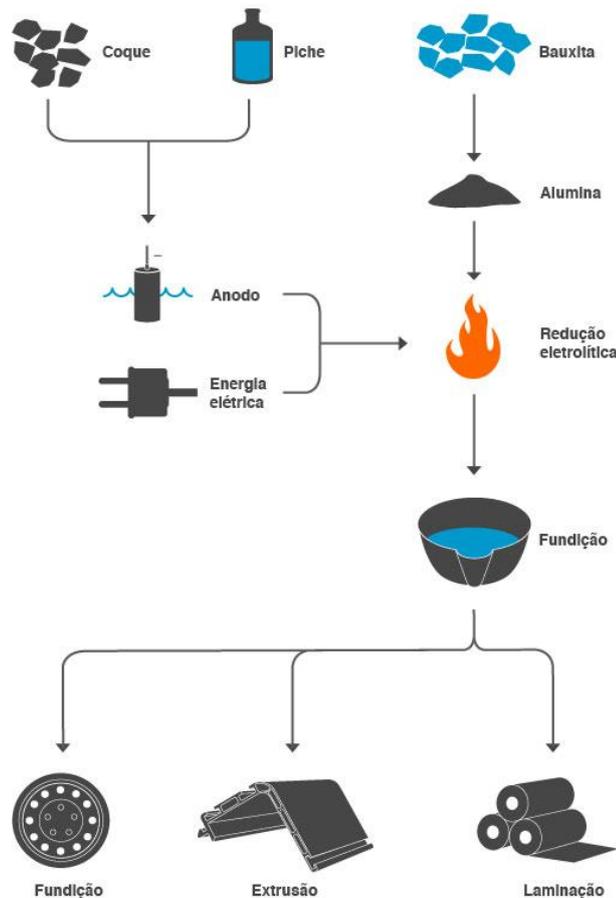


Figura 1 – Produção de Alumínio - Fonte: Norsk Hydro ASA, 2014

### 2.2.1.2 Emissões de fluoreto

O processamento do alumínio primário é a fase mais poluente da cadeia de produção do alumínio, resultando em emissões atmosféricas, entre elas de fluoretos. No processo de fundição do alumínio, o principal componente indesejável nos fumos, são os fluoretos. Entre os desafios ambientais associados à produção do alumínio primário está a redução da emissão de fluoretos.

Há dois tipos de anodos que podem ser utilizados no processo de redução: uma pasta de anodo Soderberg e um anodo Prebake (SWITKES, 2005).

A tecnologia Soderberg utiliza um anodo contínuo, que é colocado em um pote sob a forma de uma pasta, e que cozinha na própria célula (WORLD ALUMINIUM, 2014).

Fluxograma do processo de produção de alumínio com cubas com anodos com a tecnologia Soderberg:



Figura 2 - Fluxograma do processo de produção de alumínio com cubas com anodos com a tecnologia Soderberg - Fonte: MMA, 2010

O anodo Soderberg produz gases residuais, incluindo o fluoreto, que são mais difíceis de serem coletados. O fluoreto acumula-se no meio ambiente, afetando florestas, o pasto, a criação de animais e a vida selvagem (SWITKES, 2005).

A outra tecnologia Prebake (pré-cozido) utiliza vários anodos em cada célula, que são cozidos numa instalação separada e ligados a hastes que suspendem os anodos na célula (WORLD ALUMINIUM, 2014):

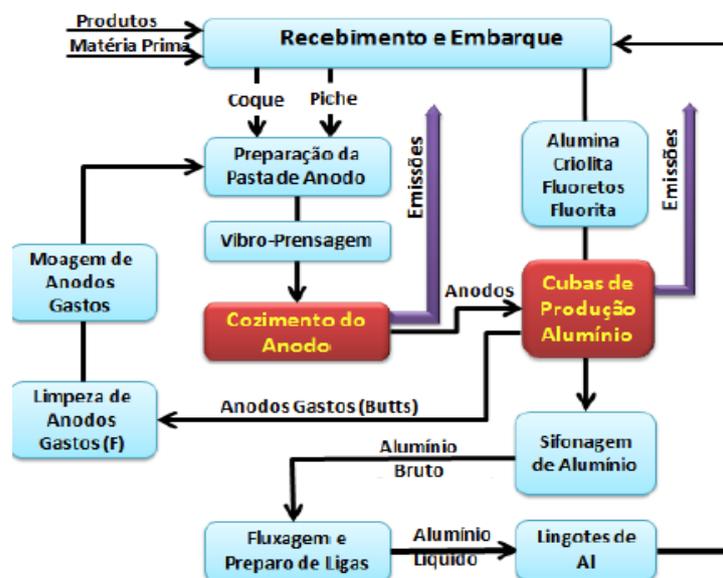


Figura 3 - Fluxograma do processo de produção de alumínio com cubas com anodos com a tecnologia Prebake - Fonte: MMA, 2010

A eficiência desta tecnologia em comparação com a Soderberg, combinado com o seu menor impacto ambiental, significa que as fundições Prebake predominam (representando mais de 90% da produção de alumínio em todo o mundo), com todas as novas instalações construídas hoje que utilizam esta tecnologia.

A diferença fundamental entre as tecnologias de cubas com anodos Prebake e Soderberg consiste na utilização de um bloco de carbono pré-cozido como anodo, em lugar da pasta anódica que é cozida gradualmente ao longo do processo de redução, no caso da tecnologia Soderberg (MMA, 2010).

### 3 METODOLOGIA

Considerando o método de procedimento de pesquisa, o trabalho emprega o estudo de caso, definido como uma pesquisa sobre um indivíduo específico, com foco nas características mais relevantes para o tema que se está pesquisando. Desta forma, o estudo de caso é adequado à necessidade de análise e caracterização da utilizado do controle estatístico de processo e avaliação do ciclo de vida como ferramentas de gestão ambiental.

Os dados das emissões de fluoretos (kg F/t Al) foram extraídos de relatórios disponíveis no International Aluminium Institute (IAI). O banco de dados foi elaborado em planilha eletrônica (Microsoft Excel) e, posteriormente, foi exportado para o *software* Statistica 9.1, para a elaboração dos gráficos de controle para valores individuais e para a amplitude. Foram calculados os limites de especificação para as duas tecnologias, Prebake e Soderberg, baseado no protocolo de Quioto, onde define-se redução média de 5,2% abaixo das emissões de 1990.

### 4 RESULTADOS

Inicialmente foi construído um gráfico de controle X e R, para medidas individuais ( $n = 1$ ), para as tecnologias Prebake e Soderberg.

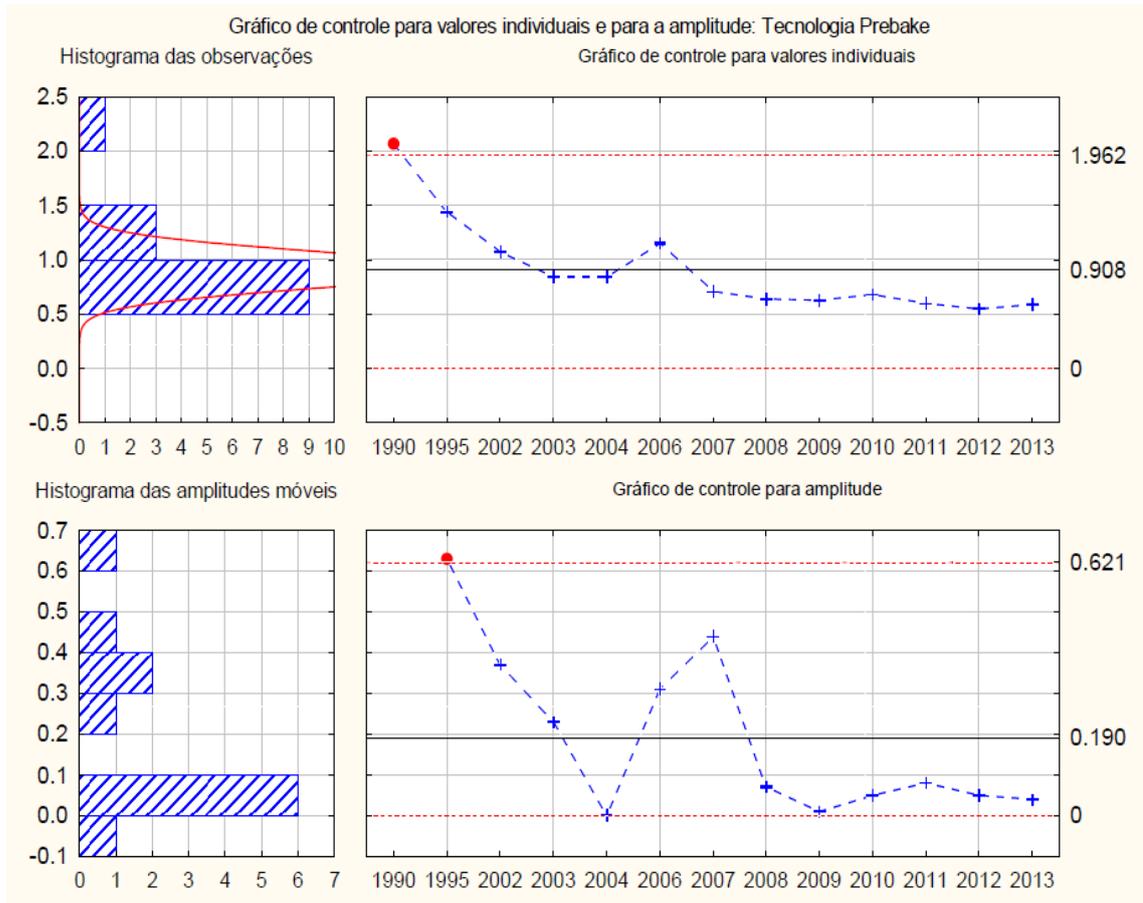


Figura 4: Gráfico de controle para valores individuais e para a amplitude: Tecnologia Prebake

Nota-se por meio da Figura 4 que o gráfico de controle para valores individuais e para a amplitude para a tecnologia Prebake não está sob controle. Esta situação é indicada pelos gráficos, que apresentam um ponto fora dos limites de especificação, no ano de 1990 no primeiro gráfico e em 1995 no segundo gráfico. Observa-se também uma sequência de sete pontos abaixo da linha central ( $LC=0,908$ ) para o gráfico dos valores individuais. Há o indicativo de tendência para este mesmo gráfico, pois há sete pontos, referentes aos anos de 2007 a 2013, na direção inferior.

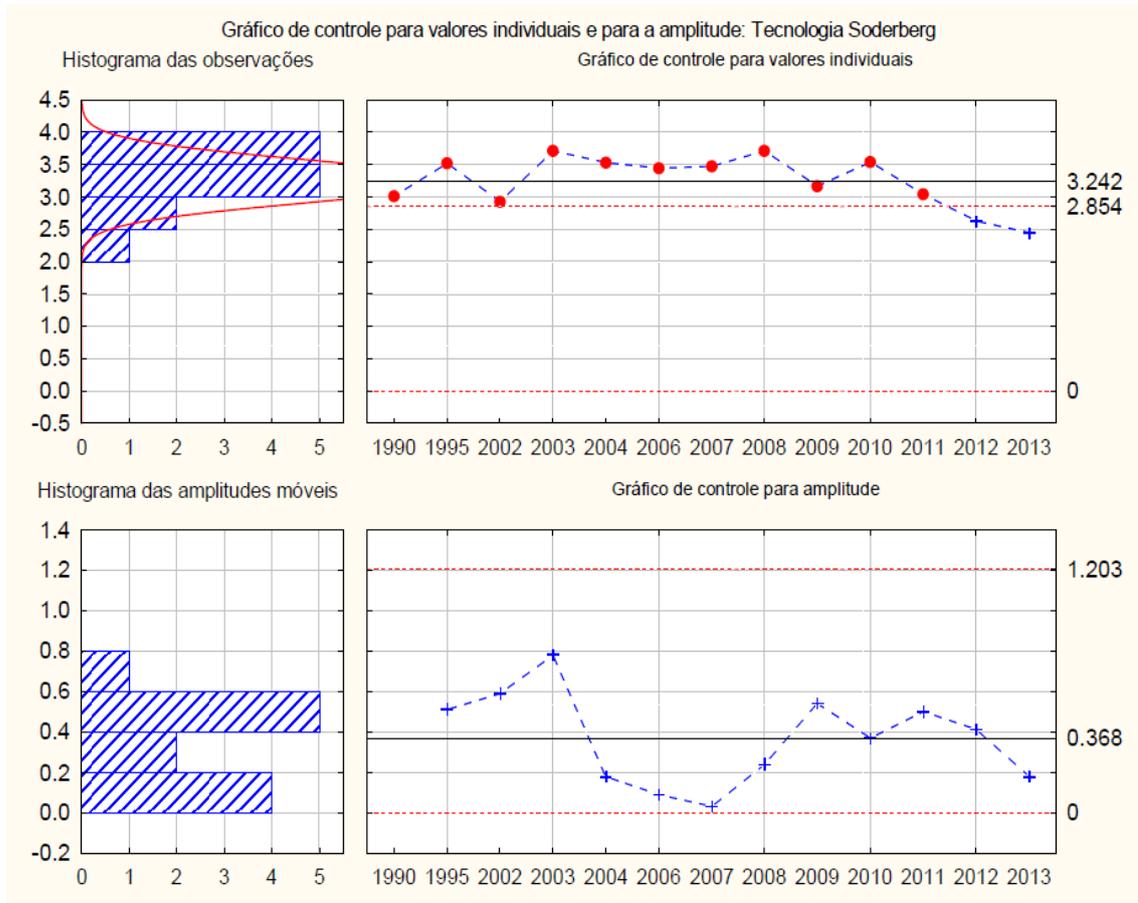


Figura 5: Gráfico de controle para valores individuais e para a amplitude: Tecnologia Soderberg

A análise do gráfico para valores individuais da Figura 5 revela que ocorreram causas especiais de variação em muitos pontos, denotando que o processo para a tecnologia Soderberg está fora de controle. Observa-se no gráfico da amplitude móvel que os pontos começam a ser plotados a partir do ano de 1995. Isso ocorre, pois uma vez que são necessários dois valores para que seja possível obter uma variação móvel, somente a partir do ano de 1995 é plausível identificar a variação em relação ao ano de 1990. Essa característica também pode ser observada no gráfico de controle para amplitude da tecnologia Prebake e no gráfico de controle para amplitude da tecnologia Prebake + Soderberg.

Agregando os dados das duas tecnologias, encontrou-se o gráfico de controle X e R da Figura 6.

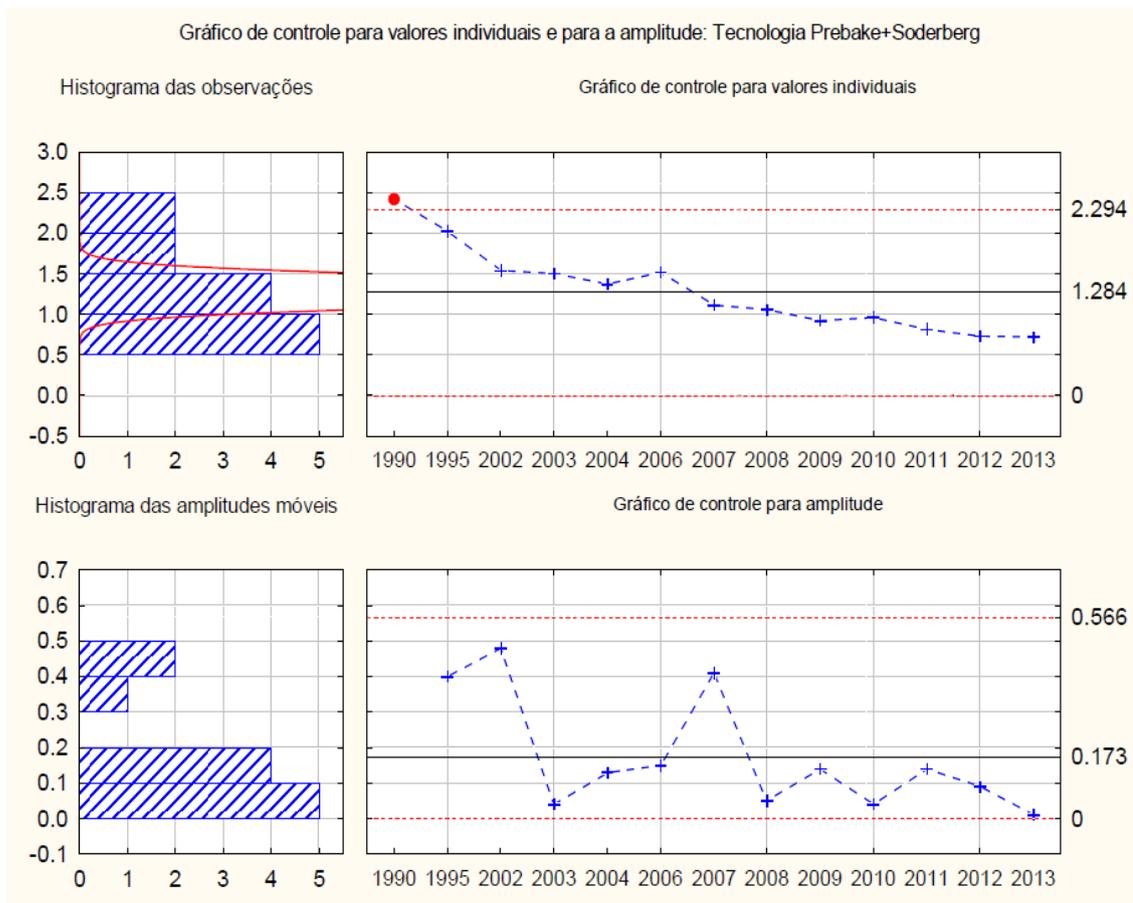


Figura 6: Gráfico de controle para valores individuais e para a amplitude: Tecnologia Prebake + Soderberg

Analisando a Figura 6, observa-se que o gráfico para valores individuais e para a amplitude para a tecnologia Prebake + Soderberg está fora de controle, pois há um ponto fora do limite de especificação ( $LSE=2,294$ ) referente ao ano de 1990. Há uma sequência de sete pontos abaixo da linha central ( $LC=1,284$ ) para o gráfico dos valores individuais para o período de 2007 a 2013, indicando uma tendência na direção inferior para este mesmo gráfico, situação que acarreta um processo fora de controle.

Neste estudo não foram utilizados os índices de capacidade, pois é necessário que o processo esteja sob controle estatístico e a variável de interesse tenha distribuição próxima da normal. O cálculo da capacidade de processo pode ser feito através da determinação de dois índices: o de capacidade potencial e o de performance, proposto por Kane (1986). A capacidade potencial, expressa pelo índice  $C_p$ , serve para medir a capacidade do processo de atender às especificações, se o mesmo estiver ajustado ou controlado, enquanto que o índice de performance,  $C_{pk}$  considera se um processo com certa média e dispersão atende às especificações (WERKEMA, 1995).

## 5 CONCLUSÕES

Perante os resultados das análises conclui-se que os processos das tecnologias de cubas com anodos Prebake e Soderberg não estão sob controle.

Embora os gráficos dos valores individuais para a tecnologia Prebake e tecnologia Prebake + Soderberg não estarem sob controle, estes apresentam um tendência decrescente nos anos de 2007 a 2013, o que é positivo, pois indica uma redução nas emissões de fluoretos.

Apesar de não serem alternativas imediatas de redução de emissão, os incentivos à pesquisa e desenvolvimento nessas áreas devem ser feitos para garantir que as tecnologias Prebake e Soderberg sejam mais viáveis no futuro. Várias fábricas desenvolveram procedimentos operacionais para controlar as emissões. Estes procedimentos incluem limites ao número de cubas que podem ser abertas a qualquer momento, inspeções periódicas dos sistemas de captação de emissões e substituição ou reparo dos dispositivos de coleta.

Pela pesquisa realizada é possível indicar que a utilização de métodos de controle estatísticos de processos e a avaliação do ciclo de vida como ferramentas de gestão ambiental é útil no monitoramento das emissões de fluoretos na produção global de alumínio primário.

A utilização dos gráficos EWMA e CUSUM talvez possa se mostrar mais eficiente para detectar pequenos desvios e, em tempo real, emitir sinais de alerta precoce mais rapidamente que os demais. Os gráficos para valores individuais e para a amplitude propiciam uma implementação mais simples, mas são ineficientes para detectar pequenos desvios e insensíveis para emitir sinal de alerta preventivo.

## 6 REFERÊNCIAS

ABAL. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO. São Paulo. 2014. Disponível em: <<http://www.abal.org.br/>>. Acesso em: 19 de abr. 2014.

BENNEYAN, J.C. **Number-between g-type statistical quality control charts for monitoring adverse events**. Health Care Management Science, v.4, p.305-318, 2001.

CARLEN, M; et. Al. **Life cycle assessment of dry-type and oil-immersed distribution transformers with amorphous metal core**. In: INTERNACIONAL CONFERENCE ON ELECTRICITY DISTRIBUTION, 21, Junho 2011, paper 1145. Frankfurt. **Anais CIRED**. Disponível em: <[http://www.cired.net/publications/cired2011/part1/papers/CIRED2011\\_1145\\_final.pdf](http://www.cired.net/publications/cired2011/part1/papers/CIRED2011_1145_final.pdf)>. Acesso em: 18 abr. 2014.

CHEHEBE, J. R. B. **Análise do ciclo de vida de produtos: ferramenta gerencial da ISO 14000**. Rio de Janeiro: QualityMark, 1998. 104 p.

COSTA, A. F. B.; EPPRECHT, E. K.; CARPINETTI, L. C. R. **Controle estatístico de qualidade**. 2. ed. São Paulo: Atlas, 2011.

GAUTÉRIO, E.G; MATTOS, V. L.D. **Utilização de controle estatístico de processo na avaliação de desempenho acadêmico**. Revista Produção Online, Florianópolis, v. 14, n. 2, p. 744-763, abr./jun.2014. Disponível em:<<http://producaoonline.org.br/rpo/article/view/1592/1156>>. Acesso em: 03 mar. 2015.

INTERGOVERNAMENTAL PAINEL CLIMA CHANGE (IPCC). **Impacts, adaptation, and a vulnerability**. Disponível em: <<http://www.ipcc.ch>>. Acesso em: 15 nov. 2014.

HENNING, E.; et.al. Um estudo para aplicação de gráficos de controle estatístico de processo em indicadores de qualidade de água potável. **Sistema e Gestão** v. 9, n.1, 2014, p. 2-13. Disponível

em:<<http://www.revistasg.uff.br/index.php/sg/article/view/V9N1A1/SGV9N1A1>>. Acesso em: 05 mar. 2015.

KANE, V.E. Process capability indices. **Journal of Quality Technology**, v.18, p.41-52, 1986.

MINISTERIO DO MEIO AMBIENTE. **Proposta de Limites de emissões atmosféricas de fonte fixas, para fábricas existentes, da indústria brasileira de alumínio primário**. 2010. Disponível em: <[http://www.mma.gov.br/port/conama/processos/BC1C2A2A/PropPadrEmisFontesFixasALUMINIO\\_23e24set10.pdf](http://www.mma.gov.br/port/conama/processos/BC1C2A2A/PropPadrEmisFontesFixasALUMINIO_23e24set10.pdf)>. Acesso em: 15 nov. 2014.

MONTGOMERY, D. C. **Introdução ao controle estatístico da qualidade**. Rio de Janeiro: LTC, 2009

Norsk Hydro ASA Disponível em: <http://www.hydro.com/pt/A-Hydro-no-Brasil/Sobre-o-aluminio/Ciclo-de-vida-do-aluminio/Da-alumina-ao-aluminio/> Acesso em: 15 nov. 2014.

OLIVEIRA, C.C; et. al. Utilização do controle estatístico do processo (CEP) para monitoramento da graduação alcoólica (°INPM) na produção de álcool. **Revista Brasileira de Tecnologia Agroindustrial**, v. 5, n.1, p. 293-305, 2011. Disponível em: <<https://periodicos.utfpr.edu.br/rbta/article/view/659/686>>. Acesso em: 04 mar. 2015.

ROSA, L. C. da. **Introdução ao controle estatístico de processos**. Santa Maria: Ed. da UFSM, 2009.

SWITKES, G. R. **Impactos ambientais e sociais da cadeia produtiva de Alumínio na Amazônia – ferramentas para os trabalhadores, as comunidades e os ativistas**. Disponível em: <[http://www.internationalrivers.org/files/attached-files/foiling2005\\_po.pdf](http://www.internationalrivers.org/files/attached-files/foiling2005_po.pdf)>. Acesso em: 15 nov. 2014.

THE INTERNATIONAL ALUMINIUM INSTITUTE. 2014. Disponível em: <<http://www.world-aluminium.org>>. Acesso em: 26 set. 2014.

UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE (UNFCCC). **Protocolo de Kyoto de La Convención marco de Las Naciones Unidas sobre el cambio climático**. Disponível em: < <http://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpspan.pdf>>. Acesso em: 15 nov. 2014.

WEISSER, D. **A guide to life-cycle greenhouse gases (GHG) emissions from electric supply technologies**. **Energy**, v. 32, p. 1543-1559, 2007.

WERKEMA, M.C.C. **Ferramentas estatísticas básicas para o gerenciamento de processos**. Fundação Christiano Ottoni. Minas Gerais, v.2, 1995. 384p.