

RECUPERAÇÃO DE ÁGUA DEIONIZADA NA INDÚSTRIA DE SEMICONDUTORES

DEIONIZED WATER RECOVERY IN THE SEMICONDUCTOR INDUSTRY

William Todendi Dutra^a, Anderson Stumpf Silva dos Reis^b, Giovanni Pesenti^c, Feliciane Andrade Brehm^d,
Carlos Alberto Mendes Moraes^a

^aPPGEM - Universidade do vale do rio dos sinos - Unisinos, ^bGraduando Engenharia Ambiental – Unisinos,
^cHT Micron Semicondutores, ^dPPGEC - Unisinos

duto.william1@gmail.com, andersonreis.stumpf@gmail.com, giovani.pesenti@htmicon.com.br,
felicianeb@unisinos.br, cmoraes@unisinos.br

Submissão: 04 de dezembro de 2022

Aceite: 19 de março de 2024

Resumo

A indústria de semicondutores consome água de altíssima pureza em abundância. Esta água é chamada de Água DI (deionizada), e possui um alto custo de produção devido às diversas etapas necessárias para atingir os parâmetros de utilização. Um dos processos que utilizam este fluido é o lixamento traseiro de *wafers* de silício (*backside grinding* ou BSG), correspondendo sozinho a quase um terço do consumo de toda a fábrica. No processo BSG são incorporados sólidos provenientes dos *wafers* e abrasivos, sendo que os compostos que constituem as matérias-primas destes insumos, são praticamente insolúveis em água, minimizando a contaminação desta e facilitando etapas de segregação e limpeza. Deste modo, o trabalho propôs realizar o tratamento do efluente líquido do processo BSG de forma puramente física, sem utilizar produtos químicos, o que contribui para o condicionamento visando o retorno direto desta água tratada no processo BSG, de modo que seja aplicado o nível 2 da Produção Mais Limpa com a reciclagem interna. O tratamento proposto no trabalho tem um grande potencial de aplicabilidade na reciclagem interna da água presente no efluente líquido do processo de lixamento traseiro de *wafers* de silício da indústria de semicondutores, permitindo sua reinserção no processo, de modo a se obter ganhos econômicos, sociais e ambientais após a implementação deste.

Palavras-chave: semicondutores; produção mais limpa; água; recuperação; reciclagem interna.

Abstract

Semiconductor industries consume a significant amount of ultra-pure water. This water is known as Deionized Water (DI) and has a high production cost due to the multiple stages required to meet the necessary parameters for its use. One of the processes that utilizes this fluid is the backside grinding of silicon wafers (BSG), accounting for almost one-third of the factory's total water consumption. During the BSG process, solids from the wafers and abrasives are incorporated, and the compounds that make up the raw materials of these inputs are practically insoluble in water. This minimizes water contamination and facilitates segregation and cleaning steps. Therefore, the objective of this study is to treat the effluent from the BSG process solely through physical means, avoiding the use of chemical products. This approach aims to enable the direct return of the treated water to the BSG process, aligning with Level 2 of Cleaner Production through internal recycling. The proposed treatment in this study holds significant potential for internal water recycling within the semiconductor industry's backside wafer grinding process. This allows for economic, social, and environmental benefits to be achieved after its implementation.

Key-words: semiconductors; cleaner production; Water; recovery; internal recycling.

1 INTRODUÇÃO

Com o crescimento do consumo de produtos eletrônicos pessoais, assim como, pelo aumento do monitoramento e automatização de máquinas pela rede na indústria 4.0, a produção de dispositivos na indústria de semicondutores tem aumentado vertiginosamente todos os anos. Ciente da necessidade de estimular nacionalmente esta indústria, o Governo Brasileiro apoia o desenvolvimento do setor desde o início dos anos 2000, por meio de várias iniciativas como o Programa Nacional da Microeletrônica (2002), o Programa CI-Brasil (2005), o Programa de Apoio ao Desenvolvimento Tecnológico da Indústria de Semicondutores (PADIS) (2007), a consolidação do Centro de Excelência em Tecnologia Eletrônica Avançada (CEITEC) como Empresa Pública Federal (2008), a participação do Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES) na constituição da Unitec Semicondutores, entre outras segundo Filippin (2016).

Essa indústria é uma das mais exigentes em termos de pureza de materiais e controle de qualidade em seu parque fabril. Os níveis de limpidez do silício utilizado nas lâminas circulares que carregam os circuitos eletrônicos, denominadas de *wafers*, alcançam composição química com sete noves depois da vírgula, também denominado de 9N por conter nove noves de percentual total de silício (99,999.999.9% Si), enquanto as destinadas à aplicação fotovoltaica apresentam até cinco noves depois da vírgula (Luque; Hegedus, 2012).

1.1 Água no setor de semicondutores

Neste setor, a necessidade de água com alta qualidade é imprescindível devido às pequenas dimensões dos componentes trabalhados (atingindo atualmente litografia de 2 nm, ou seja, a largura das trilhas por onde percorrem os pulsos elétricos de sinal) e sua suscetibilidade à contaminação. Os parâmetros físico-químicos desta água são bastante restritivos, principalmente quanto à condutividade elétrica, pois pequenas descargas elétricas nos circuitos podem levar os componentes à falha catastrófica.

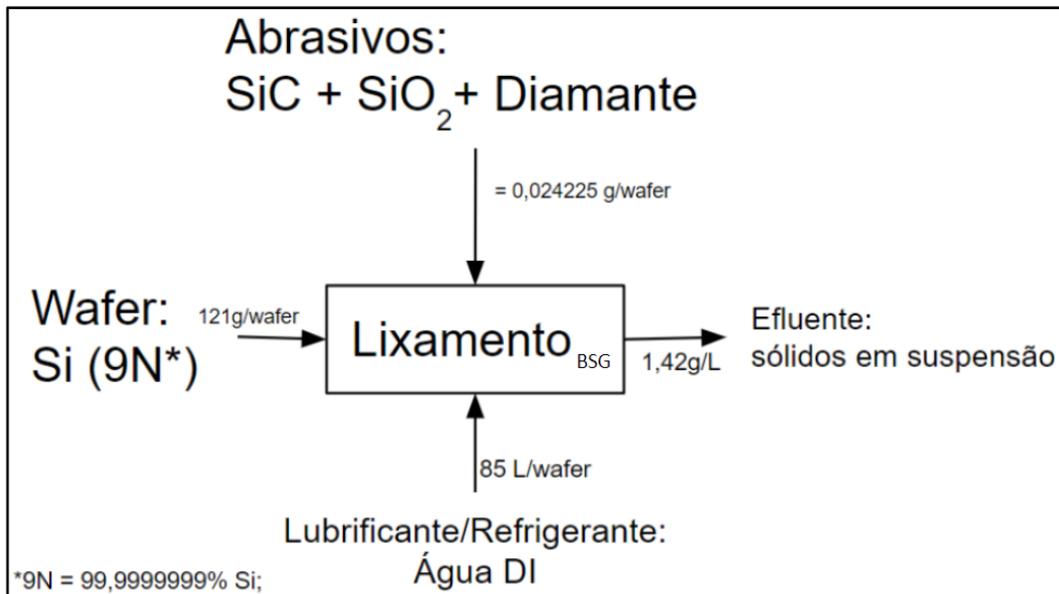
Para atingir estes requisitos, a água do Sistema Municipal de Abastecimento de Água para consumo humano, de acordo com a Portaria GM/MS nº 888 (Brasil, 2021), passa por três etapas essenciais de tratamento até se tornar Água DI (deionizada): o

primeiro estágio de pré-tratamento para remoção de sólidos suspensos; o segundo estágio de dessalinização, em que são retirados íons dissolvidos (Cl, Ca, Mg, etc.); e o terceiro estágio chamado de polimento, que busca aumentar a qualidade da água o suficiente para atender às necessidades da linha de produção (Lee; Jin; Hong, 2016). O sistema de produção de água deionizada age na retirada mais rigorosa dos elementos presentes na água de consumo, que embora para a saúde humana seja potável, para a produção de circuitos eletrônicos e processamento dos *wafers* ainda não é adequada, pois contém sais minerais que aumentam a condutividade da água (Hutcheson, 2006).

Considerando-se o processo de fabricação de dispositivos de memória para eletrônicos móveis como celulares, por exemplo, há a necessidade de se realizar uma grande redução na espessura do substrato de silício (*wafer*), possibilitando a densificação de componentes por dispositivo, ou seja, mais unidades de circuito inseridos em um mesmo *microchip* de forma empilhada. Neste processo são geradas enormes quantidades de resíduo de silício cristalino de alta pureza com enorme potencial para diversas aplicações. Atualmente, na indústria é prática usual a redução de espessura do *wafer*, produzido com a espessura comercial de aproximadamente 775 µm, para cerca de 30 µm ou até menos, uma redução de mais de 95%. Isto significa que dos 127 g do substrato inicial de 300 mm de diâmetro, são gerados aproximadamente 121 g de resíduo de Si de alto grau de pureza que vão parar no efluente líquido do lixamento junto com a Água DI. Nessa operação, são gastos em torno de 85 L de Água DI por *wafer*, gerando um efluente composto de silício grau eletrônico em suspensão, o que geraria uma concentração em torno de 1,42 g/L. Além desses materiais, durante o processo de lixamento ainda há a incorporação dos abrasivos no efluente, porém esta incorporação é praticamente irrelevante, ficando em menos de 0,29 mg/L. A Figura 1 mostra o fluxo de materiais no processo BSG. O efluente líquido dos processos geralmente é conduzido à Estação de Tratamento de Efluente (ETE) da empresa, onde se mistura com outros efluentes líquidos industriais, na qual são utilizados métodos convencionais de coagulação e floculação (utilização de produtos químicos como o policloreto de alumínio e cal hidratada), remove-se o lodo decantado e se faz a emissão do restante ao sistema municipal de esgotos

(Huang, 2004; Omar; Norulaini; Ahmad, 2008).

Figura 1 - Fluxo de materiais no processo BSG



Fonte: autoria própria, 2022.

Levando-se em conta que a matéria-prima de Si utilizada na confecção dos *wafers* custa em torno de 15-20 U\$/kg, a cada *wafer* lixado é perdido em torno de U\$ 2 em material, o que poderia resultar num montante expressivo para uma empresa que processe uma quantidade considerável de *wafers* por dia (He *et al.*, 2019).

Porém, o setor de semicondutores abrange tanto a produção de módulos fotovoltaicos (FV) quanto a produção de circuitos microeletrônicos integrados (CI), o que pode acarretar a expansão deste estudo para mais unidades fabris. Ambos os produtos (FV e CI) têm características peculiares quanto à produção, devido ao seu modo de funcionamento, porém iniciam e têm por base um substrato de silício de alto grau de pureza (7N), segundo Luque e Hegedus (2012) e He *et al.* (2019).

Ambos os produtos (CI e módulos FV) iniciam no beneficiamento e fabricação de um grande cilindro de silício monocristalino e de orientação cristalográfica específica, por meio do método de Czochralski (Tomaszewski, 2003), que posteriormente, é cortado em finas fatias para implementação dos circuitos para cada tipo de aplicação. Neste processo, cerca de 40% do material é perdido durante o corte das fatias,

resultando num montante de material com ainda grande nível de pureza (Sarti, 2002), além do uso de água de alta pureza necessária na realização da lubrificação e refrigeração do processo de corte.

Na etapa de lixamento dos circuitos eletrônicos (BSG), a utilização da Água DI também tem a função de limpeza superficial dos sólidos removidos e refrigeração do *wafer*, que aquece devido ao atrito entre os rebolos de trabalho e a superfície que está sendo lixada (DISCO, 2017).

1.2 Ambiente e semicondutores

Industrialmente, há a possibilidade de redução direta da utilização de Água DI, pelo uso de formas alternativas de enxágue e refrigeração dos *wafers*, como a utilização de plasma ou sopro de ar comprimido, em etapas do processo BSG. Esta troca poderia acarretar a redução de 80% no consumo de água deionizada (Allen e Hahn, 1999). A Associação das Indústrias de Semicondutores (SIA), entidade internacional, destaca que os maiores objetivos para a indústria são a destinação de 75% da água utilizada em todos os processos, para recuperação e reciclagem simultaneamente (ITRS, 2013), e que "[...] reciclar água de alta qualidade para aplicações em processo, e reutilizar água de menor qualidade

em aplicações que não sejam do processo de fabricação, são ambas importantes, porém dependem da disponibilidade e viabilidade de aplicação dentro de cada fábrica”. Mas, como visto nos relatórios mais atuais disponíveis da SIA (ITRS, 2013 e 2015) e do Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos (IEEE, 2018), nenhuma das alternativas tecnológicas têm sido adotadas até o momento.

A indústria vem buscando a redução do consumo de ADI nas fábricas, que em média é de 7,8 L cm⁻² de *wafer*, para 5,5 L cm⁻² no ano de 2020, ou seja, um *wafer* de 300 mm de diâmetro (12”), com área de 706,86 cm², consumiria em torno de 5.514 L, e como meta para 2020 deveria ser reduzido para 3.888 L por *wafer*, em toda cadeia de produção. Porém, segundo Wang *et al.* (2023), que fizeram um levantamento com 28 empresas que produzem semicondutores, em 2021 o uso médio de água, o consumo de energia e as emissões de gases do efeito estufa (GEE), por unidade de área do produto, foram de 8,22 L cm⁻², 1,15 kWh cm⁻² e 0,84 kg de CO₂-equivalente cm⁻², ou seja, ao invés de reduzir 30%, houve aumento de cerca de 5% no consumo de água. O uso de água, o consumo de energia e as emissões de GEE experimentaram um período de rápido crescimento com a expansão da indústria de fabricação de semicondutores em todo o mundo nos últimos anos. Em grande medida, o desenvolvimento de semicondutores ainda levará a um consumo significativo de recursos e emissões nas próximas décadas.

Por outro lado, a sustentabilidade e a economia circular (EC) são paradigmas associados aos processos de desenvolvimento territorial e setorial, que obrigam às limitações de escala econômica, à capacidade do capital natural, às taxas de utilização e recuperação dos recursos naturais, exploração proporcional, criação de substitutos renováveis dos recursos não renováveis, redução de emissão de gases e de resíduos e ao cumprimento de exigências e normativas ambientais (Lucas, 2017). O modelo de consumo “extrair-produzir-consumir-dispor”, cujas origens advêm da Revolução Industrial, e que foi a base do desenvolvimento da economia global, atualmente, por razões de ordem social, econômica e ambiental, não é considerado sustentável (Andrews, 2009).

Uma das ferramentas ambientais aplicáveis ao setor industrial, bastante consolidada com o decorrer

dos anos, a Produção Mais Limpa (P+L) consiste na aplicação de uma estratégia ambiental integrada e preventiva aos processos, produtos e serviços, com a finalidade de aumentar a eficiência na utilização de água, energia e matérias-primas por meio da não geração, minimização ou reciclagem de resíduos gerados (Fernandes *et al.*, 2015).

Quatro estratégias são abordadas no conceito de P+L, a primeira, e a mais importante, é a busca pela não geração de resíduos, por meio da racionalização das técnicas de produção. Quando o primeiro conceito não pode ser aplicado integralmente, a segunda atitude proposta pela Produção Mais Limpa é a minimização da geração dos resíduos. Já o reaproveitamento dos resíduos no próprio processo de produção é a terceira atitude defendida pela Produção Mais Limpa, enquanto a quarta alternativa para a Produção mais Limpa é a reciclagem, com o aproveitamento das sobras ou do próprio produto para a geração de novos materiais (Fernandes, 2001).

Henriques e Quelhas (2007) apontam que os sistemas que adotam o programa ou conceito de Produção Mais Limpa são ecoeficientes, pois utilizam menor número de materiais, menos água e energia. Desse modo, os recursos fluem pelo ciclo de produção e consumo em ritmo mais lento. Diminuir os desperdícios implica em maior eficiência no processo industrial e menores investimentos para soluções de problemas ambientais. Em contrapartida, reduzir a poluição por meio do uso racional de matérias-primas significa uma opção ambiental e econômica definitiva, conforme afirmam os autores. Assim, o processo de transformação de matérias-primas e insumos em coprodutos, e não em resíduos, tornam uma empresa mais competitiva (Lemos; Nascimento, 1999). Estes coprodutos poderiam abastecer internamente a empresa na produção de novos produtos, ou servir de matéria-prima para outras indústrias, montando um sistema interconectado industrialmente, tal qual pode ser visto na natureza, tema estudado na Ecologia Industrial.

Como dito anteriormente, o setor eletroeletrônico tem o objetivo de reduzir o consumo de Água DI (ITRS, 2013 e 2015), aspecto que vai ao encontro dos Objetivos do Desenvolvimento Sustentável, metas estabelecidas pela Assembleia Geral das Nações Unidas por um mundo mais sustentável. A recuperação da Água DI contribui

para a diminuição da pegada ecológica da indústria com redução do impacto ambiental causado pela demanda de recursos naturais, promovendo um setor mais limpo, e contribui também para a conformidade segundo a norma ABNT NBR ISO 14001 (2015), com a gestão ambiental industrial e demonstração de práticas mais sustentáveis.

Dentre os pontos enunciados pela agenda, estão “[...] a redução e reciclagem de resíduos e o uso mais eficiente de água e energia” (UN, 2015). Tais pontos seguem em harmonia com o desenvolvimento dos pilares da sustentabilidade, a qual está diretamente relacionada ao meio ambiente, economia e sociedade.

Segundo Libman (2008), a produção de circuitos eletrônicos em uma indústria de grande porte pode chegar ao consumo de até 60 milhões de litros de Água DI por dia, portanto, a produção em massa e o controle de qualidade da Água DI são desafios vitais nesta indústria de alta tecnologia (Lee; Jin; Hong, 2016). As demandas por água nos centros urbanos devido ao crescimento populacional, em conjunto com o aumento da demanda por circuitos eletrônicos que acarreta o aumento da demanda por Água DI, ocasionam, também, a redução dos reservatórios públicos, e vêm afetando inclusive a produção de alimentos (Zhong; Chien, 2021). Portanto, vários estudos em diversas áreas têm procurado desenvolver formas de recuperar e utilizar água de fontes diferentes como da chuva, via dessalinização marinha, e recuperadas de diversos processos e aplicações (You; Tseng; Guo, 2001; Guo; Englehardt; Wu, 2014; Charfi Jang; Kim, 2017) com a finalidade de suprir a demanda industrial e pública.

Nas últimas décadas houve um aumento nas preocupações sobre os impactos ambientais causados pelo uso de energias não renováveis, incluindo mudanças climáticas, poluição do ar, bem como o receio de escassez energética (Martins; Felgueiras; Smitkova, 2018).

A recuperação e reuso de resíduos industriais são benéficos e podem reduzir o consumo de combustíveis fósseis, emissões de gases de efeito estufa e aumentar a eficiência pela redução de perda energética (Men *et al.*, 2019).

1.3 Recuperação de água

Kim (2016) comenta que para cada mil galões

(3785 litros) de Água DI não utilizados no processo produtivo dos circuitos integrados, há a economia de 46 kWh de consumo energético. Assim, para um sistema que utiliza 3 milhões de galões (cerca de 11 milhões de litros) de Água DI, a redução de apenas 10% da produção de Água DI acarreta uma economia de mais de R\$1 milhão por ano. Estes gastos energéticos estão relacionados aos processos de purificação da água do sistema de abastecimento em água DI, podendo citar alguns com maior gasto como a osmose reversa e a eletrodeionização. Além do mais, a própria água do sistema de abastecimento já possui uma grande energia embutida proveniente dos processos de extração, tratamento e distribuição até a fábrica.

Os estudos realizados até hoje focam na utilização de fontes alternativas para suprir a demanda por água na produção de Água DI, no monitoramento de etapas da geração com a finalidade de otimização, na utilização de coagulantes alternativos ao tratamento convencional, pré-tratamento do efluente líquido com diversos tipos de filtros para recirculação, entre outros (Lin; Kiang, 2003; Omar; Norulaini; Ahmad, 2008; Huang *et al.*, 2011; Zhan *et al.*, 2020; Zhang *et al.*, 2021). Há também pesquisas que buscaram a recirculação da água recuperada do efluente líquido de diversos processos da indústria de semicondutores, em processos que exigem menor qualidade do fluido, em que Wu, Sun e Tay (2004) reduziram os custos em 78%, com o fluido parcialmente tratado no sistema de produção de Água DI. No entanto, estes trabalhos em sua maioria utilizam metodologias que empregam processos com inserção de produtos químicos para coagulação e floculação das partículas, que reagem com os sólidos dissolvidos e em suspensão, ocasionam a decantação destes, e facilitam os processos de separação da porção líquida, como a filtração e a centrifugação.

1.4 Estado da arte dos métodos de separação

Alguns métodos de separação já são utilizados industrialmente e foram testados para separar alguns efluentes líquidos da indústria de semicondutores, entretanto utilizam técnicas que podem alterar bastante a qualidade da água, necessitando percorrer várias etapas do processo de Produção da Água DI para que ocorra a

readequação dos parâmetros requisitados pela máquina de BSG.

Filtros de areia são os mais utilizados industrialmente para retirada de alguns compostos. Hoinkis e Panten (2008) estudaram a utilização de filtros de areia para retirada de partículas coloidais (de tamanho entre 0,001 e 1 μm) e sólidos dissolvidos (<0,001 μm), entretanto, tais partículas dificilmente conseguem ser retidas neste tipo de filtro.

A retirada de partículas coloidais e sólidos dissolvidos por processos de ultrafiltração e osmose reversa é eficiente, entretanto um dos maiores problemas neste tipo de processo é a redução do fluxo do permeato, devido ao entupimento das membranas de filtragem, resultando em aumento dos custos operacionais (Sheikholeslami *et al.*, 2001; Wu e Sun, 2005; Fuchs, Theiss e Braun, 2006; Chuang *et al.*, 2007).

Autores como Wu, Sun e Tay (2004), Huang *et al.* (2011) e Tseng, Lo e Hung (2019) propuseram sistemas para tratamento de efluentes líquidos da indústria de semicondutores, baseados na não utilização de produtos químicos convencionais para flocular os sólidos em estações de tratamento. Esses sistemas utilizam vários estágios de filtração, empregando bolas de polipropileno, ultrafiltros, resinas trocadoras de íons e osmose reversa. Na primeira etapa, esses métodos alcançam uma remoção de 95,8% dos sólidos em suspensão. No entanto, para atingir esse resultado, é necessário o uso de coagulantes para coesão dos particulados, tornando necessárias mais etapas no sistema de produção de Água DI para ajustá-la à utilização no processo. Entretanto, vale ressaltar que técnicas

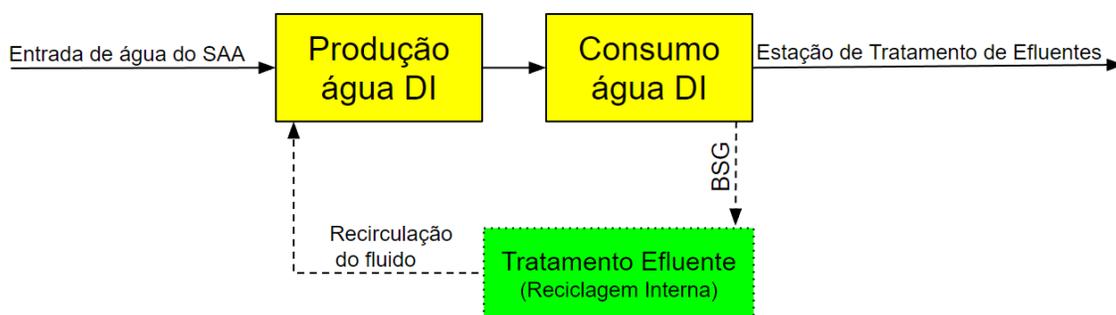
que utilizam apenas filtros sofrem do problema de entupimento dos poros dos elementos filtrantes, aumentando a quantidade de atividades de manutenção e necessidade de fluxo reverso para limpeza, e da troca dos elementos filtrantes com maior frequência. Já na utilização de resinas de troca iônica, estas necessitam de regeneração frequente para manter seu funcionamento.

2 OBJETIVOS

O objetivo foi desenvolver uma metodologia de tratamento de efluente gerado no processo de lixamento traseiro de *wafers* (BSG) de silício, da indústria de circuitos integrados semicondutores, com vistas à recirculação da fase líquida no processo, promovendo um reuso da água tratada, nível 2 – reciclagem interna – da Produção mais Limpa (Figura 2). O tratamento do efluente dessa etapa de produção é justificado pelo grande volume gerado e pela baixa quantidade de contaminantes, que seriam incorporados em etapas posteriores de fabricação.

Nesta pesquisa foram abordados os seguintes objetivos específicos para avaliar a solução ao problema da utilização de Água DI no processo BSG: primeiro, foram avaliados métodos de separação sólido-líquido a serem utilizados no tratamento do efluente, seguido da análise dos parâmetros físico-químicos da Água DI no efluente líquido tratado comparado com os parâmetros exigidos pelo processo BSG, para determinar o ponto adequado para reinserção do fluido no sistema de produção de Água DI ou, se possível, a aplicação diretamente no processo BSG.

Figura 2 - Fluxograma do circuito de reciclagem interna de Água DI



Fonte: autoria própria, 2022.

3 METODOLOGIA

A pesquisa foi realizada em parceria com uma empresa do setor de *backend* da indústria de semicondutores, localizada na cidade de São Leopoldo, Rio Grande do Sul, Brasil. O efluente foi retirado diretamente de um equipamento da marca DISCO (empresa que domina o setor de equipamentos para indústria de semicondutores), durante operação normal de fábrica.

Considerando-se o fluxo de materiais da Figura 1, e as características químicas e físicas destes antes da entrada no processo de lixamento, a metodologia de separação sólido-líquido priorizou utilizar métodos físicos de separação, ou seja, sem a utilização de produtos químicos que pudessem alterar a qualidade do fluido, por meio da solubilização de compostos presentes ou processos de coagulação e floculação utilizados comumente para esta operação. A caracterização do efluente líquido tratado buscou identificar a possibilidade de recirculação da água diretamente no processo de BSG, e na hipótese de não atendimento de uma qualidade mínima conforme parâmetros do equipamento (e de processo), a sua reinserção no sistema de Produção de Água DI, a fim de ajustá-la aos requisitos da fábrica.

3.1 Fluxo de materiais do processo de lixamento BSG

O entendimento do processo gerador do efluente bem como dos materiais empregados no processo que o gera, são essenciais para delimitação dos métodos de separação, assim como das técnicas de caracterização a serem empregadas na identificação dos compostos presentes. Nesta seção estão apresentados em termos gerais os processos utilizados na empresa, que são prática comum na indústria de semicondutores, sendo omitidos apenas os detalhes que não podem ser divulgados, estabelecidos no acordo de sigilo e confidencialidade da pesquisa com a empresa parceira.

3.1.1 Produção de Água DI

O processo de produção de Água DI é realizado em um sistema montado exclusivamente com esta finalidade, construído a partir de sistemas menores que realizam cada etapa. Os parâmetros da Água DI

gerada na fábrica poderão ser vistos na Tabela 1, na seção de resultados.

O fluxograma básico utilizado na empresa para transformar a água do fornecimento público em Água DI é semelhante à Figura (3), porém são omitidos detalhes de interesse industrial. Neste sistema são consumidos sete produtos químicos, três tipos de elementos filtrantes e três aportes energéticos relacionados à pressão exercida na osmose reversa, a geração de campo elétrico na eletrodeionização e em uma etapa posterior não descrita no fluxograma, além da energia necessária à movimentação do fluido no circuito da fábrica.

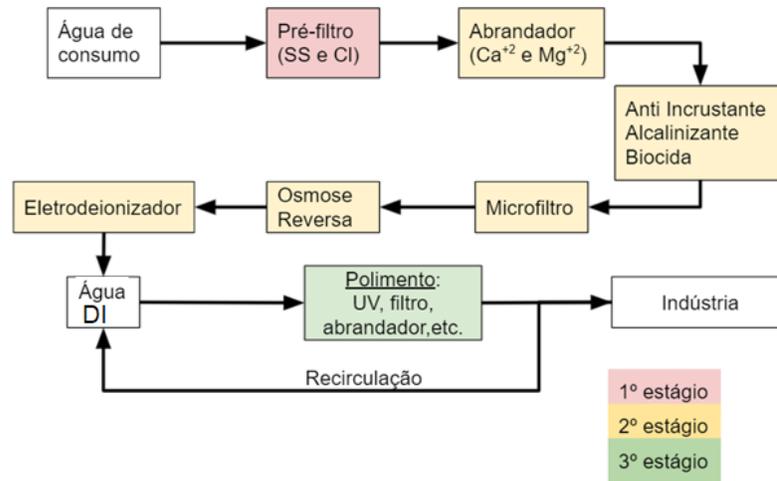
Esta Água DI é utilizada em vários processos produtivos da fábrica, destacando-se as etapas de lixamento dos *wafers* (BSG) e individualização dos circuitos (*dicing*), que consomem o maior volume. Por motivos de segredo industrial não são reveladas as quantidades e valores gastos com o consumo e tratamento da Água DI, mas este último corresponde a quase 80% do custo. A eficiência de produção a partir da água de consumo fica na casa dos 70%, ou seja, de cada 100 litros de água do Sistema Municipal de Abastecimento de Água, 70 L viram Água DI e os outros 30 L servirão para utilizações como descargas de banheiros, limpeza de pisos em área externa, entre outras utilizações. O valor gasto com água de consumo e tratamento para produzir Água DI ultrapassa, em valor monetário local, os sete dígitos anuais.

3.1.2 Processo de lixamento dos *wafers* (BSG)

O processo de lixamento da parte traseira dos *wafers* ocorre em equipamento da marca DISCO (de modelo suprimido por interesse industrial). Este equipamento possui três etapas de remoção do material dos *wafers*, mostrado na Figura 4, utilizando Água DI em abundância como refrigerante e lubrificante de corte. Na primeira etapa (Z1-axis) há a remoção bruta de material, havendo variação de aproximadamente 80% da espessura do *wafers*; na segunda etapa (Z2-axis) há uma remoção mais branda de material, que constitui cerca de 10% da espessura do *wafers* inicial e, por fim, uma etapa de polimento a seco (Z3-axis) que uniformiza a superfície do *wafers* com a intenção de baixar a rugosidade superficial, o que facilita etapas posteriores do encapsulamento. Em Z1 são utilizados abrasivos compostos de partículas de Carbetto de Silício Cúbico (SiC-3C), e em Z2 um composto cerâmico de partículas

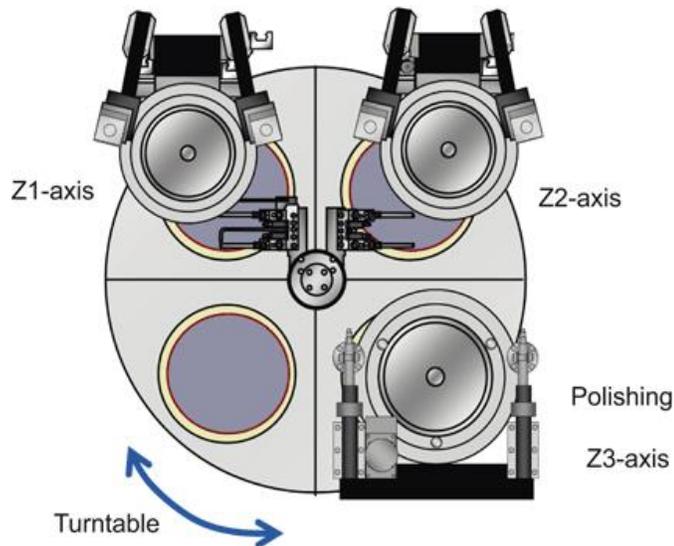
de Al_2O_3 e micro diamantes industriais.

Figura 3 - Fluxograma do circuito de Produção de Água DI



Fonte: autoria própria, 2022.

Figura 4 - Esquema do equipamento de Lixamento Traseiro dos wafers (BSG)



Fonte: DISCO, 2017.

3.1.3 Tratamento do efluente

No cenário inicial, a fábrica utilizava o sistema convencional de tratamento de efluentes líquidos, com a destinação dos efluentes de toda área fabril à mesma estação de tratamento de efluentes líquidos, como visto na Figura 2.

O tratamento consiste na adequação do pH com a utilização de cal hidratada, para que se atinja

o ponto ótimo para floculação e coagulação utilizando-se produtos químicos com esta finalidade. Após isto, o efluente líquido é lançado ao sistema municipal de esgotos, já com parâmetros adequados em conformidade com a Resolução nº 355/2017 do Conselho Estadual do Meio Ambiente (Rio Grande do Sul, 2017), e a porção sólida concentrada na forma de lodo, separada por filtro prensa, é

encaminhada para empresa externa que realiza blendagem para coprocessamento.

3.1.4 Ambiente da fábrica

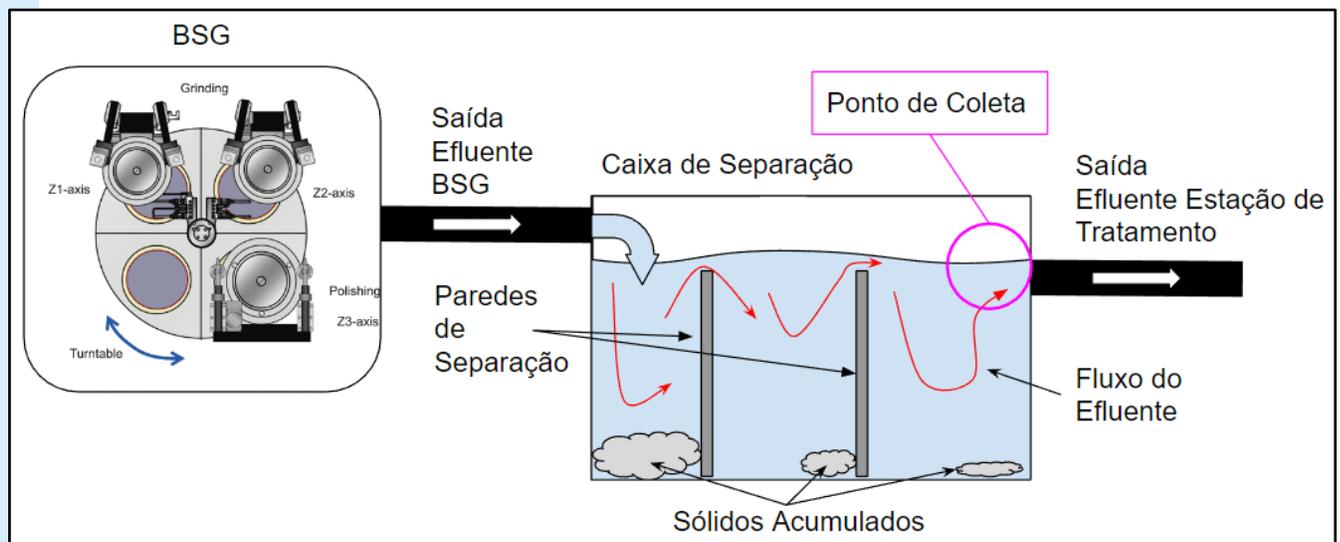
Os materiais utilizados na indústria de semicondutores, assim como toda operação, são bastante regulados. Todos os processos ocorrem em sala limpa classe ISO 3 definida pela ABNT NBR/ISO 14644:2004, com temperatura, umidade, pressão e nível de partículas em suspensão controlados.

3.2 Amostragem

A amostragem foi realizada com a periodicidade de 4 meses entre coletas, durante o período de 1 ano, totalizando 3 amostras, para que fossem

realizadas as análises de repetibilidade do processo de tratamento do efluente líquido. Para a coleta foi utilizado recipiente de polietileno de alta densidade (PEAD), com capacidade de armazenamento de 5 L, previamente limpo com Água Reagente Tipo I (ASTM D1193 2018) para minimizar a possibilidade de contaminações cruzadas. Amostras do efluente foram retiradas diretamente na porção superficial de saída de um tanque de sedimentação primário anexado na saída de efluentes de Z1 e Z2 do equipamento de BSG, conforme o Ponto de Coleta da Figura 5. Este tanque tem a função de acumular grandes partículas, detritos dos *wafers* e outros corpos que possam se soltar durante o processo de lixamento e que acabariam indo parar na tubulação que leva à estação de tratamentos de efluentes da fábrica.

Figura 5 - Esquema do ponto de retirada de amostras



Fonte: autoria própria, 2022.

3.3 Tratamento e análises

A etapa de tratamento proposto consistiu em um primeiro processo de separação sólida realizado utilizando-se centrifugação para a retirada dos sólidos maiores, em 4500 rpm pelo tempo de 10 min. Outras rotações e tempos foram utilizados, não sendo perceptível visualmente a mudança na separação. Em seguida foi realizada microfiltração em membrana de nitrato de celulose com 0,45 μm de abertura. Para a filtração foi utilizada uma bomba de vácuo, kitassato e funil de Buchner. Após as duas

etapas de tratamento, o fluido foi analisado quanto à granulometria de partículas presentes via análise a laser, alcalinidade total, cloretos, condutividade, dureza, ferro total, pH, sílica total e sólidos totais. As análises seguiram a metodologia adequada à mensuração de cada parâmetro, conforme Eaton, Rice e Baird em *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (2017). As amostras, também, passaram por análise de fluorescência de raios X qualitativa (FRX) para identificação de espécies químicas elementares presentes.

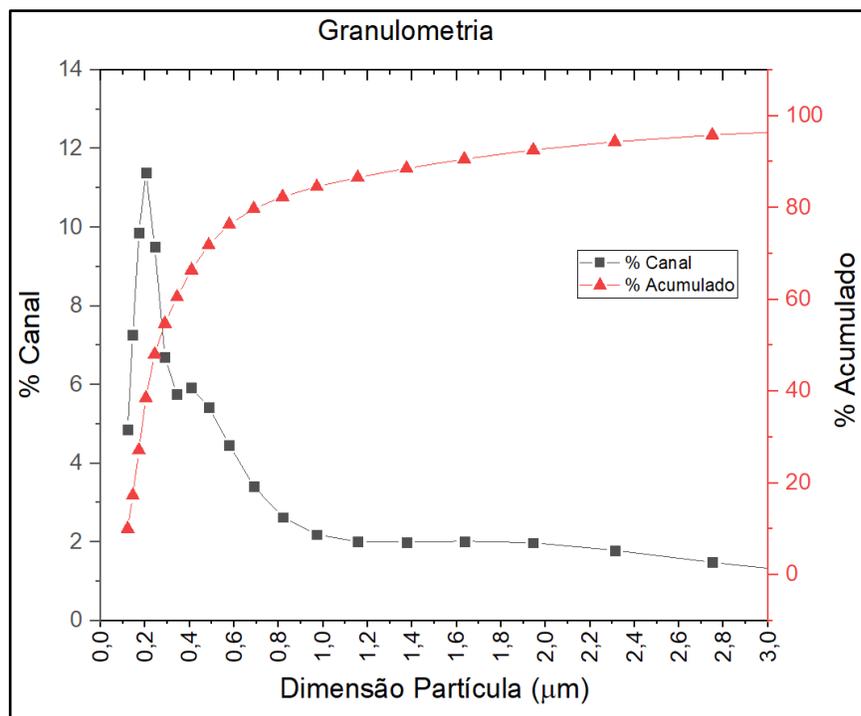
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Cada amostra foi analisada em triplicata para cada um dos parâmetros, em que foi apresentada a média entre as triplicatas e as 3 amostragens realizadas a cada 4 meses.

A análise química elementar por FRX identificou apenas composição majoritária para o silício, não sendo possível detectar nenhum outro elemento químico presente, como esperado.

A Granulometria a laser dos sólidos suspensos no efluente líquido, antes do tratamento completo, apresentou 80% dos particulados abaixo de 700 nm (Figura 6), e após o tratamento completo não conseguiu identificar partículas em suspensão, apesar de seu limite inferior de detecção ser de 25 nm. Este resultado apresenta uma boa eficiência no processo de separação sólido-líquido, apesar das reduzidas dimensões das partículas, que dificultam a retirada sem a utilização de produtos químicos.

Figura 6 - Granulometria a laser do Efluente líquido Bruto



Fonte: autoria própria, 2022.

Foram realizadas análises de composição físico-química conforme os parâmetros requisitados pelo equipamento que realiza o lixamento BSG, seguindo-se os métodos constantes na Tabela 1, comparando-se os requisitos da fábrica quanto à qualidade da Água DI de entrada do processo de lixamento e o efluente líquido após ser tratado. Também foi realizado um comparativo entre o fluido tratado e os requisitos do manual do equipamento que faz o processamento dos *wafers* dentro da fábrica.

Se forem considerados os requisitos da Água DI gerada no setor de utilidades da fábrica, parâmetros

como cloretos, condutividade, dureza, pH e sílica não atingem as exigências, embora já estejam bem próximos dos valores-alvo. Entretanto, deve-se considerar que a Água DI é gerada com parâmetros que são necessários em mais de uma aplicação na fábrica, e podem ter qualidade maior que a necessária ao processo de lixamento dos *wafers* (BSG). Isto é evidente quando são observados os parâmetros requisitados pelo equipamento de BSG, em que a maioria dos parâmetros são atendidos, e os únicos fora da faixa de aplicação são o pH e a sílica.

Desse modo, o retorno da água tratada no processo

pode ser viável, devendo haver uma pequena parcela de renovação do fluido, por meio da inserção de cerca de 9,76% (calculado para corrigir o teor de Si) de Água DI. Assim, diluindo a água tratada pela rota tecnológica proposta com a de maior teor de pureza da fábrica (ADI), é possível reduzir concentrações de silício, entrando na faixa de parâmetros requisitados pelo equipamento na

entrada do processo. Deste modo, haveria a economia de 76,7 L de água DI por *wafers*, o que corresponde a mais de 90% de economia no processo e de consumo das fontes de água dos mananciais que abastecem a cidade. Ao se considerar ainda o rendimento da purificação da água de consumo em ADI, a economia é ainda maior, devido às perdas nesse processo.

Tabela 1- Parâmetros de análise do fluido tratado

Parâmetro	Alcalinidade Total	Cloretos	Condutividade (à 25°C)	Dureza Total	Ferro Total	pH	Sílica Total	Sólidos Totais
Método	<i>Standard Methods</i> 2320 B	<i>Standard Methods</i> 4500 Cl-B	<i>Standard Methods</i> 2510 B	<i>Standard Methods</i> 2340 C	<i>Standard Methods</i> 3111 B	NBR 9251: 1986	<i>Standard Methods</i> 4500 SiO ₂ D	<i>Standard Methods</i> 2540 B
Unidade	mg/L CaCO ₃	mg/L Cl ⁻	µS/cm	mg/L CaCO ₃	mg/L Fe	---	mg/L SiO ₂	mg/L
Água DI	30	5	1	1	0,1	6,5 - 8,5	1	1
Água Tratada	5±2,9	13±5	4,16±1,4	3,7±2,7	<0,126	4,6±0,7	55,3±6	0,071±0,026
Requisitos BSG	100	50	300	200	1,0	6,5 - 7,5	50	Filtro #30

Fonte: autoria própria, 2022

Em geral, a preocupação com estes parâmetros se dá nas atividades de manutenção, nas quais os compostos presentes no efluente líquido, e que alteram a alcalinidade, dureza, ferro e a própria sílica, acabam acumulando nos encanamentos, nos bicos de limpeza que injetam a água DI para retirada dos resíduos sólidos, acarretando mais paradas para manutenção. De outro modo, acúmulo de materiais nas superfícies de contato, constituídas pelas mesas e garras manipuladoras do equipamento, poderiam acabar comprometendo a qualidade superficial dos *wafers*.

O efluente bruto também foi avaliado em questão da quantidade de sólidos totais e turbidez, sendo comparado à água tratada, após cada etapa de tratamento. A redução na quantidade de sólidos totais foi de 1398 ppb para 71 ppb, o que acarreta uma retenção de 95,63% dos sólidos. De outro lado, a redução da turbidez foi de 15.080 NTU no efluente bruto, para 1.540 NTU na água tratada, totalizando a diminuição de 89,79% após o tratamento. Para fins comparativos, na etapa intermediária com efluente líquido apenas centrifugado, a amostra apresentou

turbidez de 8200 NTU, sendo o percentual de efetividade apenas da utilização de centrifugação, na alteração da turbidez, de 45% na Unidade de Turbidez Nefelométrica. A Figura 7 mostra a aparência das amostras nas diferentes etapas do tratamento. Na esquerda é possível visualizar o efluente bruto, ao centro o efluente líquido centrifugado e com cor mais clara (à direita) a amostra após as duas etapas do tratamento de centrifugação e filtragem, todas acondicionadas em tubos falcon de 50 mL para referência.

5 CONCLUSÃO

A partir dos resultados foi possível concluir que o tratamento proposto no trabalho tem um grande potencial de aplicabilidade na reciclagem interna da água presente no efluente líquido do processo de lixamento traseiro de *wafers* de silício da indústria de semicondutores, permitindo sua reinserção no processo, de modo que haja ganhos econômicos, sociais e ambientais após a implementação deste, devido à economia de um bem tão precioso que é a água. Pelas características dos

materiais utilizados no processo de fabricação de células fotovoltaicas, esta metodologia poderia ser expandida para outros processos daquela indústria.

A metodologia utilizada para tratar o efluente foi simples e de baixo impacto ambiental, utilizando processos conhecidos, com o objetivo de evitar possíveis fontes de contaminação da água tratada. Dessa forma, foi possível condicionar o efluente líquido gerado pelo processo de lixamento traseiro dos *wafers* de silício na indústria de semicondutores, permitindo seu reuso direto

no processo com mínima diluição utilizando a Água DI da central de utilidades da fábrica. Isso possibilitou a adequação dos parâmetros da máquina e processo de forma eficiente.

Estes itens devem ser avaliados entre as equipes de manutenção e engenharia da fábrica de modo a apreciar as vantagens e desvantagens de utilizar a metodologia para recuperação da água, de modo a não prejudicar a produção e qualidade dos itens processados.

Figura 7 - Aparência das amostras do efluente bruto (esquerda), centrifugado (centro) e após tratamento (direita)



Fonte: autoria própria, 2022.

FINANCIAMENTO DA PESQUISA

Este trabalho foi desenvolvido dentro da Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS) com o suporte do Instituto Tecnológico de Semicondutores (itt Chip), Núcleo de Caracterização de Materiais (NucMat) e do Laboratório de Caracterização e Valorização de Materiais (LCVMat), com apoios financeiros do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq - chamada pública Nº 23/2018) e da HT Micron (empresa parceira na pesquisa).

6 REFERÊNCIAS

- ALLEN S, Hahn MR. Semiconductor wastewater treatment and reuse. **Semiconductors Fabtech** 1999; 9:167–71. VERIFICAR REFERÊNCIA.
- ANDREWS, D. Walking the talk? Sustainability, design, and behaviour change. **All Our Futures 2 conference, Getting real—investing in our future by design**, University of Plymouth, Plymouth, UK, 2009, 15–17 September.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 1193**: Standard Specification for Reagent Water. Philadelphia, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 14001:2015**: Sistemas de gestão ambiental - Requisitos com orientações para uso. Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR/ISO 14644:2004**: Salas limpas e ambientes controlados associados. Rio de Janeiro, 2004.

BRASIL. Ministério da Saúde. Gabinete do Ministro. **Portaria nº 888, de 4 de maio de 2021**. Brasília, 2021. Disponível em: <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/portaria-gm/ms-n-888-de-4-de-maio-de-2021-318461562>. Acesso em: 3 nov. 2021.

CHARFI, A.; JANG, H.; KIM, J. Membrane fouling by sodium alginate in high salinity conditions to simulate biofouling during seawater desalination. **Bioresource Technology**, Coréia do Sul, v. 240, p. 106-114, set. 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960852417302092>. Acesso em: 17 nov. 2022.

CHUANG, S. H.; CHANG, W. C.; CHIOU, Y. T.; SHAO, H. Effect of polymer on membrane fouling index. **Journal of Environment Engineering Management**, 17, p. 351–355, Jan. 2007.

RIO GRANDE DO SUL. Secretaria do Ambiente e Desenvolvimento Sustentável. Conselho Estadual do Meio Ambiente. **Resolução nº 355/2017** - Dispõe sobre os critérios e padrões de emissão de efluentes líquidos para as fontes geradoras que lancem seus efluentes em águas superficiais no Estado do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, RS: Conselho Estadual do Meio Ambiente - CONSEMA, 2017.

DISCO CORPORATION. Instruction Manual. Japan: Disco Corporation, 2017. Disponível em: www.disco.co.jp. Acesso em: 29 jun. 2021.

EATON, A. D.; RICE, E. W.; BAIRD, R. B. **Standard methods for the examination of water and wastewater**. 23rd Edition. American Public Health

Association, American Water Works Association, Water Environment Federation, Washington D.C, 2017.

FERNANDES, J. V. G.; GONÇALVES, E.; ANDRADE, J.C.S; KIPERSTOK, A. Introduzindo práticas de produção mais limpa em sistemas de gestão ambiental certificáveis: uma proposta prática. **Revista Engenharia Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro, jul. 2001.

FERNANDES, J. L.; QUALHARINI, E. L.; FERNANDES, A, S. C.; NÓBREGA, M. J. R. Um estudo da produção mais limpa na gestão ambiental. **Revista Augustus**, Rio de Janeiro, v. 20, n. 39, p. 52-64, jan./jun. 2015.

FILIPPIN, F. **Estado e Desenvolvimento**: a indústria de semicondutores no Brasil. 2016. Dissertação (Mestrado em Economia) – Instituto de Economia, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, 2016.

FUCHS, W.; THEISS, M.; BRAUN, R.; Influence of standard wastewater parameters and pre-flocculation on the fouling capacity during dead end membrane filtration of wastewater treatment effluents, **Separation and Purification Technology**, v. 52, p. 46–52, Nov. 2006.

GUO, T.; ENGLEHARDT, J.; WU, T. Review of cost versus scale: water and wastewater treatment and reuse processes. **Water Science and Technology**, EUA, v. 69, n. 2, p. 223-234, Jan. 2014.

HE, R.; HEYN, W.; THIEL, F.; PÉREZ, N.; DAMM, C.; POHL, D.; RELLINGHAUS, B.; REIMANN, C.; BEIER, M.; FRIEDRICH, J.; ZHU, H.; REN, Z.; NIELSCH, K.; SCHIERNING, G. Thermoelectric properties of silicon and recycled silicon sawing waste. **Journal of Materiomics**, v. 5, n. 1, p. 15–33, 2019.

HENRIQUES, L. P.; QUELHAS, O. L. G. **Produção Mais Limpa**: Um exemplo para sustentabilidade nas organizações. 2007. Disponível em: http://www1.sp.senac.br/hotsites/sigas/docs/20071016_CAS_ProducaoMaisLimpa.pdf Acesso em: 17 nov. 2022.

HOINKIS, J.; PANTEN, V. Wastewater recycling in laundries—From pilot to large-scale plant. **Chemical Engineering and Processing: Process Intensification**, v. 47, n. 7, p. 1159–1164, 2008.

HUANG, C. J.; JIANG, W.; CHEN, C. “Nano Silica Removal from IC Wastewater by Pre-Coagulation and Microfiltration.” **Water Science and Technology**, IWA Publishing, 1 Dez. 2004.

HUANG, C.; CHEN, K. S.; YANG, B. M.; CHANG, C. C. Application of membrane technology on semiconductor wastewater reclamation: A pilot-scale study. **Desalination**, v. 278, n. 1-3, p. 203–210, 2011.

HUTCHESON, J. Ultrapure water: systems for microelectronics. **Filtration & Separation**, Elsevier, 15 jun. 2006. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0015188206708886>. Acesso em: 24 jun. 2021

KIM, A. Water Use in the Semiconductor Manufacturing Industry. *In: The Engineered Environment*. [S.l.], 28 ago. 2016. Disponível em: <https://engineeredenvironment.tumblr.com/post/30464844411/water-use-in-the-semiconductor-manufacturing>. Acesso em: 1 jul. 2021.

LEE, H.; JIN, Y.; HONG, S. Recent transitions in ultrapure water (UPW) technology: rising role of reverse osmosis (ro). **Desalination**, Coreia do Sul, v. 399, p. 185-197, dez. 2016. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0011916416312474#bb0060>. Acesso em: 24 jun. 2021.

LEMOS, A. D.; NASCIMENTO, L. F. A Produção Mais Limpa como Geradora de Inovação e Competitividade. **Revista de Administração Contemporânea**, Curitiba, v. 3, n. 1, jan./abril. 1999.

LIBMAN, V. Water conservation challenges facing the microelectronics industry. **Ultrapure Water Journal**, [S. l.], jul. 2008.

LIN, S. H.; KIANG, C. D. Combined physical, chemical and biological treatments of wastewater containing organics from a semiconductor plant. **Journal of Hazardous Materials**, Taiwan, v. 97, n.

1-3, p. 159-171, fev. 2003. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0304389402002571>. Acesso em: 01 jul. 2021.

LUCAS, M. R. Economia Circular. **Semanário Registo**, 278, set. 2017.

LUQUE, A.; HEGEDUS, S. **Handbook of photovoltaic science and engineering**. Tradução. [s.l.]. John Wiley & Sons Ltd., 2012.

MARTINS, F., FELGUEIRAS, C., SMITKOVA, M., 2018. Fossil fuel energy consumption in European countries. **Energy Procedia**, n. 153, p. 107–111, Oct. 2018. DOI:10.1016/j.egypro.2018.10.050.

MEN, Y.; LIU, X.; ZHANG, T.; XU, X. Novel flue gas waste heat recovery system equipped with an enthalpy wheel. **Energy Conversion and Management**, n. 196, p. 649–663, Sep. 2019. DOI:10.1016/j.enconman.2019.06.026.

OMAR, F. M.; NORULAINI, N.; AHMAD, A. COD Reduction in Semiconductor Wastewater by Natural and Commercialized Coagulants Using Response Surface Methodology. **Water, Air, And Soil Pollution**, Malaysia, v. 195, n. 1-4, p. 345-352, 13 jul. 2008.

SARTI, D.; EINHAUS, R. Silicon feedstock for the multi-crystalline photovoltaic industry. **Solar Energy Materials & Solar cells**, 72, (2002), p27-40. [https://doi.org/10.1016/S0927-0248\(01\)00147-7](https://doi.org/10.1016/S0927-0248(01)00147-7)

SHEIKHOESLAMI R.; AL-MUTAZ, I. S.; KOO, T.; YOUNG, A. Pre-treatment and the effect of cations and anions on prevention of silica fouling. **Desalination**, v. 139, n. 1-3, p. 83–95, 20 Sep. 2001.

THE INTERNATIONAL ROADMAP FOR SEMICONDUCTORS (ITRS). 2013. Semiconductor Industry Association, [s.l.], 2013, Disponível em: <https://www.semiconductors.org/resources/2013-international-technology-roadmap-for-semiconductors-itrs/>. Acesso em: novembro de 2022.

THE INTERNATIONAL ROADMAP FOR SEMICONDUCTORS (ITRS). 2015.

Semiconductor Industry Association, [s.l.], 2015, Disponível em: https://www.semiconductors.org/wp-content/uploads/2018/06/5_2015-ITRS-2.0-Yield-Enhancement.pdf. Acesso em: julho de 2021.

TOMASZEWSKI, P.; CAHN, R.; Jan Czochralski and His Method of Pulling Crystals. **MRS Bulletin**, v. 29, n. 5, p. 348–349, May 2004. DOI: 10.1557/mrs2004.105.

TSENG, S.-F.; LO, C.-M.; HUNG, C.-H. Recycling of dicing and grinding wastewater generated by IC packaging and testing factories-A case study using UF membrane technology. **Journal of Water Process Engineering**, Taiwan, v. 32, n. 4, Dec. 2019.

WANG, Q.; HUANG, N.; CHEN, Z.; CHEN, X.; CAI, H.; WU, Y. Environmental data and facts in the semiconductor manufacturing industry: an unexpected high water and energy consumption situation. **Water Cycle**, v. 4, n. 1, p. 47–54, Mar. 2023.

WU, M.; SUN, D.; TAY, J. H. Process-to-process recycling of high-purity water from semiconductor wafer backgrinding wastes. **Resources, Conservation and Recycling**, Singapore, n. 41, p. 119–132, May 2004. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0921344903001484>. Acesso em: 22 out. 2022.

WU, M.; SUN, D. D. Characterization and reduction of membrane fouling during nanofiltration of semiconductor indium phosphide (InP) wastewater.

Journal of Membrane Science, v. 259, n. 1–2, p. 135–144, Ago. 2005.

YOU, S.-H.; TSENG, D.-H.; GUO, G.-L. A case study on the wastewater reclamation and reuse in the semiconductor industry. **Resources Conservation and Recycling**, v. 32, n. 1, p. 73-81, May 2001. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0921344900000963>. Acesso em: 17 nov. 2022.

ZHAN, M.; LEE, H.; JIN, Y.; HONG, S. Application of MFI-UF on an ultrapure water production system to monitor the stable performance of RO process. **Desalination**, [S.I.], v. 491, p. 114565, Out. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.desal.2020.114565>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0011916420306731>. Acesso em: 22 out. 2022.

ZHANG, X.; YANG, Y.; NGO, H. H.; GUO, W.; WEN, H.; WANG, X.; ZHANG, J.; LONG, T. A critical review on challenges and trend of ultrapure water production process. *Science of The Total Environment*, **Elsevier**, 24 Abr. 2021. Disponível em: www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969721023251. Acesso em: 22 out. 2022.

ZHONG, R.; CHIEN, A. C. Drought in Taiwan Pits Chip Makers Against Farmers. **The New York Times**, Nova Iorque, 8 abr. 2021. Disponível em: <https://www.nytimes.com/2021/04/08/technology/taiwan-drought-tsmc-semiconductors.html>. Acesso em: 17 nov. 2022.