

Otimização para Competitividade no Setor Eletroeletrônico

Janaina Gameiro

Analista da Gestão da Qualidade e Gestão Ambiental – Siemens e Doutoranda na Escola Politécnica de Engenharia Elétrica/USP

Maria Lúcia Pereira da Silva

Pesquisadora da Escola Politécnica de Engenharia Elétrica/USP

Elisabeth de Oliveira

Professora do Instituto de Química/USP

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	3
2. OBJETIVOS	4
3. METODOLOGIA	4
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	5
5. CONCLUSÕES	13

RESUMO

O setor eletroeletrônico tem como base a área de Microeletrônica onde, muito embora a produção de resíduos venha diminuindo sensivelmente, ainda se encontram problemas ambientais significativos, tais como alto consumo de água e reagentes, provenientes do aumento do número de banhos de lavagem em decorrência do estrito controle de contaminação, além da geração de grande volume de resíduos líquidos. Portanto, um programa que proponha alternativas de otimização do consumo de insumos e minimização da geração de resíduos através da caracterização da área de Microeletrônica deve apresentar grandes vantagens aumentando a competitividade em todo o setor.

A ferramenta de avaliação ambiental adotada fez uso do manual de prevenção de poluição da CETESB, onde se delimitam as seguintes etapas: visita técnica de caracterização; levantamento de opções de prevenção; testes em laboratório e escala piloto, implantação das opções de prevenção; e visita de manutenção do programa. Além disso, fez-se uso da filosofia dos três R's, isto é, reduzir, reusar e reciclar como ferramenta de apoio no levantamento das opções de prevenção de poluição. A avaliação ambiental não normalizada apresenta grandes vantagens, uma vez que atua como ferramenta na implantação de sistema de gestão ISO 14000.

Observou-se que no estado de São Paulo, quanto maior a complexidade tecnológica, maior a resistência à mudanças e para empresas de menor porte, é possível diminuir tanto o consumo de insumos como a geração de resíduos. O insumo de maior impacto, tanto ambiental como economicamente, é a água. Para este insumo economias de até 60% podem ser conseguidas com práticas simples. Ainda, é possível o desenvolvimento de um ciclo fechado de água, tornando a empresa próxima da emissão zero. Para os resíduos, incluindo-se aqui água residuária, a melhor opção é a formação de parcerias, representando um sistema de gestão ambiental a base de associações. Portanto, há margem para ganhos ambientais e econômicos na área de base do setor de eletroeletrônico, o que significa forte impacto em toda cadeia.

PALAVRAS-CHAVE

Gestão de resíduos, reuso e reciclagem de água, emissão zero, avaliação ambiental

1. INTRODUÇÃO

A área de Microeletrônica é reconhecidamente de baixa emissão de resíduos. Essa baixa emissão decorre, em grande parte, dos processos tecnológicos necessários à alta integração dos dispositivos, conhecidos com processamento a seco, que não necessitam de solventes. Todo o setor enfatiza a implantação de sistemas de gestão ambiental e/ou programas que auxiliem na obtenção da produção sustentável. Desse modo, a área apresenta significativa colaboração ao desenvolvimento de tecnologias mais limpas, o que resultou em melhor ambiente de trabalho nos USA, onde a Microeletrônica apresenta índice de acidentes de trabalho três vezes menor que a média nacional [1].

Por outro lado, muitos processos ainda apresentam alto impacto ambiental, especialmente no que concerne ao consumo de água. A produção de uma lâmina de silício de seis polegadas requer 2.275 galões de água deionizada e produz 2.840 galões de água residuária, que não sofre qualquer tipo de reaproveitamento [2,3].

A produção de circuitos integrados (CI's) significa o uso de mais de quarenta etapas, a maioria destas adiciona ou remove uma fina camada de material sobre a superfície de uma lâmina de silício. Muitas destas etapas podem ocorrer tanto por via úmida quanto seca [4]. Os processos em questão apresentam particularidades, como segue:

- Limpeza da lâmina: Etapa fundamental para que a qualidade do dispositivo seja mantida pode ocorrer ou não por processamento a seco. Os processos úmidos utilizam soluções aquosas, normalmente fortemente ácidas ou básicas, e água deionizada (DI). Neste caso o consumo de água corresponde a 80% do consumo total da água DI [5]. Os processos secos fazem uso de reagentes gasosos e são de baixo impacto ambiental.
- Oxidação: Forma filmes de óxido de silício na superfície da lâmina. Este processo é realizado em fornos de alta temperatura na presença de oxigênio ou água DI e não produz resíduos.
- Deposição química por fase de vapor (CVD) e Deposição física por fase de vapor (PVD): Esse processo permite a deposição de filmes finos e é realizado a partir de reagentes gasosos [6]. A formação de resíduos é baixa, para PVD pode haver formação de partículas de metais pesados e para CVD o uso de organo-metálicos também pode ser um problema [7]
- Litografia: Corresponde ao processo de transferência de imagem para a lâmina, que resulta na formação de padrões na superfície dos filmes. Nesse processo há o consumo de água DI para fabricação de soluções e/ou limpeza das lâminas entre estas soluções [8].
- Corrosão: Esse processo é utilizado para remover áreas selecionadas da lâmina. Quando a corrosão é a seco há baixa formação de resíduos [22], sendo a emissão de compostos fluorados o problema ambiental mais severo [7]. A corrosão úmida produz efluentes semelhantes aos da etapa de limpeza.
- Dopagem: É o processo de introdução de um dopante no filme. Os dopantes podem apresentar arsênio, mas sua emissão é muito baixa, devido ao processo de fabricação [8].
- Metalização: É o processo de deposição de padrões de material condutivo na lâmina, para promover a conexão dos CI's [8]. O reagente mais comumente utilizado é o alumínio.

Por fim, deve-se lembrar que a geração de resíduos também advém de erros de fabricação e/ou rendimento do processo. Esse erros em geral são observados apenas nas etapas finais de fabricação dos dispositivos, o que gera pedaços de silício muito puro, com a superfície coberta por metais, especialmente alumínio, ou mesmo CI's totalmente confeccionados e encapsulados.

O impacto ambiental do uso de água, por ser um dos mais significativos, vem recebendo atenção contínua, tanto em estudos acadêmicos quanto em desenvolvimento na área produtiva. O uso da água aumentou porque, com a diminuição do tamanho dos dispositivos, o problema de contaminação se acentuou e como consequência, o número de etapas de lavagem, nos métodos úmidos de limpeza, cresceu expressivamente.

O problema do crescente consumo de água vem sendo abordado essencialmente de três modos distintos: desenvolvimento de novas tecnologias de limpeza e corrosão, que consomem menos reagentes e água DI [4,9,10]; processo com uma única lâmina [11] que minimiza o consumo de água e reagentes em 10 à 20 vezes, quando comparado ao sistema convencional [12]; desenvolvimento de processos a seco, que apresentam vantagens financeiras e ambientais, [13,14,15].

Outros resíduos advindos da produção também estão sendo considerados, mas na maioria das vezes o objeto é um descarte mais eficiente, não uma diminuição na fonte da geração de resíduos. Assim, um programa de gestão que aborde a minimização do uso e geração de resíduos é de suma importância para a alocação desse setor como benchmarking também na área ambiental, assim como este já é conhecido pelo estrito controle de pureza e qualidade de processo.

2. OBJETIVOS

Este trabalho teve como objetivo caracterizar a área de Microeletrônica, que é formada por empresas envolvidas diretamente na produção e encapsulamento de CI's, para propor alternativas de otimização do consumo de insumos e minimização da geração de resíduos através do desenvolvimento de um sistema de gestão que proponha faça uso da associação de diferentes segmentos industriais para viabilizar a simbiose industrial. No país há três empresas de Microeletrônica, localizadas próximas à cidade de São Paulo, e nesse trabalho estas empresas foram analisadas quanto aos seus resíduos e emissões (gasosos, líquidos e sólidos) para avaliar a possibilidade de se obter a situação de resíduo zero.

3. METODOLOGIA

As ferramentas adotadas foram a avaliação ambiental, para caracterização das empresas e a metodologia dos três R's, para otimização dos processos.

A avaliação ambiental foi efetuada utilizando-se do manual de prevenção de poluição da CETESB [16], onde se delimitam as seguintes etapas: a) Visita prévia à empresa, para estabelecer o início dos trabalhos; b) Caracterização da empresa, onde são reunidas informações sobre os processos industriais, tais como fluxogramas, vazões, etc.; c) Levantamento de P2, que nesse caso considerou todo e qualquer processo de fabricação, dentro da empresa, e também classificou-se essas opções segundo sua relevância econômica, ambiental e de consumo; d) Testes de P2 em laboratório; e) Testes de P2 em escala piloto, quando possível; f) Apresentação de relatório, contendo os resultados dos testes, para a gerência da empresa, para futuras discussões e análise de implementação; g) Implementação das P2, efetuada por algumas empresas; h) Visita de avaliação e manutenção do programa, para verificar os ganhos ocorridos, do ponto de vista ambiental e econômico, pela implantação das opções de prevenção, i) Treinamento, para apresentação dos trabalhos desenvolvidos e conscientização dos funcionários da importância do aprimoramento contínuo.

Para os testes laboratoriais, amostras de água, de soluções aquosas e de reagentes foram trazidas das empresas, ou obtidas de modo similar ao processo de produção da

empresa. Utilizaram-se lâminas de silício <100> 10-20 Ω .cm. Os reagentes usados são grau semicondutor, quando processos com lâminas de silício estão envolvidos, ou grau pa, para processos galvânicos.

Para testes em escala pilotos, utilizaram-se as próprias instalações da empresa, para evitar dificuldades de adaptação de mudança dos procedimentos.

As principais análises processadas foram: ICP-AES (Ion Coupled Plasma-Atomic Emission Spectroscopy), para determinar metais presentes na água e microscopia óptica e Raman, para verificar as condições físico-químicas da superfície das amostras.

4. RESULTADOS

4.1. CARACTERIZAÇÃO PRÉVIA DAS EMPRESAS

As três empresas foram caracterizadas quanto a resíduos e emissões, e apresentam as seguintes características:

- Nenhuma das empresas estudadas apresenta qualquer tipo de sistema de gestão ambiental.
- Duas das três empresas possuem menor necessidade de controle de contaminação, pois trabalham na fabricação de CI's de menor complexidade.
- A empresa com maior complexidade tecnológica apresenta poucas etapas de processo, apenas duas, ambas muito dependente da utilização de água. No primeiro processo a lâmina de silício, já processada, é cortada para separação dos CI's. No segundo processo esses CI's são encapsulados e para tanto seus contatos são soldados ao encapsulamento.
- As empresas de menor complexidade tecnológica apresentam uma grande quantidade de processos, pois recebem a lâmina de silício virgem e a processam até o encapsulamento. A maioria desses processos apresenta alto consumo de água DI.
- Todas as empresas estão próximas a uma empresa galvânica e aquelas de menor complexidade tecnológica utilizam tal galvânica para preparação do encapsulamento.

Quanto a outras características relevantes:

- A empresa de maior complexidade tecnológica
- As duas empresas de menor complexidade tecnológica:
 - A primeira empresa não adota nenhum tipo de sistema de gerenciamento ambiental, apesar de existir grande interesse na implementação de um programa de prevenção de poluição. Para a água, 50% do consumo total é destinado à produção, com uma proporção de consumo de 1:1,6:1,7 para água DI, comum e de consumo humano, respectivamente. A reciclagem é praticamente inexistente e toda a água industrial é misturada antes do descarte.
 - A segunda empresa apresenta processos semelhantes aos da empresa anterior. A empresa não possui nenhum tipo de sistema de gerenciamento ambiental mas tem grande preocupação com ações de melhoria ambiental. O consumo diário médio é de 70 m³, sendo 40 m³ de água DI, 15 m³ de água comum utilizados na galvânica e 15 m³ também de água comum destinados ao consumo humano. Não há reciclagem e toda a água industrial é misturada e posteriormente direcionada ao sistema de tratamento de efluentes.

O principal impacto ambiental, como abordado posteriormente é o alto consumo de água. Todas as empresas apresentam um consumo de água que pode ser dividido, de acordo

com a pureza e utilização, em: *água comum*, que corresponde a toda água de entrada na empresa, parte dessa água será usada para processo e parte para consumo humano; *água deionizada (DI)*, que é utilizada nos processos onde a pureza é determinante; *soluções aquosas* e *água residuária*, que corresponde a toda água descartada dos processos industriais. Enquanto o consumo da água comum é muito intenso, a fabricação da água deionizada e descarte da água residuária são, tanto ambientalmente quanto economicamente, oneroso, devido aos processos envolvidos e os reagentes utilizados. Assim, a importância do tipo de água para o programa de prevenção de poluição foi estabelecida como, em ordem decrescente, água deionizada, comum, residuária e em solução. A tabela 4.1. sumaria os critérios enunciados anteriormente.

Tabela 4.1.: Caracterização dos tipos de água em relação aos fatores: econômico, ambiental e de consumo

	FATOR		
	ECONÔMICO	AMBIENTAL	CONSUMO
H₂O DI	<ul style="list-style-type: none"> • Compra (H₂O comum) • Fabricação • Tratamento 	Geração de resíduo de: <ul style="list-style-type: none"> • Processos • resinas de troca iônica 	Médio
Grau de prioridade	1º	1º	3º
H₂O comum	<ul style="list-style-type: none"> • compra • tratamento 	<ul style="list-style-type: none"> • resíduo de processos 	Muito alto
Grau de prioridade	3º	2º	1º
H₂O residuária	<ul style="list-style-type: none"> • tratamento 	<ul style="list-style-type: none"> • resíduo (lodo) 	Alto
Grau de prioridade	2º	3º	2º
Solução aquosa	<ul style="list-style-type: none"> • compra (H₂O comum) • fabricação • tratamento 	<ul style="list-style-type: none"> • resíduo de processos 	Baixo
Grau de prioridade	4º	4º	4º

A água DI, que tem de ser produzida pela própria empresa, é utilizada primordialmente em processos envolvendo lâminas de silício enquanto a água comum é utilizada em processos galvânicos.

4.1.1. EMPRESA DE ALTA COMPLEXIDADE TECNOLÓGICA

As três empresas avaliadas foram divididas em dois grupos: maior ou menor complexidade tecnológica. Para a empresa de maior complexidade tecnológica, observou-se que:

- Praticamente não há formação de resíduos gasosos nesse caso;
- A formação de resíduo sólido advém de duas fontes distintas: refugo de produção, quando o CI já encapsulado apresenta-se defeituoso, e tratamento da água e soluções aquosas usadas no processamento dos CI's.
- Os resíduos líquidos são essencialmente água utilizada para remover as soluções aquosas a que as lâminas foram submetidas (águas de lavagem) e as próprias soluções aquosas.

As águas utilizadas para remover as soluções aquosas poderiam ser reusadas após tratamento. De fato, essa empresa trata a água residuária em conjunto com a galvânica. Esta água residuária pode ser reusada na entrada de água, uma vez que a água residuária tem qualidade igual ou superior à fornecida pela SABESP e a água DI, consumida nos

equipamentos, exige o uso de resinas de troca iônica para fabricação. Assim, não haveria perigo de contaminação. As soluções poderiam ser utilizadas para recuperação de metais, se estivessem em maior volume.

Os resíduos sólidos advindos do tratamento de água residuária diminuiriam se programas de minimização de consumo pudessem ser estabelecidos, contudo, a construção dos equipamentos nessa área impede acesso humano ou mesmo pequenas modificações, devido às estritas exigências quanto à contaminação. O refugo de produção depende intrinsecamente do controle dos processos de encapsulamento, daí a enorme resistência em aceitar modificações nos processos.

Nessa empresa todas as opções de prevenção levantadas foram consideradas perigosas, e portanto não houve tentativa de implantação ou mesmo teste em escala piloto.

4.1.2. EMPRESAS DE MENOR COMPLEXIDADE TECNOLÓGICA

Para as empresas de menor complexidade tecnológica, os principais resíduos encontrados, são genericamente listados na tabela 4.2. É possível observar que o maior consumo é de água, utilizada essencialmente no preparo de soluções e na lavagem das lâminas de silício, após a exposição a estas soluções. Para a maioria dos processos a água deve ser deionizada, o que implica em alto custo de produção, uma vez que as resinas utilizadas para sua fabricação precisam ser limpas com ácidos e bases fortes que, por sua vez, exigem cuidados no descarte.

Tabela 4.2.: Principais resíduos encontrados para nas empresas de menor complexidade tecnológica

ESTADO FÍSICO DO RESÍDUO	COMPOSIÇÃO
LÍQUIDO	Ácidos: HNO ₃ , H ₃ PO ₄ , H ₃ BO ₃ , HCl, H ₂ SO ₄
	Bases: NH ₄ OH
	H ₂ O
	Sais: Ni, Al
	Detergentes: catódico, anódico
SÓLIDO	Lodo, cobre, alumínio e silício
GASOSO	Vapores de ácidos e bases (capela química)

Para cada uma das empresas levantou-se as opções de prevenção de poluição, de acordo com a metodologia dos 3 R's. Os resultados são sumariados a seguir.

4.1.2.1. Empresa 1 (E1)

Resíduos sólidos

Os principais resíduos sólidos, como pode ser notado na tabela 4.2., correspondem a silício, cobre e lodo galvânico. O silício advém das perdas de produção, que decorrem principalmente de quebras, na maioria das vezes no estágio inicial de produção, mas também podem estar relacionadas a erro de processo, situações espúrias e pouco comuns. Esse resíduo corresponde a lâminas de silício que sofreram processamento, apresentando metais, principalmente alumínio ou ouro, em sua superfície. Esse resíduo é inerte, porém, devido à sua pureza, apresenta alto valor agregado. Estudo de redução da formação desse resíduo não mostrou opção de controle, uma vez que tal resíduo decorre de situações espúrias. Os

possíveis usos para tal resíduo correspondem a: retrabalho da lâmina, quando essa encontra-se inteira (reuso), ou uso do silício como matéria-prima na produção de silício metalúrgico (reciclagem). De fato, o primeiro procedimento já existe em países onde o consumo de lâminas de silício é alto, como no EEUU, para o segundo procedimento, por outro lado, não se encontrou registro, o que denota uma área de aplicação que merece atenção.

O cobre e o alumínio advêm da usinagem dos encapsulamentos. Seus formatos correspondem a lascas de cerca de 1 cm x 0,3 cm e sua reciclagem só requer recolhimento. Para tanto, foi proposto para a empresa a instalação, nos equipamentos, de canaleta coletor. O lodo galvânico, por sua vez, decorre do tratamento da água residuária da empresa e sua formação corresponde à precipitação de Ca(OH)_2 e metais adsorvidos e a sua composição encontra-se na tabela 4.3. Quatro porções distintas de lodo, duas secas e duas úmidas, foram analisadas por ICP.

Tabela 4.3.: Principais constituintes do lodo galvânico

<i>Elementos</i>	<i>Amostra a (ppm)</i>	<i>Amostra b (ppm)</i>	<i>Amostra c (ppm)</i>	<i>Amostra d (ppm)</i>
Na	24680	25990	3680	3880
Mg	1040	1065	160	160
Al	27950	28470	2370	3850
P	15956*	16970*	3340	2770
S	640	730	2350	2410
K	580	630	60	90
Ca	9980	10260	1340	1490
Cr	225	240	50	60
Mn	110	130	20	20
Fe	5970	6370	1360	1090
Co	40	40	7	7
Ni	3790*	4020*	600	340
Cu	1070	1650	150	110
Zn	420	450	40	50
Mo	20	20	20	20
Cd	3	3	0,2	0,2
Sn	2110	2070	4560	3620
Pb	110	110	20	20

Amostra a,b – como recebida; amostra c,d – após secagem em estufa a 120 °C

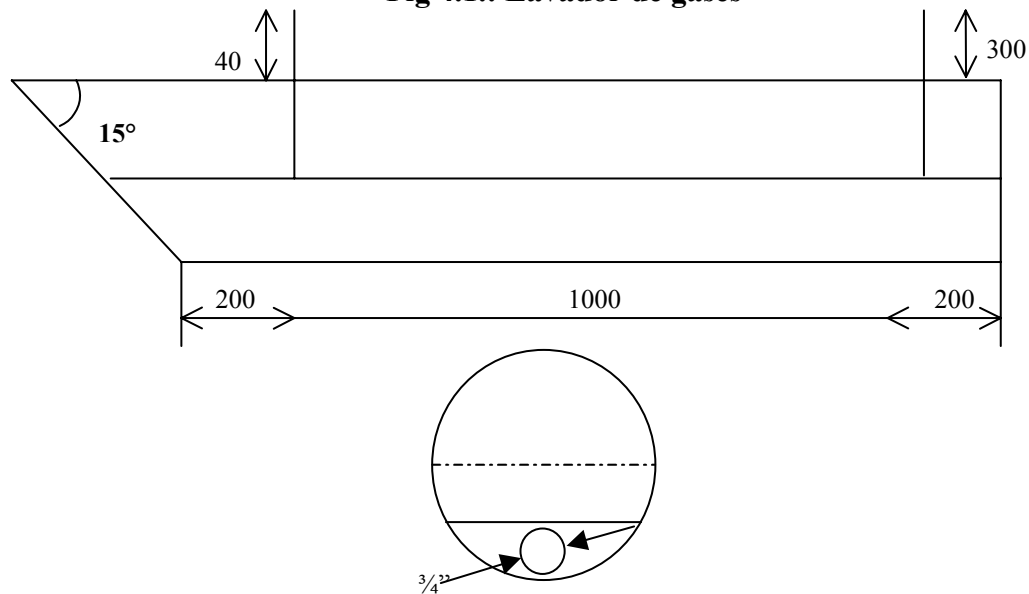
As altas concentrações de Ni, S e P podem advir dos processos em sala limpa, que utilizam ácidos e base, Ca foi adicionado no tratamento de efluentes, Na, Cu e Sn provavelmente são provenientes dos processos galvânicos ou catalisadores adicionados em banhos, Fe pode vir de tubulações e material de manuseio, Al é matéria-prima usada nos encapsulamentos e Mg pode advir de algum reagente, que não é especificado no rótulo, pelo fabricante. A minimização da formação do lodo implica na diminuição do consumo de água, que será abordado posteriormente. Sua reciclagem poderia ocorrer pelo co-processamento em empresas de cerâmica mas, devido ao custo de transporte, esta opção exige um alto volume de resíduo ou a possibilidade de agregar várias empresas em sistemas de cooperativas. Desse modo, a comunicação ambiental pode se tornar uma excelente estratégia de diminuição desse resíduo. O descarte desse resíduo, no Brasil, não cria passivo ambiental sério, já que pode-se utilizar tecnologias limpas, baseadas em tochas de [17].

Resíduos gasosos

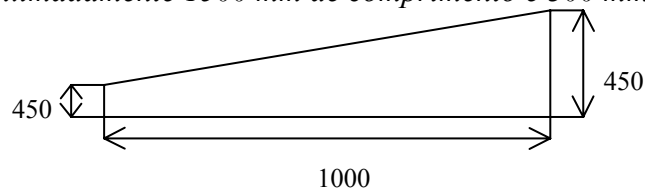
Os principais resíduos gasosos da empresa têm como saída a capela, onde se manipulam ácidos e bases. Esses resíduos podem ser facilmente controlados pelo uso de um lavador de

gases e esse equipamento pode usar água descartada dos próprios processos da empresa. Desse modo, é possível controlar as emissões gasosas com o uso de um outro resíduo. O lavador de gás desenhado encontra-se na figura 4.1. O lavador não adiciona impedâncias ao fluxo de ar e consiste essencialmente de um tubo de pvc de 1,5 m de comprimento e 30 cm de largura. Nesse tubo, são acopladas quatro placas, também de pvc. Orifícios entre a região das placas permitem a entrada da água. Todo o sistema deve apresentar uma queda de cerca de 15° , para garantir que não haverá água atingindo os ventiladores, no contra fluxo.

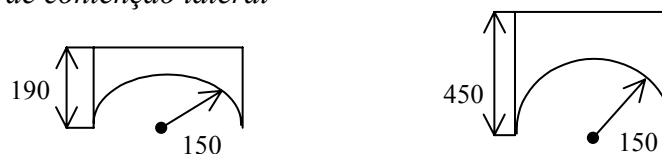
Fig 4.1.: Lavador de gases



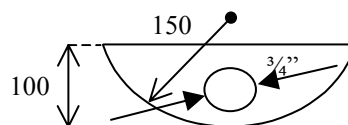
A) Tubo de aproximadamente 1500 mm de comprimento e 300 mm de diâmetro



B) Duas placas de contenção lateral



C) Placas de contenção frontal



D) Placa de recolhimento de água

A eficiência desse lavador foi testada em laboratório. O procedimento de teste considerou duas inclinações: 0° e 11°, correspondendo ao pior e melhor caso, após a montagem do equipamento na empresa, respectivamente. Como emissão usou-se ácido clorídrico concentrado (33% em massa) e a água utilizada no lavador de gás foi recolhida para medida de pH. O comportamento do sistema para qualquer inclinação é semelhante, encontrando-se uma variação de pH de 0,7 para inclinação de 0° e de 0,3 para a inclinação de 11°.

Resíduos líquidos

Os resíduos líquidos correspondem a duas fontes distintas: as soluções aquosas utilizadas em processo e a água utilizada para a remoção dessas soluções, isto é, os banhos de lavagem. As soluções aquosas utilizadas em sala limpa apresentam como principal característica a baixa contaminação por particulados e outros compostos, pois em Microeletrônica, devido às pequenas dimensões dos CI's, as soluções são utilizadas por pouco tempo e as lâminas apresentam filmes finos para processamento. Essas soluções, em geral, são misturas muito oxidantes, com um ou mais ácidos presentes. Assim, um possível uso para tais produtos é como solução de limpeza, na fabricação de lâminas de aço inoxidável. O baixo volume fabricado, porém, dificulta sua comercialização. Assim, a existência de ecossistemas industriais poderia favorecer a correta disponibilização desse insumo.

A redução do consumo das soluções aquosas pode ser conseguida por filtragem, quando os particulados forem o principal contaminante, ou por mudança nos procedimentos. Contudo, devido ao alto consumo, a mudança de procedimento é mais significativa para a água de lavagem, que corresponde ao maior impacto ambiental. Esse, portanto, foi o insumo abordado. Para tanto, cada processo teve sua água de lavagem recolhida e analisada por ICP. Os principais contaminantes encontrados na água DI estão apresentados na tabela 4.4.

Tabela 4.4.: Caracterização da água utilizada na empresa 1

ÁGUA	PROCEDÊNCIA DA ÁGUA	CONTAMINANTES	VOLUME GASTO
DI I	Limpeza RCA Remoção boro-silicato Remoção boro-skin	Ácidos	1/3 do total da água DI
DI II	Niquelação I Niquelação II Douração	Metais Ni e Au	1/3 do total da água DI
DI III	Polimento	Pó de silício e HF	1/3 do total da água DI
COMUM	Corte Processos de galvanoplastia	Pó de silício Metais, material orgânico e inorgânico	Aproximadamente 3/2 do volume total de água DI

* a designação I, II e III tem como objetivo separar contaminantes distintos encontrados na água DI

Analisaram-se os seguintes elementos: Na, Mg, Al, P, S, K, Ca, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Mo, Cd, Sn e Pb. Desse modo, obter-se-ia não só informação sobre os contaminantes do processo como também de possível contaminação inserida, por exemplo, por oxidações de equipamentos, de manuseio das lâminas (Mo, Cr, Fe), por manipulação incorreta (Na, K), etc.

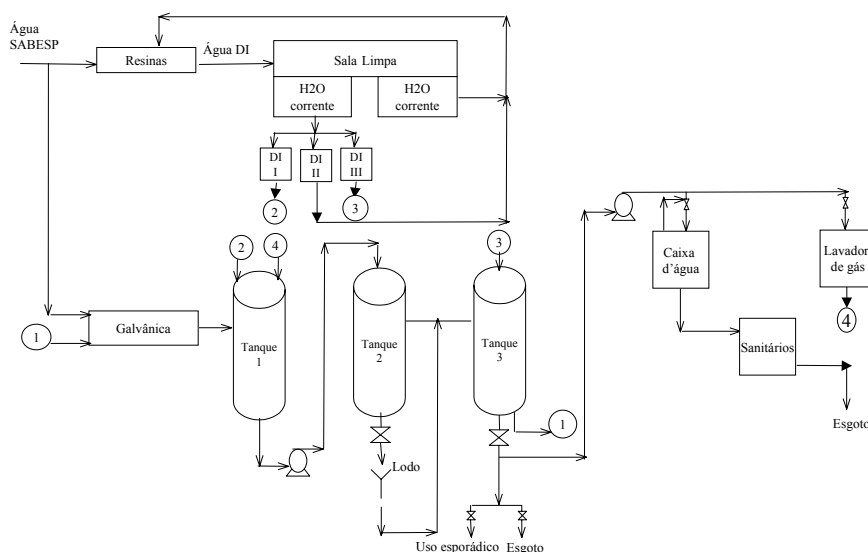
Os valores obtidos para todos os elementos ficaram na ordem de 0,1 mg/L ou menos, indicando que não há indicação de contaminação inserida e que a água é de boa qualidade. A água denominada DI III apresenta dificuldades para a reciclagem devido à existência de partículas de silício. A minimização do consumo de água foi conseguida com o uso de um sistema de lavagem descontínua, para as águas denominadas DI I e DI II. Quanto à reciclagem das águas nos seguintes locais:

- A água DI I, não apresenta contaminação por metais. Dessa forma, a melhor forma de reciclagem é enviar essa água para as resinas de troca iônica, para que ela seja recuperada, de acordo com as especificações da empresa, e novamente utilizada nos processos.
- A água DI II apresenta contaminação por metal, portanto a reciclagem pode ser feita pelas resinas de troca iônica se, e somente se, a água DI I não tiver o mesmo destino, para evitar precipitação na resina. Portanto, o melhor uso da água DI II é na galvanica
- A água DI III apresenta pó de silício pois é procedente das etapas de corte e polimento. Dessa forma, deve ser levada diretamente ao tratamento de efluentes, não sendo passível de reciclagem ou reuso.

Assim, cerca de 2/3 da água DI da empresa pode ser reusada e/ou reciclada eficientemente. O consumo de água na galvanica, por ser esta de uso intermitente, não pôde ser minimizado. A sua reciclagem pode ocorrer no sistema de tratamento de efluentes. Assim, é possível obter-se um sistema fechado quanto ao consumo de água. A água só deverá ser descartada esporadicamente quando o descarte de água DI, da sala limpa, exceder o consumo na área da galvanica. A água residuária, por sua vez, apresenta baixa contaminação por metais pesados (<1ppm) ou compostos orgânicos, e pode ser enviada para uso nos sanitários. Assim, praticamente toda a água da área de processos da empresa pode ser reusada e/ou reciclada, como mostra a figura 4.2., que propõe um fluxograma de processo com emissão próxima a zero.

Esse cenário corresponde atua como facilitador para futura implantação de sistemas de gestão normalizados uma vez que prepara a empresa para o processo de minimização de impactos ambientais e melhoria contínua.

Figura 4.2.: Fluxograma do processamento da água proposto



Portanto, para a empresa E1, a abordagem dos processos individualmente provou que é possível atingir-se uma situação próxima da emissão zero. Parte das opções de prevenção de poluição foram adotadas [18].

4.1.2.2 Empresa 2 (E2)

As emissões gasosas são semelhantes às da primeira empresa e são aprisionadas em filtros específicos, internos ao sistema da sala limpa, o que inviabiliza o uso de água residuária. Se esse uso ocorresse, haveria ganho ambiental, pois não existiria o descarte dos filtros.

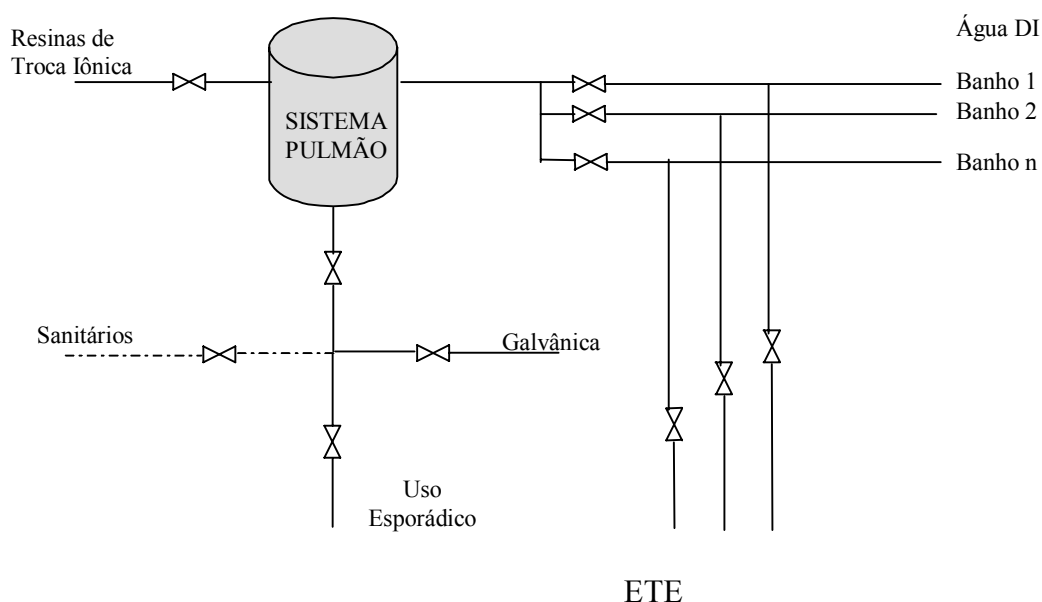
As emissões sólidas são, novamente, semelhantes às da primeira empresa e, portanto, de fácil controle.

As emissões líquidas, especialmente água de lavagem e solventes orgânicos, merecem atenção especial. Para estas a metodologia de 3 R's mostrou que:

- Para a água DI, muito embora o volume gasto, em termos percentuais, fosse menor que o da empresa anterior, a água descartada era de muito boa qualidade, como a análise por ICP demonstrou. De fato, apenas quatro banhos de lavagem (menos de 50 % dos banhos) apresentavam metais em quantidade superior a 1 ppm. Porém, como todas as águas são descartadas conjuntamente, é possível:
 - reciclar a água advinda da sala limpa nas resinas de troca iônica;
 - reusar na área de galvanica, sem qualquer tratamento prévio;
 - reusar como água sanitária.

A primeira opção implica em mudança das instalações, pela construção de um sistema pulmão para coleta da água a ser tratada. Para essa opção, o tempo de retorno do investimento foi calculado em torno de 1 ano, para o pior cenário. O reuso na galvanica implica em construção de sistemas menores, portanto o tempo de retorno do investimento é menor. O reuso como água sanitária não implica em custo e as tubulações já estavam previamente instaladas. Portanto, essa é a opção economicamente mais viável, e adotada pela empresa. Um sistema genérico, que contempla as três opções de reúso, encontra-se na figura 4.3.

Figura 4.3.: Leiaute proposto de reciclagem e reuso da água DI



Para a água comum, utilizada na área galvânica, a minimização tornou-se possível através de sistemas de spray, lavagem descontínua e *skip*, semelhantes aos propostos e testados na primeira empresa. De fato a empresa adotou o sistema de spray, sempre que o leiaute da empresa o permitiu, sendo possível, em um dos casos, utilizar um único banho para remover quatro soluções distintas.

Para a água residuária, é possível o uso como água sanitária, porém, havia informações prévias que demonstravam haver corrosão das válvulas em aço inoxidável. Para provar que a corrosão não era decorrente do tipo de água utilizada, testes de incrustação foram feitos utilizando-se solução saturada de carbonato de cálcio e hidróxido de cálcio. Para os dois casos a formação de cristais, observados por microscopia óptica, em uma superfície de aço inoxidável decorre após 15 dias apenas. Se a solução for diluída à metade, para hidróxido de cálcio a incrustação só é notada após 30 dias. Portanto, a incrustação não é decorrente do uso de água residuária, que apresenta pequena concentração de cálcio.

As soluções aquosas apresentam grande pureza e, de modo semelhante, também os solventes orgânicos, tais como alcóois e cetonas, além de detergente. Um processo de minimização de consumo foi encontrado quando se verificou que a empresa usava cloreto de metileno e querosene para remoção de gorduras. A possível minimização é a utilização do cloreto de metileno descartado para a limpeza que exige querosene.

Todas as soluções e os solventes podem ser facilmente reusados em uma empresa que tenha menor exigência de pureza em relação a particulados. Portanto, a existência de ecossistemas industriais pode permitir a total utilização dos solventes, anteriormente descartados.

5. CONCLUSÕES

O trabalho demonstrou as vantagens ambientais e econômicas de programas de prevenção de poluição, pois ao fazer a avaliação ambiental inicial da empresa, ainda promoveu considerável minimização de água e reagentes, podendo até chegar a situação de emissão zero. Esse programa representa um passo importante na implantação de um sistema de gestão ambiental como a ISO 14001, já que faz uso de importantes instrumentos, na maioria das vezes sugeridos pela norma, além de atender às legislações ambientais pertinentes. O programa de P2 promoveu mudanças de procedimento em relação à tecnologia e teve relevantes resultados já que das três empresas estudadas, duas implantaram boa parte das P2 sugeridas.

O significativo consumo de água na indústria de microeletrônica associada a qualidade exigida para seus processos, que apresentam implicações econômicas e ambientais devido ao alto custo de fabricação e intensa geração de resíduos, demonstram o expressivo impacto ambiental desse recurso no setor. Entretanto, os estudos concluíram que a maior parte da água usada na microeletrônica é reusável e/ou reciclável. Isso se deve ao fato da água descartada ainda apresentar concentrações de contaminantes tal que torna viável os processos de reuso – em empresas de mais baixa tecnologia, como as galvanoplastias - e reciclagem, no processo de fabricação de água DI. O desenvolvimento de ecossistemas industriais, isto é, um sistema agregado de empresas é fundamental para possibilitar a transferência de rejeitos de indústrias de maior para as de menor tecnologia, permitindo uma economia de água expressiva.

Quanto maior o nível de tecnologia industrial, maior resistência à mudança é notada, além do levantamento de P2 se tornar mais difícil por restrições de projeto de equipamentos. Fica evidenciada, portanto, a importância do “ecodesign”, isto é, projetos que permitam maior versatilidade de acesso, promovendo otimização dos processos que os utilizam.

Em relação às soluções, nota-se que no Brasil, a inexistência de um setor de Microeletrônica forte, gera problemas de escala. A baixa quantidade de reagentes descartada não permite destino mais nobre do que o tratamento ao final do processo. Aqui a comunicação ambiental pode ser uma ferramenta valiosa no intuito de facilitar a tarefa de agregar empresas distintas em um ecossistema industrial capaz de reciclar produtos, que atualmente sofrem descarte.

Por fim, esse trabalho mostrou a necessidade de se criar sistemas de gerenciamento a base de associações. Estes, por sua vez, trazem relevantes benefícios à medida que contribuem para minimização de uso de recursos e geração de resíduos, requisitos fundamentais em sistemas de gestão normalizados como as normas ISO 14000.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Singer, P. How safe is the semiconductor industry, Semiconductor International, dez, 1996. p. 3.
2. The environmental costs of computers. Intel Inside New Mexico. South West Organizing Project, (1995), Graydon Larabee, Texas Instruments Fellow, (1993), EPA (1995) 1
3. The high cost of high tech. EPA. 1995. Dispões sobre os custos ambientais da tecnologia de fabricação de circuitos integrados. Disponível em <http://www.corporatewatch.org>. Acesso em: 17 mar. 2000.
4. Heyns, M., Mertens, P.W., Ruzyllo, J., Lee, M. Y.M. Advanced wet and dry cleaning coming together for next generation. Solid State Technology. mar. 1999, p. 37.
5. Lester, M. A. Resource Conservation via ultra pure water reduction. Semiconductor International. Set. 2001. p. 48.
6. Zuffo, J.A. Compêndios de microeletrônica. Editora Guanabara Dois. Mar. 1984, p. 121.
7. Ridgeway, R. G., Maroulis, P. J., Pearce, R. V. Characterizing effluents from PECVD and plasma etch processes, Micro. jan. 1997, p. 45.
8. Batarseh, P. Assessment of the semiconductor industry source reduction planning efforts. California Department of Toxic Substances Control Office of Pollution Prevention and Technology. out. 1994, p.1.

9. Coutea, T., Mc Bride, M., Peavery, P. Dilute chemistries, RCA cleaning. Semiconductor International, out. 1998, p. 95.
10. Braun, A., E. Dilute chemistries: promise and caution. Semiconductor International. Jul. 2000, p. 92.
11. Lester, M. A. Single-wafer cleaning vs. batch cleaning. Semiconductor International. Ago.2001, p. 52.
12. Hand, A. Wafer cleaning confronts increasing demands. Semiconductor International. Ago. 2001, p. 65.
13. Wafer cleaning confronts increasing demands, Hand, A., Semiconductor International. Ago. 2001 p. 67.
14. Heyns, M., Mertens, P.W., Ruzyllo, J., Lee, M. Y.M. Advanced wet and dry cleaning coming together for next generation. Solid State Technology, mar. 1999, p.37.
15. Lester, M. Has dry cleaning come of age? Semiconductor International. mar. 1999, p. 40.
16. CETESB - Manual para implementação de um programa de prevenção à poluição, CETESB, 1998.
17. Tecnologias de plasma. Dispõe sobre assuntos gerais sobre tecnologia de plasma. Disponível em: <http://www.ecochamas.com.br> e <http://www.kompac.com.br> Acesso em: 15 jan. 2003.
18. Leite, Silvia. Notícias FIESP/CIESP. São Paulo, Ecosystemas Industriais. 87, ano 04, jun. 2002.