



Universidade Federal da Paraíba
Centro de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica
Mestrado-Doutorado



**SUPERFÍCIE ABSORVEDORA SOLAR A BASE DE CROMO: UM
ESTUDO DA EMISSÃO DE GASES DE EFEITO ESTUFA
ASSOCIADO AOS SEUS PROCESSOS DE FABRICAÇÃO**

por

Valeska Lisandra de Menezes

*Tese de doutorado apresentado à Universidade Federal da Paraíba
para obtenção do grau de Doutora.*

VALESKA LISANDRA DE MENEZES

**SUPERFÍCIE ABSORVEDORA SOLAR A BASE DE CROMO: UM
ESTUDO DA EMISSÃO DE GASES DE EFEITO ESTUFA
ASSOCIADO AOS SEUS PROCESSOS DE FABRICAÇÃO**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal da Paraíba, em cumprimento às exigências para obtenção do Grau de Doutora.

Orientadora: Prof^a. Dra. Kelly Cristiane Gomes

Coorientadora: Prof^a. Dra. Monica Carvalho

M543s Menezes, Valeska Lisandra de.

Superfície absorvedora solar a base de cromo : um estudo da emissão de gases de efeito estufa associado aos seus processos de fabricação / Valeska Lisandra de Menezes. - João Pessoa, 2022.

127 f. : il.

Orientação: Kelly Cristiane Gomes.

Coorientação: Monica Carvalho.

Tese (Doutorado) - UFPB/CT.

1. Superfície absorvedora solar. 2. Magnetron Sputtering. 3. Avaliação do Ciclo de Vida - ACV. 4. Eletrodeposição. I. Gomes, Kelly Cristiane. II. Carvalho, Monica. III. Título.

UFPB/BC

CDU 621.383.51(043)

Superfície absorvedora solar a base de cromo: um estudo da emissão de gases de efeito estufa associado aos seus processos de fabricação

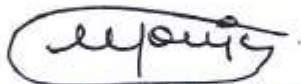
por

Valeska Lisandra de Menezes

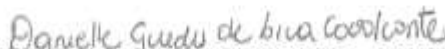
*Tese aprovada em 29 de abril de 2022
Período letivo 2022.1*



Profa. Dra. KELLY CRISTIANE GOMES DA SILVA
Orientadora



Profa. Dra. MONICA CARVALHO
Coorientadora



Profa. Dra. DANIELLE GUEDES DE LIMA CAVALCANTE
Examinadora Interna



Prof. Dr. LUIZ MOREIRA COELHO JÚNIOR
Examinador Interno



Profa. Dra. ANDRÉA OLIVEIRA NUNES
Examinadora Externa



Prof. Dr. CARLOS EDUARDO KEUTENEDJIAN MADY
Examinador Externo

AGRADECIMENTOS

À Deus, por me permitir continuar A VIDA na Terra, minha fonte inesgotável de esperança, amor e perseverança: “Pai, tu sempre disseste ao meu coração que eu chegaria AQUÍ”.

Aos meus Pais, Menezes e Lêda. Obrigada por tanto amor e dedicação!!!

À Washington David, meu muito obrigada por tanta renúncia. Vamos em frente, eu consegui!

E ao meu filho, Nathan. Ah, meu filho!!!... Tu és minha continuidade, meus olhos, meu coração.

À minhas orientadoras Profa. Dra. Kelly Cristiane Gomes e Profa. Dra. Monica Carvalho por terem acreditado na conclusão do meu doutorado. É um grande privilégio e honra ter sido orientada por duas brilhantes cientistas.

Aos meus amigos e colegas, em especial Roberta de Lourdes, a de sempre, companheira, amiga fiel, meu exemplo de força. Amiga, tu és um ser especial!

Ao Laboratório de Biomaterias (LABIO), ao Laboratório de Tecnologia de Novos Materiais (TECNOM) e ao Laboratório de Filmes Finos (LabFilm) por conceder acesso para a realização dessa pesquisa.

Aos professores que compõe o corpo docente do PPGEM-UFPB pelos ensinamentos ao longo de todos esses anos.

Ao CNPQ pelo apoio financeiro durante a vigência desse curso.

SUPERFÍCIE ABSORVEDORA SOLAR A BASE DE CROMO: UM ESTUDO DA EMISSÃO DE GASES DE EFEITO ESTUFA ASSOCIADO AOS SEUS PROCESSOS DE FABRICAÇÃO

RESUMO

As superfícies absorvedoras solares (SAS) aumentam a absorção da radiação solar e reduzem as perdas térmicas por emissão, e algumas etapas de seu ciclo de vida necessitam de grandes quantidades de energia. Considerando as preocupações com as mudanças climáticas, este trabalho tem como objetivo produzir superfícies absorvedoras solares, quantificar e comparar as emissões de gases de efeito estufa (GEE) associadas ao seu processo de obtenção com aplicação do Cromo Negro (Cr_xO_y). Para mapear a estrutura do campo de conhecimento foi feita uma revisão bibliométrica e de redes utilizando o software *VosViewer*. Utilizou-se a metodologia da Avaliação de Ciclo de Vida e o método de avaliação de impacto ambiental IPCC 2013 GWP 100a para determinar as emissões de GEE. A partir de dados experimentais obtidos nos laboratórios LABFILM e LACOM (UFPB) estudou-se a técnica de deposição *Magnetron Sputtering* e comparou-se a técnica da Eletrodeposição. As avaliações foram feitas em processos de fabricação que apresentaram SAS com absorvidade superior a 90%. Quatro tipos de tratamento de substrato foram estudados. O estudo é pioneiro na produção de SAS e construção de inventários a partir de sua fabricação, quantificando e comparando as emissões de GEE para esses processos de fabricação no Brasil. As emissões das SAS fabricadas por *Sputtering* foram 25,7g CO₂-eq/processo com tratamento de substrato por eletropolimento. As emissões de estudos comparativos de eletrodeposição foram 5,1g e 4,4 g CO₂-eq/processo para o banho 1 e banho 2, respectivamente. Considerando eletrodeposições comparando diferentes tratamentos de substrato, as emissões foram 1,0 2,7 12,9 e 49,79g CO₂-eq/processo, respectivamente para hexano, ácido cítrico, eletropolimento, e tratamento térmico. Quando o *Sputtering* foi realizado com tratamento de substrato com isopropanol, hexano e eletropolimento, as emissões foram 15,2 7,2 e 19,1g CO₂-eq/processo. A limpeza de substrato por tratamento térmico foi o responsável pela maior porção de emissões, devido ao uso intenso de

eletricidade. Observou-se que os filmes depositados em substratos eletropolidos apresentaram as maiores absorções solares ($\geq 95\%$), porém emissões mais altas que os tratamentos com hexano, álcool isopropílico e ácido cítrico.

Palavras chave: Superfície Absorvedora solar, *Magnetron Sputtering*, Eletrodeposição, ACV.

GREENHOUSE GAS EMISSIONS ASSOCIATED WITH THE MANUFACTURE PROCESSES OF CHROMIUM-BASED SOLAR SELECTIVE SURFACES.

ABSTRACT

Solar absorber surfaces (SAS) increase the absorption of solar radiation and reduce thermal losses by emission, and some stages of their life cycle require large amounts of energy, including thermal. Considering the concerns about climate change, this work aims to produce solar absorber surfaces, quantify and compare the greenhouse gas (GHG) emissions associated with their obtaining process with Black Chrome (Cr_xO_y) application. To map the structure of the knowledge field, a bibliometric and network review was performed using the VosViewer software. The Life Cycle Assessment methodology and the IPCC 2013 GWP 100a environmental impact assessment method were used for determining GHG emissions. From experimental data obtained in the LABFILM and LACOM laboratories (UFPB) deposition techniques Sputtering were studied and the electrodeposition technique was compared. The evaluations were done in manufacturing processes that presented SAS with absorptivity higher than 90%. Four types of substrate treatment were considered. The study is pioneering in the production of SAS and the construction of inventories from their manufacture, quantifying and comparing GHG emissions for these manufacturing processes in Brazil. Emissions from SAS fabricated by Sputtering were 25,7g CO₂-eq/process with substrate treatment by electropolishing. Emissions from comparative electrodeposition studies were 5,1g and 4,4g CO₂-eq/process for bath 1 and bath 2, respectively. Considering electrodepositions comparing different substrate treatments, the emissions were 1,0 2,7 12,9 and 49,79g CO₂-eq/process, respectively for hexane, citric acid, electropolishing, and heat treatment. when sputtering was performed with substrate treatment with isopropanol, hexane, and electropolishing, the emissions were 15,2 7,2 and 19,1g CO₂-eq/process. Substrate cleaning by heat treatment accounted for the largest portion of emissions, due to the heavy use of electricity. It was observed that films deposited on

electropolished substrates had the highest solar absorptions ($\geq 95\%$), but higher emissions than treatments with hexane, isopropyl alcohol, and citric acid.

Keywords: Solar absorber surfaces, *Magnetron Sputtering*, Electrodeposition, LCA.

SUMÁRIO

CAPÍTULO I - APRESENTAÇÃO.....	15
1.1 INTRODUÇÃO.....	15
1.2 OBJETIVO GERAL.....	18
1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	18
CAPÍTULO II - REFERENCIAL TEÓRICO.....	19
2.1 INTRODUÇÃO.....	19
2.2 COLETORES SOLARES.....	22
2.2.1 Superfícies absorvedoras solares - SAS.....	25
2.2.2 Técnicas de fabricação de superfícies absorvedoras solares.....	26
2.2.2.1 Magnetron Sputtering.....	27
2.2.2.2 Deposição eletroquímica – Eletrodeposição.....	29
2.2.3 Materiais usuais: Cromo negro.....	30
2.2.4 Tratamento superficial de substrato.....	32
2.3 AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA - ACV.....	33
CAPÍTULO III - MATERIAL E MÉTODOS.....	43
3.1 REVISÃO BIBLIOMÉTRICA.....	43
3.2 PROCESSOS DE FABRICAÇÃO DAS SUPERFÍCIES ABSORVEDORAS SOLARES (SAS).....	48
3.3 ACV DAS SAS PRODUZIDAS – DEFINIÇÃO DO OBJETIVO E DO ESCOPO, E ANÁLISE DE INVENTÁRIO.....	51
3.3.1 Definição de objetivo e escopo.....	52
3.3.2 ANÁLISE DE INVENTÁRIOS DE CICLO DE VIDA DAS SAS PRODUZIDAS.....	53
3.4 ACV SAS DA LITERATURA.....	55
3.4.1 Definição de objetivo e escopo SAS da Literatura.....	56

3.4.2	Inventário de ciclo de vida das SAS dos outros autores	63
-------	--	----

CAPÍTULO IV - RESULTADOS E DISCUSSÕES73

4.1	REVISÃO BIBLIOMÉTRICA	73
-----	-----------------------------	----

4.2	ABSORTIVIDADE DAS SUPERFÍCIES ABSORVEDORAS SOLARES PRODUZIDAS	86
-----	--	----

4.3	AVALIAÇÃO DE IMPACTO DO CICLO DE VIDA E INTERPRETAÇÃO DAS SAS PRODUZIDAS	90
-----	---	----

4.3.1	ACV das SAS produzidas no estudo por Magnetron Sputtering	91
-------	---	----

4.4	AVALIAÇÃO DE IMPACTO CICLO DE VIDA E INTERPRETAÇÃO DAS SAS DE OUTROS AUTORES (SPUTTERING X ELETRODEPOSIÇÃO)	93
-----	--	----

4.4.1	Quantificação e comparação das SAS da literatura com SAS do estudo por Magnetron Sputtering	93
-------	--	----

4.4.2	Quantificação e comparação das SAS da literatura com SAS do estudo por Eletrodeposição.....	95
-------	--	----

CAPÍTULO V103

5.1	CONCLUSÕES.....	103
-----	-----------------	-----

5.2	CONTRIBUIÇÕES DA TESE.....	105
-----	----------------------------	-----

5.3	SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS.....	105
-----	------------------------------------	-----

REFERÊNCIAS.....106

LISTA DE FIGURAS

Figura 2. 1 - Coletor solar de placa plana	22
Figura 2. 2 - Processo de bombardeamento na técnica Pulverização Catódica.....	28
Figura 2. 3 - Célula eletrolítica.....	30
Figura 2. 4 - Eletropolimento	33
Figura 2. 5 - Abrangência da Avaliação do Ciclo de Vida	35
Figura 3. 1 - Fluxograma detalhado dos procedimentos experimentais	43
Figura 3. 2 – Etapas da revisão bibliométrica	44
Figura 3. 3 – Fluxograma das etapas do processo de fabricação dos filmes do estudo	49
Figura 3. 4 - Fluxogramas do processo de fabricação das SAS do estudo.....	53
Figura 3. 5 - Fluxograma do processo de fabricação SAS por eletrodeposição	58
Figura 3. 6 - Fluxograma do processo de fabricação SAS por <i>Magnetron Sputtering</i>	59
Figura 3. 7 - Fluxograma do processo de fabricação SAS	60
Figura 3. 8 - Fluxograma do processo de fabricação SAS	62
Figura 4. 1 - Áreas temáticas com maiores números de publicação.....	75
Figura 4. 2 - Evolução no decorrer dos anos da amostra de 8875 documentos com os termos gerais “Solar” e ”ACV”	76
Figura 4. 3 - Evolução por ano do número de publicações da amostra de 823 documentos	77
Figura 4. 4 - Evolução do número de publicações nos países no mundo de acordo com amostra de 823 documentos, foco em Solar x ACV	77
Figura 4. 5 – Gráfico de redes de coautoria entre países do mundo	78
Figura 4. 6 - Rede cocitação de palavras chaves baseadas em texto dos artigos da amostra de 823 documentos	79
Figura 4. 7 - Rede densidade de cocitação de palavras chaves baseadas em título, palavras chaves e <i>abstract</i>	80
Figura 4. 8 – Dados da amostra de 36 documentos, autores, título, ano e fonte	83

Figura 4. 9 - Dados dos 11 documentos analisados (autores, título, assunto do artigo baseado no resumo)	84
Figura 4. 10 – Dados da amostra de 9 documentos (autores, ano, título)	85
Figura 4. 11 - Nome dos nomes dos autores e número de publicações da amostra de 9 artigos	86
Figura 4. 12 - Espectro de absorção para os diferentes filmes absorvedores depositados por meio da técnica de pulverização catódica.....	87
Figura 4. 13 - Média da absorção e desvio padrão dos filmes absorvedores depositados por meio da técnica de pulverização catódica.....	88

LISTA DE TABELAS

Tabela 2. 1 – Absortividades totais e comparação entre Cromo negro e MoSiO ₂	31
Tabela 3. 1 – Campos e Termos de busca	45
Tabela 3. 2 – Critérios de busca e seleção de artigos.....	46
Tabela 3. 3 – Parâmetros de deposição	51
Tabela 3. 4 – Inventário do processo de fabricação de SAS utilizando a técnica da <i>Sputtering</i> do estudo	54
Tabela 3. 5 – Inventário do processo de fabricação utilizando banho1 na técnica da Eletrodeposição1 - Medeiros (2020).....	63
Tabela 3. 6 – Inventário do processo de fabricação utilizando banho 2 na técnica da Eletrodeposição 2 - Medeiros (2020).....	65
Tabela 3. 7 – Inventário do processo de fabricação de SAS utilizando a técnica da <i>Sputtering</i> , Medeiros (2020)	67
Tabela 3. 8 – Inventário do processo de fabricação utilizando a técnica da Eletrodeposição – Gonçalves (2020).....	68
Tabela 3. 9 – Inventário do processo de fabricação de SAS utilizando a técnica da <i>Sputtering</i> , Andrade (2020).....	71
Tabela 4. 1 – Strings e seus respectivos resultados de busca na base Scopus realizada em 14 de setembro 2021	73
Tabela 4. 2 - Absortância Solar Média e Desvio Padrão dos Filmes do estudo.....	88
Tabela 4. 3 – Parâmetros de deposição e Absortância Solar Média dos Filmes do estudo .	89
Tabela 4. 4 - Emissões de GEE, parâmetros de deposição e absortividade do processo de fabricação SAS do estudo Medeiros (2020), utilizando a técnica de <i>Magnetron Sputtering</i>	93

Tabela 4. 5 – Emissões de GEE, parâmetros de deposição e absorvidade do processo de fabricação SAS do estudo de Andrade (2020), utilizando a técnica de <i>Magnetron Sputtering</i> ,	94
Tabela 4. 6 - Emissões de GEE, parâmetros de deposição e absorvidade do processo de fabricação SAS do estudo Medeiros (2020), utilizando a técnica de eletrodeposição	95
Tabela 4. 7 - Emissões de GEE, parâmetros de deposição e absorvidade do processo de fabricação SAS do estudo Gonçalves (2020), utilizando a técnica de eletrodeposição com diferentes tipos de tratamento de substrato	97
Tabela 4. 8 - Emissões de GEE e parâmetros de deposição de todos os processos de fabricação dos autores de SAS analisados no estudo das técnicas <i>Sputtering</i> e Eletrodeposição	98
Tabela 4. 9 - Emissões de GEE comparando uso de energia elétrica brasileira x energia fotovoltaica.....	100

LISTA DE SÍMBOLOS

ε – emissividade

α – absorptância

ρ – reflectância

τ – transmitância

λ_c - comprimento de onda de corte

CAPÍTULO I - APRESENTAÇÃO

1.1 INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas e o aquecimento global representam desafios significativos do século 21. Os gases de efeito estufa (GEEs) são uma das principais causas das mudanças climáticas, as organizações se deparam cada vez mais com a tarefa de quantificar e reduzir a quantidade de GEEs que são emitidos por meio de suas atividades, produtos e serviços.

Os desenvolvimentos sociais e econômicos resultam em uma demanda global de energia em mais de um quarto, impulsionada principalmente pelos países em desenvolvimento. De acordo com o relatório divulgado pela “Agência Internacional de Energia” (IEA) em 2018, o atendimento à demanda de energia não é plausível para o cumprimento das metas climáticas, a menos que políticas e ações eficientes sejam executadas para o emprego de fontes alternativas de energia livres de carbono (IEA, 2018; INGRAO *et al.* 2018, LONI *et al.*, 2017, GORJIAN *et al.* 2015). Na maioria dos casos, um aumento na participação das energias renováveis na matriz energética pode mitigar significativamente os impactos destrutivos e proporcionar grandes benefícios (ARKIAN *et al.*, 2019; GORJIAN *et al.* 2014).

As fontes renováveis de energia muitas vezes são apresentadas como fontes limpas, desconsiderando os impactos ambientais relacionados à sua fabricação. A produção das plantas renováveis, como todo processo produtivo, acarreta um consumo de energia e matéria-prima, além da liberação de poluentes. Em programas europeus, antes de os sistemas de energia inovadores serem introduzidos no mercado, a melhoria do desempenho ecológico dos produtos é um ponto-chave (COMMISSION OF THE EUROPEAN COMMUNITIES – COM, 2001a). Por outras palavras, os problemas ambientais globais só podem ser resolvidos se o uso da energia e das matérias-primas por unidade de produto for reduzido, ou seja, aumentada a eco-eficiência (ALTUN-ÇİFTÇIOĞLU *et al.*, 2016). Depois que um produto é colocado no mercado, há relativamente pouco que pode ser feito para melhorar suas características ambientais.

Dentre as várias fontes de energias renováveis, a energia solar é uma fonte abundante e ecológica de energia renovável com potencial na maioria das regiões do mundo. Algumas novidades marcantes que ocorreram nas tecnologias solares tornaram a energia solar uma alternativa competitiva para os combustíveis convencionais baseados em carbono (HASSANIEN *et al.* 2016; HOSSEINI *et al.* 2018). Apesar do forte potencial de aproveitamento da energia solar no Brasil, essa tecnologia ainda está tímida na matriz energética brasileira (CARVALHO; DELGADO, 2017), principalmente pelos elevados custos de capital envolvidos e baixos valores de eficiência.

A conversão da energia solar ocorre nas principais formas de energia química, elétrica e térmica por meio de tecnologias de conversão. Principalmente, a radiação solar pode ser aproveitada por duas tecnologias em constante evolução, a solar térmica e a solar fotovoltaica (PV). Nas tecnologias térmicas solares, a radiação solar é convertida em calor usando coletores térmicos (GORJIAN *et al.*, 2020). Salvi *et al.* (2018) mencionam que a absorção aprimorada de radiação solar por coletores solares, por exemplo, aumentará a eficiência e promoverá a adoção generalizada; os coletores solares também podem se beneficiar de uma resistência aprimorada a altas temperaturas ao longo de sua vida útil.

O aumento da absorção da radiação solar pelos coletores solares, resistindo a elevadas temperaturas durante uma vida útil compensadora à implantação do sistema, é o aspecto de elevada relevância a ser observado. Os revestimentos seletivos solares melhoram a eficiência dos coletores solares devido à sua resposta óptica otimizada: alta absorção solar e baixa emissão térmica (SÁNCHEZ-CRUCES *et al.*, 2014). Os revestimentos atualmente empregados em coletores solares para aplicações de média e alta temperatura (usinas termo-solares) são referidos como superfícies seletivas ou absorvedores seletivos (ATKINSON *et al.*, 2015; EVANGELISTI *et al.*, 2019). É possível melhorar a eficiência desses revestimentos reduzindo as perdas relacionadas às trocas de calor e otimizando a conversão foto térmica de energia, por exemplo (EVANGELISTI *et al.*, 2019).

Contudo, diante dos problemas ambientais globais enfrentados, reduzir o impacto ambiental em todo o seu ciclo de vida, desde a extração de matéria prima até o seu descarte, contribui com a redução do uso da energia e das matérias-primas por unidade de produto, sendo considerado eco-eficiência. Ardente *et al.* (2005) consideram que a avaliação ambiental de todo processo de fabricação dos produtos contribui com a busca da melhoria do eco desempenho. A aplicação da metodologia Avaliação do Ciclo de Vida (LCA) a novas superfícies seletivas que maximizam a eficiência do coletor solar pode ajudar a promover o

desenvolvimento de novas tecnologias de energia renovável com melhor desempenho ambiental.

Para Carvalho *et al.* (2016), o conceito geral de eco-eficiência envolve a extração do máximo potencial de materiais e energia (uso eficiente), com a consequente minimização de cargas ambientais e custos monetários (melhor uso dos recursos naturais equivale a usar menos e emitir menos, com menos custos). Uma redução nas cargas ambientais só pode ser confirmada após a quantificação. Nas últimas décadas, a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) consolidou-se como uma das metodologias mais adequadas para o alcance dos objetivos de sustentabilidade, validada e consolidada internacionalmente, para avaliar as consequências ambientais de produtos e serviços por meio da compilação de fluxos de energia e materiais empregados e resíduos lançados no meio ambiente (CURRAN, 1999; BJØRN *et al.*, 2018). As ACVs foram desenvolvidas para as mais diversas aplicações, com foco especial na comparação de recursos de energia renovável e seus equivalentes de combustíveis fósseis.

Estudos sistemáticos acerca da utilização da ACV nos processos de fabricação de superfícies seletivas ou de filmes absorvedores mostram uma importante contribuição e inovação, assim como a adaptação de processos já presentes em inventários (EHRMANN; REINEKE-KOCH, 2006; MARTINS, 2010; SANI *et al.*, 2012; JOLY *et al.*, 2013; ROUMPEDAKIS *et al.* 2020).

Devido à variabilidade nos materiais da superfície solar e nas técnicas de fabricação, e considerando a busca por um melhor desempenho ambiental, este estudo trata-se de um trabalho de pesquisa experimental em escala de laboratório com foco nos processos de fabricação de cromo preto (Cr_xO_y) de superfícies absorvedoras solares obtidas pela técnica de deposição *Magnetron Sputtering*. O objetivo geral do estudo é produzir e caracterizar superfície absorvedora solar a base de cromo utilizando a técnica de deposição *Magnetron Sputtering*, quantificando e comparando as emissões de gases de efeito estufa (GEEs) com a técnica eletrodeposição.

1.2 OBJETIVO GERAL

Produzir superfície absorvedora solar a base de cromo (Cr_xO_y) pela técnica de deposição *Magnetron Sputtering*, com a finalidade de avaliar e comparar as emissões de gases de efeito associadas ao processo de fabricação, utilizando a metodologia da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV).

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos desse trabalho são:

- 1) Mapear a estrutura do campo de conhecimento da pesquisa através de revisão sistemática de literatura e análise de redes;
- 2) Obter superfícies absorvedoras solares a base de cromo, avaliando o efeito dos parâmetros de deposição na absorvidade das superfícies;
- 3) Quantificar as emissões de gases de efeito estufa nas superfícies absorvedoras produzidas, utilizando a metodologia de ACV;
- 4) Quantificar as emissões de gases de efeito estufa nas superfícies absorvedoras da literatura, utilizando a metodologia de ACV;
- 5) Comparar as superfícies obtidas com as superfícies da literatura em termos de absorvidade e emissão de gases do efeito estufa em diferentes processos produtivos (Sputtering e eletrodeposição).

CAPÍTULO II - REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 INTRODUÇÃO

Pesquisas têm sido realizadas para encontrar diversos substitutos ecologicamente corretos e eficientes para o mercado de energia convencional, considerando suas fontes finitas e seus impactos ambientais (MALINAUSKAITE *et al.*, 2020; JOUHARA; OLABI, 2018; ABDELKAREEM *et al.*, 2020a).

O esgotamento das reservas de energias não renováveis, veio à tona desde o final da década de 1990, a discussão sobre a redução da emissão de dióxido de carbono (CO₂) na atmosfera. Para os próximos 50-100 anos é necessária uma redução de aproximadamente 50% na emissão de gases que provocam o efeito estufa (WEISS; ROMMEL, 2008).

A crescente evidência de problemas ambientais é devida a uma combinação de vários fatores, tais como o aumento da população mundial, do consumo de energia e das atividades industriais. Logo, atingir soluções para os problemas ambientais que a humanidade enfrenta hoje requer ações potenciais de longo prazo para o desenvolvimento sustentável (KALOGIROU, 2004).

A enorme dependência de combustíveis fósseis e o abuso maciço deles em quase todos os setores da vida desenvolveram uma série de problemas ambientais perigosos, um levando a outro, como a seca da terra (JOHN A.; KIL SEONG, 1980; GIORGOS, 2008), ondas de calor, incêndios florestais, aumento do nível do mar, inundações e outros fenômenos climáticos extremos (SARIA *et al.*, 2018; T. *et al.*, 2014; ANDREW H. E PIERRE, 2015).

Esforços significativos foram realizados para melhorar a eficiência dos sistemas de conversão de energia atuais (ELSAID *et al.*, 2020d; OLABI *et al.*, 2020a; BROUGH *et al.*, 2020; OLABI *et al.*, 2020b), produzindo sistemas de conversão de energia eficiente (OLABI *et al.*, 2020c; SAYED *et al.*, 2020; ABDELKAREEM *et al.*, 2020b; ABDELKAREEM *et al.*, 2020c), e / ou contando com fontes de energia renováveis (ABDELKAREEM *et al.*,

2018), como a energia eólica (MAHMOUD *et al.*, 2020), solar térmica (REZK *et al.*, 2019a), solar fotovoltaica (SOULIOTIS *et al.*, 2018; FATHY *et al.*, 2019; AHMAD *et al.*, 2020), geotérmica (OLABI *et al.*, 2020d), hidro (WILBERFORCE *et al.*, 2019a ; SOUDAN, 2019) e biomassa energia (INAYAT *et al.*, 2019 ; NASSEF *et al.*, 2019 ; ABDELKAREEM *et al.*, 2019 ; MALINAUSKAITE *et al.*, 2017).

Uma grande parte desses esforços elevou os sistemas de energia renovável a um nível que encorajou os países desenvolvidos a trabalhar na transformação de sua matriz energética atual em mais energias renováveis, e clamando por uma redução global das emissões de carbono. Enormes decisões geopolíticas e, especificamente, o Acordo de Paris apelaram a uma redução mundial das emissões de carbono, para efetivamente atingir grandes objetivos e limitar suficientemente os efeitos negativos (IRENA, 2017).

O relatório de estatísticas da Agência Internacional de Energia Renovável (IRENA) de 2019 relatou que as energias renováveis, em geral, tiveram um crescimento de 7,4% na capacidade com um aumento de capacidade líquida de 176 GW em 2019, dos quais 54% sendo instalados apenas na Ásia, sendo 90% deles novas capacidades de energia solar e eólica (IRENA, 2020a; IRENA, 2020b). As energias renováveis estão dominando a nova instalação de energia atingindo cerca de 70% em 2019 (DOMÍNGUEZ *et al.*, 2020; KIMMELL *et al.*, 2020).

Neste contexto, torna-se necessária a exploração de fontes alternativas e renováveis de energia, com destaque para o aproveitamento da energia solar incidente em nosso planeta. Assim, uma fonte de energia segura, eficiente, e necessária para uma sociedade sustentável e saudável (NADARAJAH; DIVAGAR, 2016; CLAUDIA; CINZIA, 2018; ELSAID *et al.*, 2020a; ELSAID *et al.*, 2020b; ELSAID *et al.*, 2020c).

A discussão em detalhes dos impactos ambientais de vários sistemas comerciais e emergentes de energia solar são necessários, avaliando seus desempenhos ambientais em todas as etapas, começando com os projetos, depois ao longo de sua fabricação, materiais, fases de construção ou instalação e ao longo da vida útil e desativação. Soluções específicas para a maioria dos sistemas, como minimização de resíduos e reciclagem, estudos do ciclo de vida, uso eficiente da energia necessária as fabricações dos componentes precisam ser discutidas, juntamente com algumas recomendações técnica e ecologicamente favoráveis para mitigar os impactos.

Com uma relevância tão grande dos sistemas de energias renováveis em geral e pelas tecnologias solares em particular, é crucial e essencial tomar os devidos cuidados em relação

ao meio ambiente. Para prevenir quaisquer outros impactos ambientais resultantes dos processos dos sistemas de fornecimento de energia recém-introduzidos, há uma necessidade de estudar o nível de sustentabilidade de tais tecnologias renováveis, avaliação ambiental de cada tecnologia e mitigação de quaisquer impactos ambientais potenciais associados aos sistemas de produção (HASANUZZAMAN; KUMAR, 2020; MIHÁLY *et al.*, 2014; GHENAI *et al.*, 2020).

Contudo, sabe-se que, a superfície da Terra recebe radiação solar direta, que diminui através da atmosfera para uma irradiância superficial máxima normal de aproximadamente 1000 W / m^2 ao nível do mar em um dia claro (DUPONT *et al.*, 2020). Isso coloca o sol como uma fonte de geração de energia massiva e confiável com uma grande vantagem ambiental sobre as fontes convencionais.

A energia solar é uma fonte inesgotável de energia. Isso a torna uma das fontes de energia não convencionais mais promissoras (YOUSIF; ABDULGAFAR, 2020), e se destaca como o recurso de energia abundante na Terra. Aproveitar, aplicando as mais variadas técnicas, processos e materiais tem tornado essa energia um desafio.

Fotovoltaica, aquecimento, resfriamento solar e energia solar concentrada são as formas principais de aplicações de energia que usam a luz solar. Esses sistemas de energia solar usam tecnologias diferentes, coletam diferentes frações do recurso solar e têm diferentes requisitos de localização e capacidades de produção. Estudos confiáveis sobre o recurso solar são necessários para cada aplicação de energia solar (SENGUPTA *et al.*, 2021).

O eficiente aproveitamento direto da energia solar envolve dois processos de conversão principais: a conversão térmica para aquecimentos de fluidos e ambientes, aquecimento de água para uso residencial, geração de vapor para utilização industrial (SANI *et al.*, 2012; BARBOSA CARVALHO, 2018; SANTOS *et al.*, 2018), geração de potência mecânica e elétrica; a conversão elétrica através dos efeitos sobre diversos materiais que incluem os efeitos termoelétrico e fotovoltaico.

Os sistemas que utilizam conversão térmica apresentam-se como uma alternativa menos complexa, de menor custo, e que permite o armazenamento de energia para ser utilizada à noite e em dias onde o céu esteja nublado (GONÇALVES, 2020).

A conversão térmica envolve um variado número de tecnologias todas quais iniciam-se convertendo a luz solar incidente em calor (CAO *et al.*, 2014). Os Sistemas Solares Térmicos (SST), possuem como componente principal o coletor solar térmico, que é um

trocador especial de calor que promove o aquecimento do fluido de interesse (WEISS; ROMMEL, 2008).

2.2 COLETORES SOLARES

Existem basicamente dois tipos de coletores solares: concentradores e não concentradores. Um coletor solar concentrador de rastreamento solar geralmente tem superfícies côncavas para interceptar e focalizar a radiação do feixe solar para uma área de recepção menor, aumentando assim o fluxo de radiação, enquanto que um coletor não-concentrador tem a mesma área para interceptar e absorver radiação solar. (KENNEDY, 2002). Dentre os coletores solares não-concentradores existe o de placas planas, esse será o de interesse do trabalho.

Nesse tipo de coletor, quando a radiação solar passa através de uma cobertura transparente e colide com a superfície absorvente enegrecida de alta absorção, uma grande parte dessa energia é absorvida pela placa e depois transferida para o fluido que circula através da tubulação. A parte inferior da placa de absorção e o lado da caixa são bem isolados para reduzir as perdas por condução (BOGAERTS; LAMPERT, 1983). Este tipo de coletor pode ser visualizado no esquema representado na Figura 2.1.

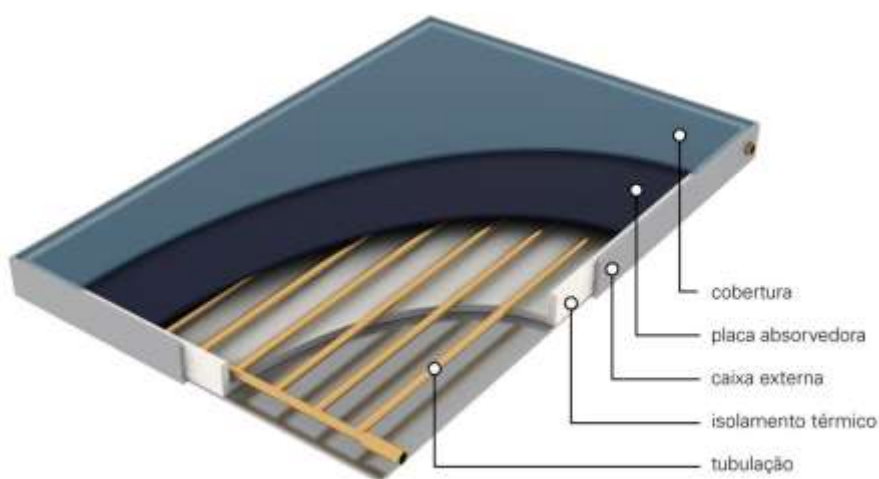


Figura 2. 1 - Coletor solar de placa plana
Fonte: Labeee UFSC, (2011).

Um requisito fundamental de uma coleta térmica eficiente é transformar a radiação solar incidente em energia térmica, minimizando a transferência de calor para o meio ambiente. Um método eficaz para aumentar o desempenho de um coletor é incorporar uma superfície seletiva (espectralmente) de comprimento de onda para o absorvedor.

Os coletores solares planos são considerados equipamento de energia térmica eficientes e de baixo custo. Entre os diferentes componentes de um coletor solar de placa plana, o absorvedor seletivo (superfície seletiva solar) é reconhecido como vital, pois converte a radiação eletromagnética em calor sensível (MURUGESAN *et al.* 2020). A eficiência do coletor solar de placa plana presumivelmente depende das propriedades ópticas do absorvedor seletivo (KUMAR *et al.*, 2013). Um absorvedor solar seletivo ideal deve ter alta absorptância solar, melhor condutividade térmica e baixa emitância térmica (KUMAR *et al.*, 2014).

A conversão da energia solar ocorre nas principais formas de energia química, elétrica e térmica por meio de tecnologias de conversão bem conhecidas (GORJIAN *et al.*, 2020). Os absorvedores seletivos solares são revestimentos feitos de várias combinações de materiais, com microestruturas capazes de absorver fótons incidentes da radiação solar e convertê-los em energia térmica de alta temperatura (KUMAR *et al.*, 2013).

No absorvedor seletivo solar, a porcentagem de energia da luz absorvida pela superfície do filme fino é denominada absorptância solar e a proporção da radiação de energia térmica emitida subsequentemente da superfície do filme fino é chamada de emitância térmica. A seletividade solar dos filmes finos preparados é a relação entre a absorptância solar e a emitância térmica (KUMAR *et al.*, 2013).

A eficiência de conversão fototérmica do absorvedor solar pode ser aprimorada empregando um revestimento espectralmente seletivo que exhibe alta absorção solar em todo o espectro solar (0,3–2,5 μm) e baixa emissividade na região do infravermelho (2,5–25 μm) ((KUMAR *et al.*, 2014; KHELIFA, *et al.*, 2018).

Um revestimento espectralmente seletivo ideal deve exibir uma absorptância " $\alpha = 1$ " na faixa de comprimento de onda solar e emitância " $\varepsilon = 0$ " na região do comprimento de onda infravermelho em altas temperaturas de operação (LIZAMA-TZEC *et al.*, 2019; BARRERA *et al.* 2001; KHELIFA, *et al.*, 2018).

Como as superfícies utilizadas nesse estudo são opacas, isto é, apresentam transmitância nula ($\tau = 0$), a conversão dos dados de reflectância (ρ) em absorptância (α) pode ser obtida conforme a Equação (1):

$$\alpha + \rho + \tau = 1 \rightarrow \alpha + \rho = 1 - \tau \rightarrow \alpha = 1 - \rho - \tau \quad \text{Eq. (1)}$$

Quando o material da superfície é liso e uniforme emprega-se preferencialmente o sufixo –ividade. Logo, uma superfície de cobre polido, por exemplo, se diz que tem absorvidade, refletividade, transmissividade e emissividade. No entanto, para uma superfície qualquer se emprega o sufixo –ância, uma tinta, por exemplo, tem absortância, reflectância, transmitância e emitância (KLÜPPEL, 2017).

Ao longo dos anos, diversos absorvedores seletivos solares baseados em cromo preto (KHELIFA, *et al.*, 2018), níquel preto (LIZAMA-TZEC *et al.*, 2019) e cobalto preto (BARRERA *et al.* 2001) foram investigados quanto à sua viabilidade comercial. Técnicas como a eletrodeposição, pulverização catódica, anodização e deposição química de vapor são adotadas para a produção desses absorvedores seletivos solares (KUMAR *et al.*, 2013; 2014). Assim, a melhoria nas propriedades ópticas da superfície do filme fino é altamente desejável para o desenvolvimento de um absorvedor solar seletivo eficiente (RAHMAN *et al.*, 2016).

Várias abordagens estão disponíveis para obter seletividade para uma superfície, a aplicação em filmes finos, como o cromo negro, é uma dessas (AXELBAUM; BRANDT, 1987). O cromo negro é um revestimento popular na indústria solar, em grande parte porque obtém uma absorção solar entre 92% e 95% consistentemente, enquanto uma emissão hemisférica total (a 100 °C) de 10% ou menor pode ser mantida. Além disso, o cromo negro pode ser termicamente estável até 450 °C em uma variedade de substratos (KENNEDY, 2002; MEDEIROS *et al.*, 2017a).

Apesar da conversão solar térmica apresentar uma boa relação custo-benefício, alguns desafios tecnológicos precisam ser aplicados (INCROPERA, 1992). Um dos pontos mais críticos do campo solar é a baixa eficiência da conversão solar para aplicações de médias (de 100°C a 400°C) e altas temperaturas (acima de 400°C). Estas limitações estão associadas ao fato de que quanto maior for a temperatura do coletor solar, maior será a quantidade de calor emitido por radiação (TABOR, 1961).

A emissão de calor por radiação é um fenômeno de superfície, Tabor (1961), Kokoropoulos *et al.* (1980), Shaffer (1958) e YangWi *et al.* (2013) propuseram que os coletores solares fossem revestidos superficialmente com materiais que fossem bons absorvedores de radiação por outro lado emitissem pouco calor por este mesmo mecanismo.

Estas superfícies caracterizam-se por apresentarem alta absorvidade no espectro solar e baixa emissividade na faixa espectral do infravermelho. Além disso, é necessário que estas superfícies não se degradem significativamente do ponto de vista óptico durante a vida útil do coletor e sejam resistentes à temperatura de estagnação e à umidade. Diversos estudos (OREL *et al.*, 2007; EHRMANN REINEKE-KOCH, 2006; SANI *et al.*, 2012; JOLY *et al.*, 2013; MARTINS, 2010) sobre a seletividade óptica das superfícies seletivas pela combinação de materiais apresentaram características absorvedoras da radiação solar com materiais que exibem baixa emissividade na temperatura de trabalho. Outro aspecto importante está na maneira como os materiais seletivos opticamente são depositados sobre a superfície do coletor solar, buscando obter-se uma superfície homogênea e com uma espessura apropriada a absorção da radiação solar.

Como as superfícies absorvedoras comerciais devem ter absorção superior a 90%, neste trabalho foram considerados processos que obtiveram absorvidade superior a 90%. O termo filme fino e superfície absorvedora solar serão utilizados como sinônimos neste estudo.

2.2.1 Superfícies absorvedoras solares - SAS

A possibilidade prática de superfícies absorvedoras seletivas inicialmente foi mostrada por Tabor (1961). Seus trabalhos foram baseados em camadas de alguns óxidos e sulfetos depositados em um substrato metálico. Uma investigação completa sobre superfícies seletivas foi, porém, intensificada após a crise do petróleo em meados da década de 1970.

Para aplicações em coletores solares que operam em média e alta temperaturas, notadamente aqueles que dispõem de concentradores solares, foram alcançados resultados promissores utilizando-se superfícies seletivas denominadas *Cermets* (VILELA, 1985).

O *Cermet* trata-se de um composto de metal e cerâmica formado por pequenas partículas de metal em uma matriz dielétrica, apresentando alta absorção na região solar, depositado sobre um substrato metálico de alta reflexão na faixa do infravermelho (MARTINS, 2010).

O comportamento seletivo, a uma determinada temperatura, consiste em absorver toda a radiação incidente abaixo de determinado comprimento de onda, tido como o comprimento de onda de corte (λ_c), e não emitir radiação acima deste comprimento de onda,

comportando-se de modo seletivo. Este λc é característico para diferentes materiais e tipos de superfície.

Após a compreensão das propriedades radioativas de uma superfície real, percebe-se que em tecnologias térmicas solares a luz do sol é absorvida como calor no absorvedor. De maneira que, este revestimento deve absorver fortemente a luz do sol, enquanto idealmente perde pouco calor para o ambiente via convecção e radiação. Um filme que tem forte absorção solar e baixa emissão de infravermelho (IR) é chamado absorvedor espectralmente seletivo, ou superfície seletiva. Esta superfície quando integrada com um revestimento antirreflexivo (AR) e uma camada de base refletora IR (um substrato que reflete intrinsecamente a região IR), tem a capacidade de aumentar sua eficiência (CAO *et al.*, 2014).

As superfícies absorvedoras solares podem ser de diferentes tipos, segundo sua constituição química e morfológica. Baseado nessa divisão elas podem ser agrupadas em absorvedor intrínseco, absorvedor-refletor acoplados, multicamadas empilhadas, sistemas de armadilhas ópticas e filmes de materiais compósitos.

Além da busca pela melhor seletividade óptica possível, é fundamental também verificar qual a melhor maneira de realizar a deposição do material em forma de filme sobre o substrato. Para tanto, é necessário que o material apresente propriedades que permitam sua manipulação e se adequem a variedade de técnicas de deposição existente.

2.2.2 Técnicas de fabricação de superfícies absorvedoras solares

Nos últimos anos, tem aumentado o interesse na produção e caracterização de superfícies seletivas de alta estabilidade térmica que apresentam alta absorptância solar (α) e baixa emitância térmica (ϵ). Diferentes técnicas, como pulverização catódica, eletrodeposição, evaporação térmica, spray pirólise, técnicas químicas, pulverização por feixe de íons, etc., têm sido utilizadas para preparar vários revestimentos de alto α e baixo ϵ valores (YOUSIF; ABDULGAFAR, 2020).

De acordo com Kennedy (2002), utilizando a técnica do *Sputtering*, material cromo e silício obteve-se níveis de absorptância (90-96%) e emitância a 100°C (3-14%), com cromo negro, substrato níquel, cobre, e aço, e pelo método da eletrodeposição, níveis de absorptância em torno de 97%, e emitância 9%.

O presente estudo optou pelo emprego da técnica de Pulverização Catódica (do inglês *Magnetron Sputtering*). A escolha se deu, pois, a técnica é adequada para produção em grandes áreas de filmes finos (produção comercial), apresentando uma taxa de deposição relativamente alta e gerando menos poluição ambiental (corroborando com os objetivos do estudo), que os métodos eletroquímicos (ZHANG, 1998). Além de poder ser utilizada em escala laboratorial.

Além disso, com o objetivo de comparar as emissões de GEE dos processos de fabricação, a outra técnica escolhida foi a eletrodeposição, uma vez que o equipamento utilizado é simples e de baixo custo, acessível a produção laboratorial, possui as propriedades ópticas (absortância e emitância) dos filmes obtidos favoráveis, pode ser realizado a temperatura ambiente e a pressão atmosférica, e possui aplicações industriais (PAULA, 2010).

2.2.2.1 *Magnetron Sputtering*

Dentre as técnicas utilizadas na preparação de filmes finos, o *Sputtering*, também chamado de pulverização catódica, tem se destacado nas últimas décadas, por ser uma técnica que não gera resíduo ao final do processo e por garantir um controle satisfatório da morfologia do revestimento, principalmente em seu controle de espessura e homogeneidade, garantindo um maior controle na fabricação final das superfícies seletivas (SELVAKUMAR; BARSHILIA, 2012; MARTINS, 2010).

A técnica de *Sputtering* é bastante empregada industrialmente para a fabricação de revestimentos finos, pois é uma técnica “limpa” (sem resíduos finais) em relação aos processos eletroquímicos, uma vez que estes geram um volume considerável de resíduos (MARTINS, 2010).

A técnica *Magnetron Sputtering* que consiste em um processo de deposição física onde se aplica uma diferença de potencial entre duas placas com geração de elétrons que colidem com as moléculas de gás, ionizando-os. É uma espécie de evaporação a frio do cátodo. Durante uma descarga elétrica através de um gás, pode acontecer a remoção de átomos do cátodo, provocada pelo bombardeio de íons positivos (SOUSA, 2019). No bombardeamento de uma superfície sólida com íons energizados ocasiona o espalhamento de átomos dessa superfície (WASA *et al.*, 2012). A figura 2.2 ilustra como ocorre esse bombardeamento.

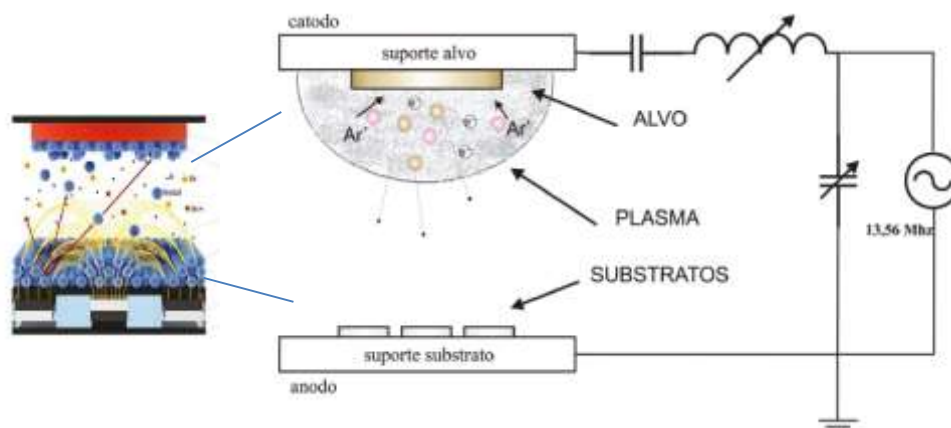


Figura 2. 2 - Processo de bombardeamento na técnica Pulverização Catódica
Fonte: Adaptado de Moura (2010); Guimarães (2017).

O processo de bombardeamento provoca a remoção, isto é, "*Sputtering*", dos átomos alvo, que podem então condensar num substrato como uma película fina (KELLY; ARNELL, 2000).

A fonte de material que será depositado é o alvo, e este é ligado a uma fonte RF (*Radio Frequency*) ou ao polo negativo de uma fonte DC (*Direct Current*), formando assim o cátodo do sistema. O emprego da fonte de potência RF permite a produção de revestimentos a partir de alvos não-condutores. Quanto a posição do substrato, este está localizado em frente ao alvo, onde podem ser aplicadas tensões positivas ou negativas, e submetido a processo de aquecimento ou resfriamento (MARTINS, 2010).

A pressão de base para criar o vácuo, dentro da câmara, para permitir a realização do processo é entre 10^{-6} e 10^{-10} mbar. Em seguida ocorre a inserção de um gás (usualmente o argônio) em um regime de fluxo contínuo a fim de promover o bombardeamento do alvo, isso ocorre até que a pressão de trabalho seja da ordem de 10^{-3} a 10^{-1} mbar. Por fim, a fonte é ligada, originando um plasma perto do alvo (LEE *et al.*, 2004; MARTINS, 2010).

Segundo Sousa (2019) o processo do *Sputtering* possui ótimas condições de operação e, pelo controle dos parâmetros citados, possibilitam alcançar a potência máxima sem causar comprometimento da qualidade do filme, além de vantagens como trabalhar com temperaturas reduzidas, gera uma quantidade ínfima de resíduos e poder envolver vários alvos de forma simultânea, como também alvos em sequência para obtenção de filmes em multicamadas.

2.2.2.2 Deposição eletroquímica – Eletrodeposição

A deposição eletrolítica, ou chamada eletrodeposição, é um dos métodos mais utilizados para a obtenção de revestimentos metálicos, por permitir o controle de parâmetros importantes como composição química, composição de fases, microestrutura e espessura. (MELO, 2009).

De acordo com Gonçalves (2020), o processo de eletrodeposição consiste em conectar o substrato ao polo negativo da fonte, medir a distância de trabalho e liberar a passagem de corrente pelo tempo desejado. Passado o tempo, a passagem de corrente é interrompida, a amostra é retirada, enxaguada em água destilada e seca ao ar. A eletrodeposição depende basicamente de três variáveis: a densidade de corrente aplicada aos terminais dos eletrodos, a distância de trabalho entre os eletrodos e o tempo no qual a corrente é deixada fluindo entre os terminais para que a eletrodeposição ocorra.

Medeiros (2018) em seu estudo mostra que distâncias menores resultam em filmes melhores depositados quando comparados com filmes depositados a maiores distâncias. Em adição a isso, menores distâncias de trabalho requerem recipientes menores e uma quantidade reduzida de banho eletrolítico, reduzindo assim os custos inerentes ao processo de eletrodeposição.

A deposição eletroquímica é uma técnica heterogênea supervisionada que reveste uma superfície por meio da deposição de materiais. É um processo relacionado a divisão de cargas elétricas em solução de eletrólitos. Os revestimentos mais frequentes são a base de metais puros, ligas metálicas, óxidos e polímeros.

A reação fundamental da deposição eletroquímica envolvendo metais (M) e ligas metálicas em um substrato (eletrodo) compreende a redução dos íons do metal M^{n+} existentes na solução (eletrólito). Esta reação ocorre na superfície do eletrodo. Dessa forma, trata-se de uma reação de troca de partículas realizadas na interface de contato entre o substrato e o banho eletrolítico (PAULA, 2010).

Quando o processo é realizado de forma que os elétrons são transferidos ao eletrodo, através de uma fonte de energia elétrica externa responsável pela aplicação de tensão, o processo é chamado de eletrodeposição. Um esquema do processo de eletrodeposição pode ser visualizado na Figura 2.3.

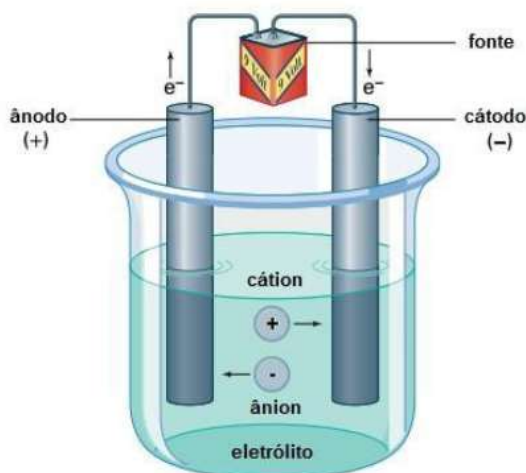


Figura 2. 3 - Célula eletrolítica
Fonte: Adaptado de Mustoe (2002).

Dessa forma, a eletrodeposição é um processo usado para produzir um revestimento denso, uniforme e aderente, geralmente de um metal ou de uma liga, sobre uma superfície condutora pelo ato de corrente elétrica. A parte central do processo de eletrodeposição é a célula eletrolítica (unidade de eletrodeposição) (JAFARI; ROZATI, 2011).

A eletrodeposição para a produção de superfícies seletivas é uma das técnicas apropriadas para a obtenção de revestimentos absorventes com boas propriedades ópticas seletivas para coletores solares (HAMID, 2009).

A escolha do material a ser depositado nas superfícies solares seletivas é um ponto crucial na determinação das propriedades ópticas, microestruturais e mecânicas obtidas. A influência dos parâmetros de eletrodeposição na absorvância das superfícies seletivas com cromo negro tem sido analisada na interferência do material do substrato (AGUILAR et al., 2003; LEE, 2007, FAROOQ; RAJA, 2008; SURVILIENE et al., 2014).

2.2.3 Materiais usuais: Cromo negro

O uso do cromo negro como revestimento solar seletivo tem ganhado muita atenção desde que McDonald (1975) introduziu e demonstrou sua eficiência. Também é um material de fácil acesso, baixo custo, e que permite a obtenção de superfícies com absorvidades maiores que 95%, (JAFARI; ROZATI, 2011), favorecendo seu uso comercial.

O cromo preto eletrodepositado é um dos absorvedores solares mais utilizados, principalmente devido à sua elevada absorção, boa estabilidade numa vasta gama de

ambientes oxidantes/redutores e elevada resistência térmica (DRIVER et al., (1977); ZAJAC; SMITH, (1980); HOARE, 1979; SMITH et al. (1981); LEE et al., (2000). A tecnologia de produção do filme tem sido melhorada substancialmente desde sua primeira utilização. Outros autores compararam o cromo e o uso de substrato de cobre e aço inoxidável, em termos de absorvidade, tabela 2.1.

Tabela 2. 1 – Absortividades totais e comparação entre Cromo negro e MoSiO₂

Autor	Material	Substrato	Absortividade (%)
Silva Neto (2017)	Cr-SiO ₂	Aço inox	97,59
		Cobre	88,88
Kennedy (2002)	Cr	Aço inox	97,00
Esposito <i>et al.</i> , (2009)	Mo-SiO ₂	Aço inox	94,00

Fonte: Adaptado de Silva Neto (2017).

Yousif e Abdulgafar (2020) estudaram revestimentos seletivos solares de níquel preto usando substratos de cobre (Cu) usados em coletores solares térmicos, o Ni-preto eletrodepositado em substrato de Cu tem seletividade elevada ($\alpha = 0,95$). Khelifa *et al.* (2018) apresentou no estudo um absorvedor solar seletivo multicamadas Cr₂O₃ / Cr / Cr₂O₃ depositado em substrato de aço inoxidável, à temperatura ambiente, usando a técnica de evaporação por feixe de elétrons, exibindo um bom valor de absorção solar de 0,89 e baixo valor de emitância térmica de 0,25 a 100 °C.

Na comparação o cromo negro possui alta absorvância e baixa emitância térmica com relação a pinturas pretas mate e pinturas pretas a base de níquel-cromo, devido à presença de uma fase metálica em sua estrutura. Há estudos que mostram evidências que os filmes de cromo negro são estáveis a temperaturas de até 350 °C, embora sistemas compostos por um filme de cromo negro depositado sobre substrato de aço inoxidável possam ser estáveis à 450 °C (BACON; IGNATIEV, 1983; KASAEIAN *et al.*, 2015).

O estudo de Nunes *et al.* (2018) mostrou que utilizando a técnica de deposição eletrolítica do cromo negro seguida de um tratamento térmico durante 2 horas a uma temperatura de 600 °C produziu revestimentos com absorção superior a 90,0%.

A absorvância dos filmes tende a aumentar com o uso contínuo, resultado da oxidação da estrutura composta de cromo metálico e óxido de cromo amorfo. A obtenção de superfícies seletivas de cromo negro produziu superfícies com propriedades óticas de alta

eficiência, com absorvâncias tão altas quanto 98% e estabilidade térmica a temperaturas tão altas quanto 450 °C (GONÇALVES, 2020).

2.2.4 Tratamento superficial de substrato

De acordo com Pereira (2019), a fabricação de SAS envolve tratamentos superficiais ou pré-tratamentos dos substratos com o objetivo de retirar impurezas ou modificar a superfície dos substratos, são exemplos a limpeza à base de detergente, isopropanol, hexano, tratamentos com banhos ácidos, polimento mecânico, eletropolimento.

Segundo Gonçalves (2020), é possível afirmar que dentre os tratamentos superficiais, limpeza com hexano, passivação com ácido cítrico, eletropolimento e tratamento térmico (150 °C) utilizados no substrato de aço inoxidável, o eletropolimento foi o que proporcionou os maiores níveis de absorção e a menor influência dos parâmetros de deposição. O autor ainda afirma que as altas absorvâncias obtidas nas amostras de seu estudo podem ser resultado da alta absorvância observada no substrato, alinhada a um filme homogêneo, fino e bem depositado sobre a superfície.

Pereira (2019) fabricou superfícies absorvedoras à base de cromo eletrodepositadas sobre substratos com tratamentos superficiais (limpeza com detergente, tratamento com ácido cítrico e eletropolimento) corrobora com Gonçalves (2020) afirmando que os filmes depositados sobre o substrato eletropolido obtiveram os melhores resultados de absorvância, assim como Andrade (2020), dentre os tratamentos superficiais empregados em seu estudo, o eletropolimento mostrou-se mais eficiente e contribuiu para a obtenção de melhores desempenhos, uma vez que os filmes depositados em substratos eletropolidos apresentaram as maiores absorvâncias médias $\geq 95\%$.

Deste modo, o tratamento superficial escolhido para o estudo foi o eletropolimento, tratando-se de um método eletroquímico, também chamado de polimento eletroquímico ou polimento eletrolítico, o processo tem como função remover materiais metálicos de uma camada fina da superfície das amostras através de um tratamento anódico, resultando em uma superfície mais plana, sem tensões residuais e descontaminada (LIN; HU, 2008), utilizando corrente elétrica e solução química.

A configuração do processo trata-se de uma célula eletrolítica com dois eletrodos (catodo e ânodo) que estão conectados e imersos em um eletrólito e uma fonte de corrente elétrica, figura 2.4. Para o fechamento do circuito, uma malha de aço inoxidável colocada

em um béquer e parcialmente submersa pela solução. Os substratos ficam submersos na solução de forma que os mesmos fiquem envoltos pela malha. A malha é conectada ao polo negativo de uma fonte de tensão de corrente contínua e o substrato conectado ao polo positivo. O processo ocorre com o fornecimento de corrente através dos eletrodos e torna o substrato mais polido após todo o processo de eletropolimento.

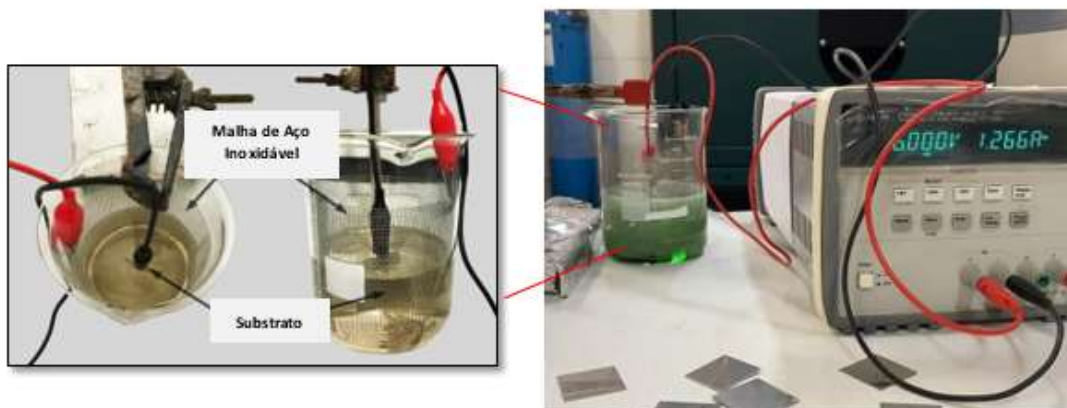


Figura 2. 4 - Eletropolimento

Fonte: @Labfilm UFPB (2021); Adaptado de Gonçalves (2020).

2.3 AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA - ACV

A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) fornece uma visão abrangente dos aspectos ambientais de um produto ou processo e uma imagem das verdadeiras compensações ambientais na seleção de produtos e processos. A ACV analisa os impactos ambientais associados a um processo ou produto desde o berço até o túmulo, que começa com a recolha de matérias-primas da terra para criar o produto/serviço e termina no momento em que todos os materiais são devolvidos para a terra (GUINEE, 2001; GUINEE, 2002; SAIC, 2006).

A ACV não é uma metodologia simples, pois requer a mobilização de uma quantidade significativa de dados assim como alto consumo de tempo e esforços computacionais, na utilização de softwares de quantificação de impacto ambiental. A atividade analisada deve ser descrita com o maior número possível de detalhes, que incluem as entradas (material, energia) e saídas (produto, serviço, resíduo e emissões) (CARVALHO; FREIRE, 2017).

A utilização de *software* facilita a gestão dos dados coletados para a avaliação de diferentes cenários de ciclo de vida, por meio de um vasto banco de dados (PERCHENART;

ROQUESALANE, 2014). Esses *softwares* possibilitam ainda a compilação dos dados e a quantificação em termos de impactos ambientais; comparações do ciclo de vida de produtos e processos; e análise dos impactos ambientais e financeiros de todas as atividades do sistema. Atualmente, existem vários *softwares* disponíveis para realização de ACV, como o *SimaPro* (PRÉCONSULTANTS), GABI (SPHERA), e Umberto (IPOINT GROUP). Cada um deles disponibiliza também diferentes métodos de avaliação de impacto (e.g., CML-IA Baseline 2001, IPCC 2013 GWP¹ 100a, IMPACT 2002+, ILCD 2011, ReCiPe) (CURRAN, 2006; USEPA, 2017).

Segundo Lacerda *et. al*, (2019), a ACV é, pois, uma análise sistemática que consiste em identificar e quantificar os fluxos de materiais e energia ao longo do ciclo de vida, que serão traduzidos em termos de contribuições para as diferentes categorias de impactos ambientais, como exaustão de recursos não renováveis, mudanças climáticas, toxicidade humana, ecotoxicidade e acidificação. A avaliação comparativa de diversos ciclos de vida concorrentes, com diferentes características, em cenários distintos, é um dos objetivos clássicos tratados na realização de uma ACV.

A ACV consiste em uma metodologia com a finalidade de estimar e avaliar os impactos ambientais atribuíveis ao ciclo de vida de um produto, tais como as mudanças climáticas, destruição do ozônio estratosférico, ozono troposférico (poluição atmosférica), eutrofização, acidificação, riscos toxicológicos sobre a saúde humana e os ecossistemas, esgotamento dos recursos naturais, uso da água, uso da terra, entre outros (REBITZER *et al.*, 2004).

A primeira definição consensuada para a ACV (Em inglês: *Life Cycle Assessment*, LCA), e mais utilizada até hoje em dia, é a definição da *Society of Environmental Toxicology and Chemistry* (SETAC, Sociedade de Química e Toxicologia Ambiental), que é a líder em seu desenvolvimento metodológico (FULLANA; PUIG, 1997): considera-se que a ACV é um processo objetivo para avaliar as cargas ambientais associadas a um produto, processo ou atividade, identificando e quantificando o uso de matéria e energia e as emissões ao ambiente, para determinar o impacto que esse uso de recursos e emissões produzem no meio ambiente, e para avaliar e colocar em prática estratégias de melhora ambiental (Figura 2.5).

¹ *Global Warming Potential*, (Potencial de aquecimento global).

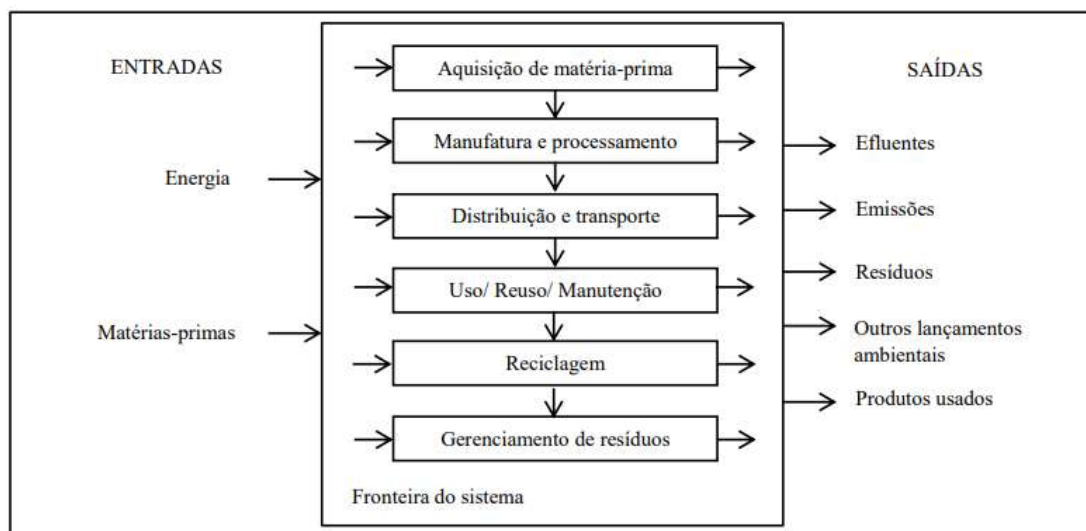


Figura 2. 5 - Abrangência da Avaliação do Ciclo de Vida
 Fonte: Florindo *et al.* (2015).

A metodologia da ACV está internacionalmente normatizada pela *International Organization for Standardization* (ISO, Organização Internacional para Padronização) nas suas normas ISO 14040 (2006) e ISO 14044 (2006), e é considerada como uma das metodologias mais eficazes para identificar e avaliar os impactos ambientais associados a uma atividade, produto ou processo (GUINÉE, 2001; GUINEE, 2002). No Brasil, a normativa internacional foi traduzida pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) nas normas NBR 14040 e NBR 14044 (ABNT, 2014a; ABNT, 2014b).

A ampla perspectiva da ACV possibilita a consideração dos diferentes benefícios que podem ser obtidos em diferentes processos de gerenciamento (CHERUBINI *et al.*, 2009). A normativa metodológica na qual a ACV está inserida (ABNT, 2014a; ABNT, 2014b) permite que diversos métodos de avaliação de impacto ambiental sejam aplicados combinadamente, para avaliar diferentes pontos de vista, como uso de energia ou material, impactos ambientais e pegada ecológica (CHERUBINI *et al.*, 2009). A Figura 2.6 mostra a estrutura da ACV, segundo a norma internacional ISO 14040 (2006).

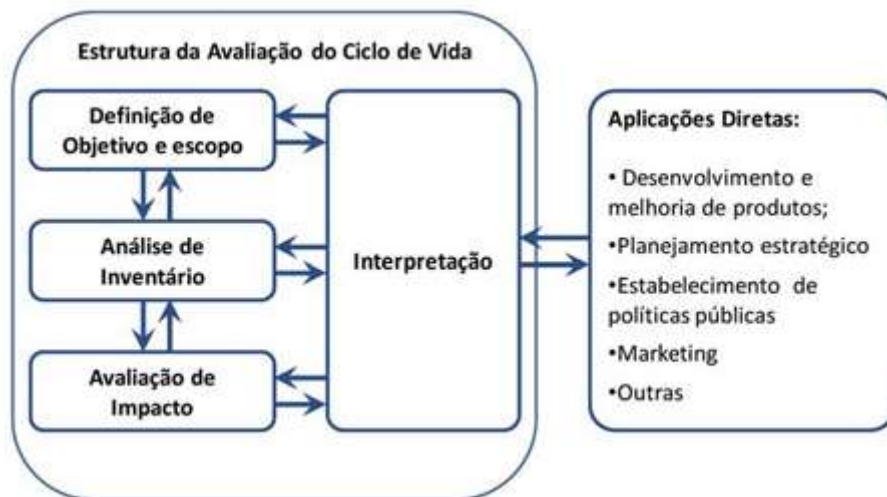


Figura 2.1 - Estrutura de uma ACV
Fonte: ISO 14040 (2006).

A ACV é desenvolvida seguindo quatro fases distintas estabelecidas pela norma ISO 14040 (ISO 14040, 2006, ABNT, 2014a): i) objetivos e escopo; ii) inventário com a compilação de dados e modelização de sistemas; iii) análise do impacto do ciclo de vida (AICV); e iv) interpretação dos resultados. Existem três etapas adicionais que são opcionais: normalização, agrupamento e ponderação.

Dentro da definição de objetivos, devem incluir-se as razões pelas quais o estudo está sendo realizado, a informação que se espera obter, como vai ser utilizada, etc. A definição do objetivo e escopo do estudo pode ser considerada como uma das etapas mais importantes da avaliação, sendo que todo o estudo é realizado de acordo com as declarações dessa fase, definindo seu objetivo, os limites do sistema e sua unidade funcional (FINNVEDEN *et al.*, 2009). Devido à natureza global da ACV, um estudo poderia não ter fim se não se impuserem limites para seu alcance. Mais detalhes sobre ACV podem ser consultados em Guinée (2001, 2002).

A construção do inventário é fundamentalmente um balanço de matéria e energia do sistema, e compreende a compilação dos dados e realização de cálculos adequados para quantificar as entradas e saídas do sistema estudado. A análise de inventário engloba um

extenso banco de dados de materiais envolvidos no produto ou sistema, incluindo o levantamento, a coleta e a análise dos dados necessários para a ACV (GUINNÉ, 2001). Segundo o mesmo autor, devem conter, a princípio, dados sobre todas as entradas e saídas de cada processo individual do sistema examinado, como fluxo de poluentes, materiais e recursos, que serão apresentados de forma quantificada para que, após o tratamento, possibilitem a obtenção dos impactos ambientais e posteriormente a avaliação desses impactos.

A fase da análise de Impacto do Ciclo de Vida (ICV) corresponde ao processo quantitativo e/ou qualitativo aplicado na caracterização e avaliação dos impactos associados ao inventário do ciclo de vida (ISO 14040, 2006b). Durante esta etapa da ACV, os fluxos de materiais e energia, identificados durante o ICV, são associados aos impactos ambientais. As categorias de impacto relevantes e seus respectivos potenciais de impacto são estabelecidos e é realizado o cálculo dos indicadores de cada categoria. A agregação dos resultados, por vezes ponderados, define o perfil da Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida (AICV) e fornece informações relativas aos impactos ambientais associados ao consumo de recursos e emissões ao meio (SONNEMANN; CASTELLS; SCHUHMACHER, 2003).

A finalidade da fase de avaliação de impactos do ciclo de vida é a de interpretar o inventário, analisando e avaliando os impactos produzidos pelas cargas ambientais identificadas. É nesta fase que se escolhe um método de avaliação de impacto ambiental para expressar os resultados. A etapa de interpretação e análise de impacto consiste na fase final, sendo feitas constatações da análise de inventário e da avaliação de impactos, evidenciando pontos críticos, limitações, identificando as fases do ciclo de vida que mais causam impactos e fornecendo recomendações finais. Esta etapa permite a identificação de pontos que necessitam de melhorias, inovação nos produtos ou processos de fabricação, visando à preservação ambiental (SUER *et al.*, 2004). Na interpretação de resultados, se combina a informação obtida na fase de inventário com a informação da avaliação de impactos para chegar a conclusões e/ou recomendações de acordo com os objetivos e o alcance do estudo.

Na etapa iii, a AICV pode ser desenvolvida utilizando-se métodos *midpoint* ou *endpoint*. Os métodos *midpoint* usam indicadores localizados ao longo do mecanismo ambiental antes de chegar ao ponto final da categoria, enquanto que os métodos *endpoint* consideram todo o mecanismo ambiental até o seu ponto final (dano específico relacionado com saúde humana, ambiente natural ou recursos naturais (CARVALHO, LOZANO,

SERRA, 2011). Nas abordagens orientadas a *endpoint*, os fluxos são classificados de acordo com as áreas de contribuição (ARBAULT *et al.*, 2014).

As categorias *midpoint* e *endpoint*, assim como as suas relações, estão ilustradas na Figura 2.7.

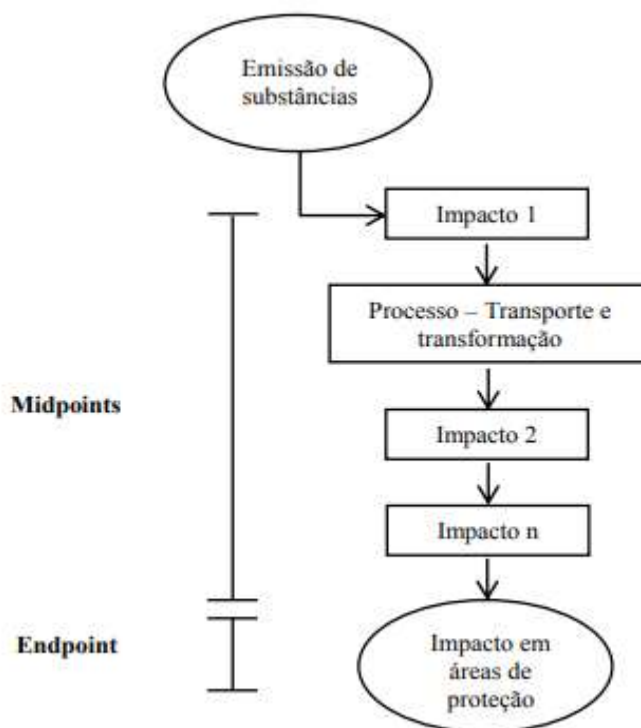


Figura 2.2- Categorias *midpoint* e *endpoint*, assim como as suas relações em uma ACV
Fonte: Traduzido de Finnveden *et al.* (2009).

O objetivo dos métodos de atribuição de impacto é simplificar a complexidade de centenas de fluxos em algumas áreas ambientais de interesse. Os métodos orientados a ponto final (*endpoint*) também classificam os fluxos de um sistema em vários temas ambientais, mas eles têm por objetivo modelar o dano de cada externalidade de acordo com o seu efeito sobre a saúde humana, a saúde do ecossistema ou danos aos recursos (WEIDEMA, 2015).

Os métodos *midpoint* enfocam problemas ambientais únicos (categorias de impacto), enquanto os métodos de *endpoint* mostram o impacto ambiental em um nível de agregação mais alto, as diferentes categorias de impacto podem ser ponderadas e quantificadas de acordo com um objetivo específico definido (danos específicos à saúde humana, qualidade do ecossistema ou recursos), figura 2.8:

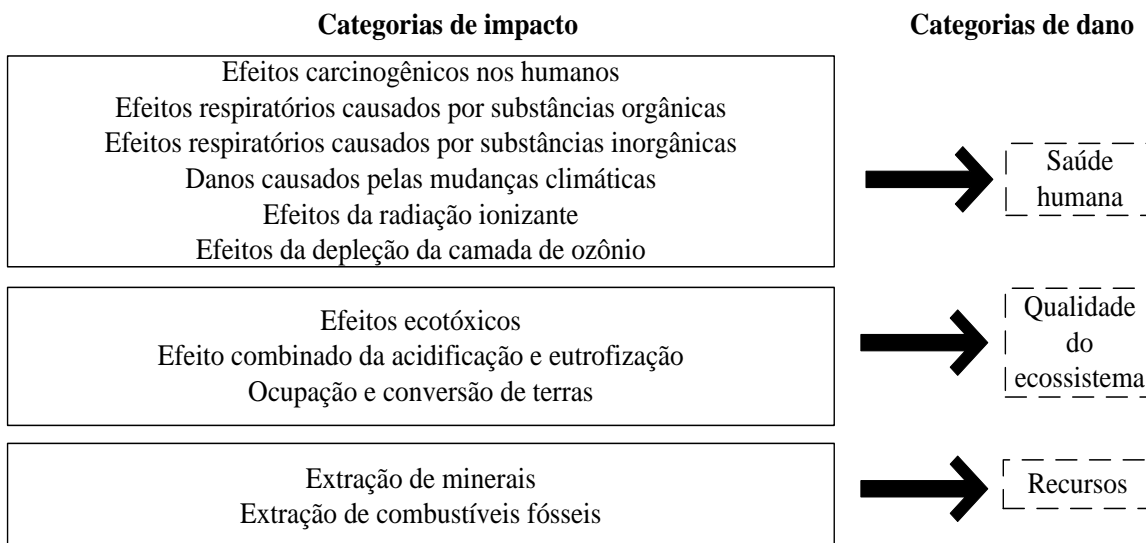


Figura 3 - Categorias de impacto e categorias de dano
 Fonte: Traduzido de Carvalho (2011).

As avaliações no nível *endpoint* apresentam modelagem com complexidade e incertezas claramente maiores do que a modelagem *midpoint* (HAUSCHILD *et al.*, 2012). Segundo Bare *et al.* (2000) os *midpoints* são considerados elos na cadeia de causa e efeito (mecanismo ambiental) de uma categoria de impacto, antes dos *endpoints*, nos quais os fatores ou indicadores de caracterização podem ser derivados para refletir a importância relativa das emissões ou extrações. Ainda segundo os autores as metodologias de *midpoints* e *endpoints* fornecem informações úteis para a tomada de decisão, levando à necessidade de ferramentas que integrem os dois métodos em uma estrutura consistente.

A norma ISO 14040 (2006) aponta elementos opcionais: normalização, agrupamento, ponderação. A Normalização refere-se aos cálculos da magnitude dos resultados dos indicadores de categoria referente a informações de referência. A etapa do Agrupamento consiste no agrupamento de categorias de impacto e/ou danos segundo semelhanças, ou classificação das categorias de impacto em tópicos de proteção. E na Ponderação, ocorre a conversão dos resultados dos indicadores de cada uma das categorias a uma escala comum, por meio de fatores numéricos baseados em escolhas de valor (ISO 14040, 2006b). Os potenciais para diferentes impactos são avaliados segundo sua severidade e, de acordo com o resultado, são estabelecidos diferentes fatores de ponderação: um fator para cada categoria de impacto e de dano.

A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) tem sido uma das metodologias mais utilizadas, difundidas e consolidadas para o cálculo de impactos ambientais, compreendendo a extração

de matérias-primas, manufatura, transporte ou distribuição, utilização e destinação final de cenários de resíduos (CARVALHO *et al.*, 2017).

Uma das maneiras de avaliar impactos ambientais é a pegada de carbono (*carbon footprint*). A pegada de carbono é uma medida das emissões de GEE, surgida a partir da necessidade de medir e comunicar o quanto uma atividade ou produto provoca alterações climáticas (ERIKSSON *et al.*, 2010).

Segundo Carvalho e Delgado (2017), como a pegada de carbono está intimamente relacionada ao uso da energia e devido ao extremo interesse público nas mudanças climáticas em comparação a outros problemas ambientais, este indicador é apropriado para comunicar resultados de estudos ACV, e vem recebendo visibilidade pronunciada graças a sua popularidade.

Contudo sabe-se que todas as nações do mundo dependem de combustíveis fósseis para suas necessidades de energia. No entanto, a obrigação de reduzir o CO₂ e outras emissões gasosas para estar em conformidade com o acordo dos protocolos mundiais é o motivo pelo qual os países recorrem a fontes de energia renováveis não poluentes, assim quantidades consideráveis de gases poluentes do efeito estufa podem ser evitadas ou diminuídas.

No que diz respeito à avaliação do ciclo de vida dos sistemas solares, a energia gasta para a fabricação e instalação é recuperada em cerca de 1,2 anos, enquanto o tempo de retorno com relação às emissões produzidas a partir da energia incorporada necessária para a fabricação e instalação dos sistemas varia de alguns meses a 9,5 anos de acordo com o combustível e o poluente específico considerado (ALDENTE *et al.*, 2005).

Alguns estudos tentaram comparar a economia de energia de sistemas solares térmicos em vez de sistemas fósseis, calculando as emissões (REY-MARTÍNEZ, 2007; HOBBI, 2009). Ardente *et al.* (2005) fornecem lista de materiais usados em o sistema solar térmico mostrando o impacto ambiental causado por materiais e processos de fabricação. Dentre eles, poucos são os estudos que calculam o impacto ambiental do uso do sistema solar térmico considerando a fabricação do sistema solar térmico, matéria-prima e produção de energia durante sua vida útil e as emissões por unidade de energia produzida (GREENING; AZAPAGIC, 2014).

Rabaia *et al.* (2021) discutiu os impactos ambientais, através de revisão e ACV, dos sistemas de energia solar em detalhes, incluindo vários sistemas fotovoltaicos e térmicos, comerciais e emergentes com algumas tecnologias e instalações inovadoras, bem como

alguns dos elementos essenciais em seus sistemas. Em seu relevante e atual estudo está contemplado as principais etapas, começando na fase inicial de projeto, passando por sua fabricação (objeto do nosso estudo), uso de materiais, construção ou fase de instalação, ao longo de sua vida útil e ao final de sua desativação, tanto em sistemas de pequena como de grande utilidade.

Um desafio, segundo Dan *et al.* (2018) ainda é o desempenho do revestimento em ambiente adverso e em altas temperaturas. Logesh *et al.* (2021) realizaram uma investigação experimental sobre a absorvidade e emissividade de Cu não revestido e superfícies de cobre revestidas com cromo preto (Cr), considerando faixas de temperatura média (100-400 ° C) e várias semanas de exposição, e concluíram que com o Cr o revestimento produziu um impacto positivo considerável nos valores de absorvidade e emissividade. Sathish (2020) examinou a degradação de superfícies de alumínio revestidas com Cr sob condições adversas de temperatura e confirmou que a degradação de superfícies revestidas ocorre em taxas mais baixas do que superfícies não revestidas, começando apenas em temperaturas muito altas.

Houve contribuições e inovações importantes no que diz respeito ao desenvolvimento de superfícies seletivas e processos de fabricação de filmes absorventes. Cao *et al.* (2015) examinaram superfícies espectralmente seletivas baseadas em *cermet* (material composto de materiais cerâmicos e metálicos) de zircônia estabilizada com ítria (YSZ) para aplicações de absorvedor solar de alta temperatura e relataram o valor de emitância hemisférica total baixo e um absorvedor solar estável de alta temperatura, com absorvância solar acima de 0,9. A revisão de Xu *et al.* (2020) verificaram que, para os requisitos da próxima geração de usinas de energia solar concentrada, os revestimentos de óxido de metal de transição são úteis na prevenção de falhas em altas temperaturas, especialmente em relação à falha de oxidação.

A ACV ajudou a destacar os principais pontos do estudo de Altun-Çiftçioğlu *et al.* (2016), que comparou a produção de superfícies absorvedoras solares e verificou que a etapa de processamento da abordagem convencional emitiu 8,68 kg CO₂-eq enquanto a produção rolo a rolo emitiu 3,4 kg CO₂-eq, levando a 61% de descarbonização quando o rolo foi o processo de rolo é selecionado para produzir coletores solares planos. Sánchez-Cruces *et al.* (2014) realizou ACVs para filmes finos seletivos solares por eletrodeposição (revestimentos de CO₃O₄) e por técnicas de sol-gel (CO (CH₃COOH)₂), e obteve 862,61 e 872,18 kg CO₂eq/m². Gökulu *et al.* (2011) apresentaram uma ACV da produção contínua por superfície seletiva do coletor solar, e demonstraram que a produção da superfície seletiva teve um

menor impacto ambiental e emissão de gases de efeito estufa em comparação aos processos de mineração de Cu e Ni. No entanto, a literatura científica sobre o assunto é escassa e, apesar de o cromo preto ser um dos revestimentos seletivos solares mais comumente estudados e usados em sistemas coletores solares, nenhum estudo de ACV foi encontrado.

O nível de maturidade do mercado de tecnologia e suas perspectivas futuras são os que indicam a importância de trabalhar seu impacto ambiental em relação a outras tecnologias emergentes. A maioria dos materiais usados na fabricação de revestimentos de coletores solares, em geral, são potencialmente tóxicos, altamente valiosos e frequentemente raros, e podem ser liberados para o meio ambiente através do ar e da água, causando alguns problemas sérios. Portanto, eles devem ser tratados ao longo da vida útil do sistema, desde os processos de fabricação, etapa de descarte e final da vida útil do sistema.

CAPÍTULO III - MATERIAL E MÉTODOS

Para atender os objetivos propostos, a metodologia de pesquisa utilizada neste estudo pode ser dividida em quatro principais partes: revisão bibliométrica, obtenção das superfícies absorvedoras, ACV das superfícies produzidas e da literatura (fase de objetivo, escopo e construção de inventário).

A Figura 3.1 mostra o fluxograma detalhado dos procedimentos experimentais realizados durante o estudo.

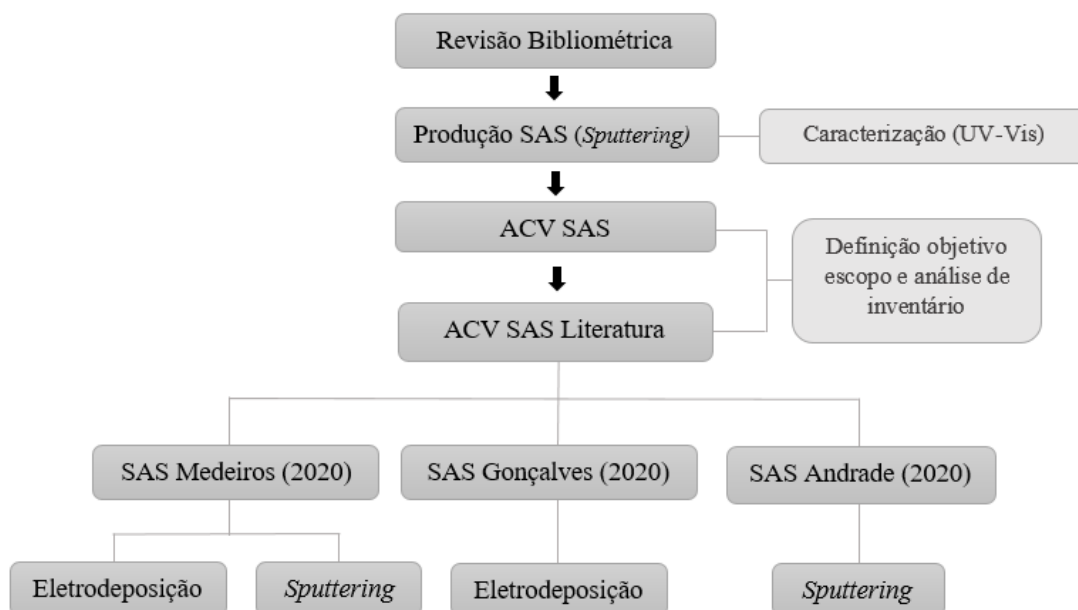


Figura 3. 1 - Fluxograma detalhado dos procedimentos experimentais

3.1 REVISÃO BIBLIOMÉTRICA

Sendo uma área em ascensão no campo de pesquisa das energias renováveis, uma revisão de literatura, bibliometria e análise de redes se fez necessário, no intuito de mapear a estrutura do campo de conhecimento (ACV de tecnologias para superfícies seletivas/filmes finos), melhor compreender a área, ter propriedade dos termos estudados, verificar estudos

de outros autores, as principais pesquisas, o que está sendo discutido, o que está evoluindo na área de conhecimento, ver a evolução do tema estudado no decorrer do tempo, quais os termos de pesquisa que estão em maior evidência, quais são os indicadores e lacunas de pesquisa que contribuí com a área. Para tanto, foi utilizada a metodologia da Revisão Sistemática Literatura (RSL), análise bibliométrica, além da análise de redes utilizando o software *VosVieWer*.

Métodos bibliométricos, baseados nas ligações das citações, são usados para a visualização de um domínio, uma vez que buscam revelar domínios da comunicação científica refletidos na literatura científica e nos entrelaçamentos das citações dos pesquisadores em suas publicações (BÖRNER; CHEN; BOYACK, 2003).

Um procedimento de pesquisa baseado nos fundamentos da revisão sistemática da literatura (RSL) “permite que o pesquisador mapeie e avalie o território intelectual existente, e especifique uma questão de pesquisa para desenvolver ainda mais o corpo de conhecimento existente” (TRANFIELD *et al.*, 2003). Em conjunto com a RSL, foi realizada a *Citation NetWork Analysis* (CNA), uma técnica utilizada para identificar *clusters* que auxiliam na melhor compreensão do corpo de conhecimento (MARION *et al.*, 2005), a junção da RSL com a CNA forma uma nova metodologia chamada de SLNA (*Systematic Literature NetWork Analysis*) (COLICCHIA; STROZZI, 2012). A RSL localiza e seleciona dados de relevância para o corpo de conhecimento e a CNA mostra a ligação entre as citações mais importantes (COLICCHIA; STROZZI, 2012). A pesquisa foi baseada em cinco etapas, figura 3.2.

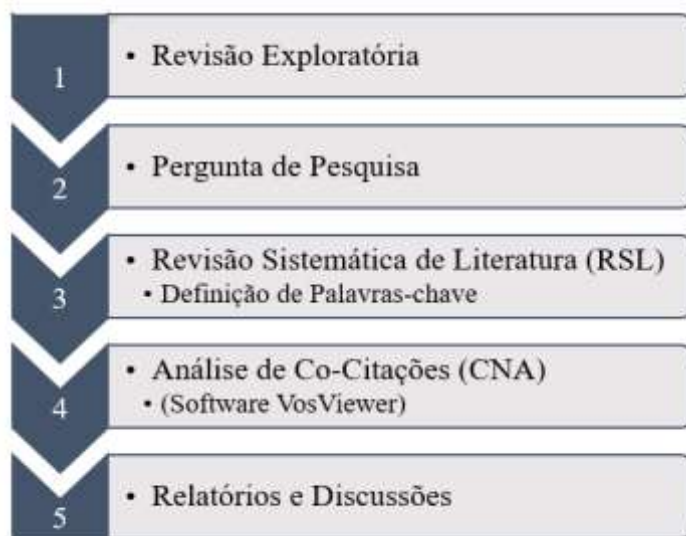


Figura 3. 2 – Etapas da revisão bibliométrica

Na etapa 1, foi realizada uma análise geral e exploratória da literatura para identificação da questão de investigação. As quatro perguntas de investigação propostas serviram de linhas de orientação para as etapas seguintes:

1. O processo de geração de energia solar térmica pode ser considerado totalmente “limpo”?
2. Como se encontram os estudos na área de Ciclo de Vida versus energia solar térmica?
3. O processo de fabricação dos componentes de um coletor solar térmico emite gases de efeito estufa?
4. As superfícies absorvedoras solares além de serem consideradas boas absorvedoras possuem bons desempenhos ambientais?

A etapa 2 conduziu o desenvolvimento da pesquisa a partir da pergunta-chave: “Qual o desempenho ambiental do processo produtivo de superfícies absorvedoras solares a base de cromo utilizando as técnicas de eletrodeposição e *Sputtering*? ”. Em prol disso, foram conduzidas a RSL e a CNA, etapas 3 e 4 respectivamente. A RSL está dividida em: localização e seleção da amostra.

A pesquisa foi conduzida na base *Scopus*, base reconhecida pela relevância dos periódicos indexados à mesma, revisados por pares, e que permite a exportação de metadados necessários para as análises de publicações, citações e bibliometria. Foram utilizados três campos de busca: Superfície Solar Seletiva; Técnicas de Deposição de filmes finos; Análise do Ciclo de Vida. Na Tabela 2 encontram-se os termos utilizados na pesquisa para cada campo. Para a localização e seleção da amostra foram utilizados cinco critérios mostrados na Tabela 3.1.

Tabela 3. 1 – Campos e Termos de busca

Campos	Termos de Busca
Superfície Solar Seletiva	Selective solar surfac*;"thin film*"; "Collectors solar"; "solar thermal conversion"
Técnicas de Deposição de filmes finos	Deposition techniques; "Black Chrom*"; "Electrodeposition" ; "Sputtering"
Análise do Ciclo de Vida (ACV)	Life cycle; "LCA"; "carbon emission*"; "carbon footprint*"; "GHG"; "greenhouse gas emission*" ; "environmental impact*" "environmental load*"

Tabela 3. 2 – Critérios de busca e seleção de artigos

Critérios	Inclusão	Exclusão
Base de Dados	Scopus	Todas as outras bases
Termos de busca	Publicações onde os termos de busca aparecem no título, resumo e/ou palavras-chave	Demais publicações
Tipo de documento	Artigos e artigos de revisão	Demais publicações
Idioma	Inglês	
Período	Até 14 de setembro 2021	

Foram selecionados apenas os artigos em língua inglesa. Não houve seleção de uma data específica para início do período de abrangência, mas foram incluídos apenas os artigos e revisões publicados até 14 de setembro de 2021, no intuito de verificar os estudos mais atuais.

Após a localização da amostra foi necessário filtrá-la para selecionar os artigos relevantes. Para esta pesquisa, os filtros utilizados foram:

- (i) Leitura de todos os títulos: títulos fora do escopo eram excluídos do portfólio.
- (ii) Leitura de todos os resumos: resumos fora do escopo foram excluídos do portfólio.

A Fase 4, CNA, é composta por duas atividades:

- i. Criação de gráficos e redes: para a realização desta atividade foram utilizados os metadados exportados da base de dados *Scopus*, base na qual a pesquisa foi realizada. Para a condução da atividade, fez-se o uso dos *softwares MS-Excel* e *VosVieWer*, versão 1.6.17 (ECK; WALTMAN, 2010). Foram elaborados gráficos e redes sobre a evolução dos anos de publicação, dos países com maior número de publicações, dos artigos mais citados, redes de co-citação dos autores e das palavras-chave;
- ii. Análise de redes: foi realizada uma análise do conteúdo resultante da atividade anterior, tanto das redes quanto dos gráficos.

Por fim, a Fase 5 consta de Resultados e Discussões das respectivas análises realizadas na Fase 4.

Execução da RSL:

Etapa 1: Análise geral exploratória da literatura nos estudos voltados para as áreas de interesse, “superfícies absorvedoras solares e ACV”, para então formular a questão da investigação.

Etapa 2: Definição da pergunta de pesquisa:

“Qual o desempenho ambiental do processo de fabricação de superfícies absorvedoras solares a base de cromo utilizando as técnicas de eletrodeposição e *Sputtering*?

Etapa 3: Uso da base de dados *Scopus*, com os termos de busca: título, resumo e palavras-chave, e aplicando o filtro de somente artigos e artigos de revisão, uma vez que esses passam por processos de avaliação por pares na sua versão completa:

Strings de busca (query):

- 1º) TITLE-ABS-KEY (((("solar") AND ("Life cycle" OR "LCA" OR "carbon emission*" OR "carbon footprint*" OR "GHG" OR "greenhouse gas emission*" OR "environmental impact*" OR "environmental load*")))) AND (LIMIT-TO (DOCTYPE, "ar") OR LIMIT-TO (DOCTYPE, "re"))
- 2º) TITLE-ABS-KEY (((("solar energy") AND ("Life cycle" OR "LCA" OR "carbon emission*" OR "carbon footprint*" OR "GHG" OR "greenhouse gas emission*" OR "environmental impact*" OR "environmental load*")))) AND (LIMIT-TO (DOCTYPE, "art") OR LIMIT-TO (DOCTYPE, "re"))
- 3º) TITLE-ABS-KEY (((("Selective solar surfac*" OR "thin film*" OR "Collectors solar" OR "solar thermal energy" OR "Deposition techniques" OR "Black Chrom*" OR "Electrodeposition" OR "Sputtering") AND ("Life cycle" OR "LCA" OR "carbon emission*" OR "carbon footprint*" OR "GHG" OR "greenhouse gas emission*" OR "environmental impact*" OR "environmental load*")))) AND (LIMIT-TO (DOCTYPE, "ar") OR LIMIT-TO (DOCTYPE, "re"))
- 4º) TITLE-ABS-KEY (((("Selective solar surfac*" OR "thin film*" OR "Collectors solar") OR ("solar thermal energy")) AND ("Life cycle" OR "LCA" OR "carbon emission*" OR "carbon footprint*" OR "GHG" OR "greenhouse gas emission*" OR "environmental impact*" OR "environmental load*")))) AND (LIMIT-TO (DOCTYPE, "ar") OR LIMIT-TO (DOCTYPE, "re"))
- 5º) TITLE-ABS-KEY (((("solar" AND ("Life cycle" OR "LCA" OR "carbon emission*" OR "carbon footprint*" OR "GHG" OR "greenhouse gas emission*"))

- OR “environmental impact*” OR “environmental load*”) AND (“Selective surfac*” OR “thin film*” OR “Deposition techniques” OR “Black Chrom*” OR “Electrodeposition” OR “Sputtering”)) AND (LIMIT-TO (DOCTYPE, “ar”) OR LIMIT-TO (DOCTYPE, “re”))
- 6º) TITLE-ABS-KEY (((“Selective solar surfac*” OR “thin film*” OR “Collectors solar” OR “solar thermal energy”) AND (“Deposition techniques” OR “Black Chrom*” OR “Electrodeposition” OR “Sputtering”)) AND (“Life cycle” OR “LCA” OR “carbon emission*” OR “carbon footprint*” OR “GHG” OR “greenhouse gas emission*” OR “environmental impact*” OR “environmental load*”))) AND (LIMIT-TO (DOCTYPE, “ar”) OR LIMIT-TO (DOCTYPE, “re”))
- 7º) TITLE-ABS-KEY (((“Selective surfac*” OR “thin film*”) AND (“Deposition techniques” OR “Electrodeposition” OR “Sputtering”) AND (“Black Chrom*”))) AND (LIMIT-TO (DOCTYPE, “ar”))
- 8º) TITLE-ABS-KEY ((“Selective solar surfac*” OR “thin film*” OR “Collectors solar” OR “solar thermal energy”) AND (“Deposition techniques” OR “Electrodeposition” OR “Sputtering”) AND (“Black Chrom*”)) AND (LIMIT-TO (DOCTYPE, “ar”))
- 9º) TITLE-ABS-KEY ((“Selective solar surfac*” OR “thin film*” OR “Collectors solar” OR “solar thermal energy”) AND (“Deposition techniques” OR “Electrodeposition” OR “Sputtering”) AND (“Black Chrom*”) AND (“Life cycle” OR “LCA” OR “carbon emission*” OR “carbon footprint*” OR “GHG” OR “greenhouse gas emission*” OR “environmental impact*” OR “environmental load*”))

3.2 PROCESSOS DE FABRICAÇÃO DAS SUPERFÍCIES ABSORVEDORAS SOLARES (SAS)

Todos os estudos avaliados e comparados neste trabalho produziram SAS à base de cromo, e apresentaram absorvidade superior a 90%. As pesquisas foram desenvolvidas no Laboratório de Biomateriais (LABIO), Laboratório de Tecnologia de Novos Materiais (TECNOM) e no Laboratório de Filmes Finos (LabFilm) da Universidade Federal da Paraíba (UFPB).

Neste estudo foram produzidos 30 filmes finos a base de cromo pela técnica da Pulverização Catódica (do inglês, *Sputtering*), com a finalidade de obter superfícies com absorvidades superiores a 90%, bem como avaliar sua eficiência ambiental através da ACV, quantificando as emissões de GEE.

As etapas do processo de fabricação dos filmes encontram-se no fluxograma, figura 3.3, e descrita detalhadamente nos itens i, ii, iii e iv.

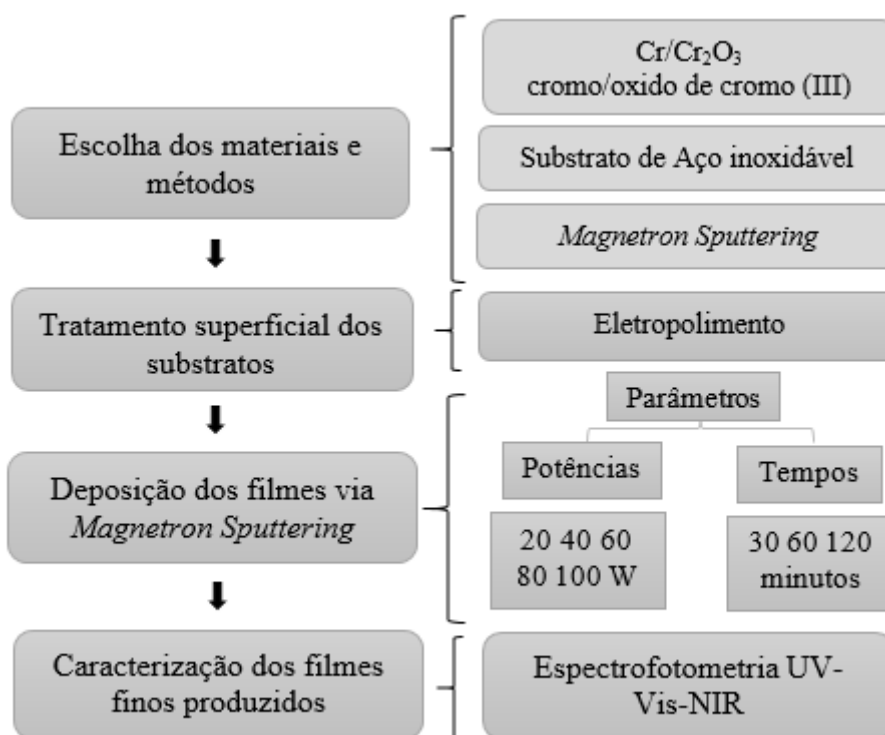


Figura 3. 3 – Fluxograma das etapas do processo de fabricação dos filmes do estudo

- (i) Escolha dos materiais e métodos:
- Substratos com dimensões de 30 mm x 30 mm de aço inoxidável AISI 304;
 - Tratamento de substrato (eletropolimento): solução de ácido fosfórico, ácido sulfúrico, glicerol, água destilada, papel absorvedor, fonte de tensão de corrente contínua, malha de aço inoxidável AISI 304 (80 mm x 300 mm);
 - Para a deposição: alvo (*cermet* Cr/Cr₂O₃): cromo/óxido de cromo (III), grau de pureza (99,95%), diâmetro de 2” (50,8 mm), espessura de 0,125” (3,175 mm) fabricado pela empresa Kurt J. Lesker, e o sistema de

Magnetron Sputtering RF Orion 5 (fornecido pela AJA Instruments Inc), alimentação da rede elétrica brasileira. E gás Argônio 5.0 com fluxo de 10 sccm e pressão a $5,0 \times 10^{-3}$ Torr.

(ii) Preparação dos substratos:

O processo do tratamento superficial do substrato, eletropolimento, foi preparado uma solução de ácido fosfórico, ácido sulfúrico e glicerol na proporção de 2:1:1 com um volume final de 300 ml. Uma fonte de tensão de corrente contínua, configurada para 6 V. Para o fechamento do circuito, utilizou-se uma malha de aço inoxidável AISI 304 cujas dimensões de 80 mm x 300 mm, inserida em um béquer de 600 ml, parcialmente submersa na solução eletrolítica. Os substratos foram completamente imersos na solução e envoltos pela malha. A tensão de corrente contínua foi aplicada no circuito, de maneira que o polo negativo estava conectado à malha de aço, enquanto o polo positivo estava conectado ao substrato.

O primeiro substrato foi utilizado como uma amostra de sacrifício para ionizar a solução até que a corrente se estabilizasse em um valor próximo a 1,35 A. Após a estabilização da corrente, cada substrato foi eletropolido por 10 minutos, sendo, em seguida, enxaguado em água destilada e seco em papel absorvedor.

(iii) Deposição dos filmes:

Para dar início às deposições, o alvo de cromo/óxido de cromo (III) - Cr/Cr₂O₃, foi posicionado na câmara de vácuo a uma distância de 110 e 150 mm dos substratos, utilizando as potências de trabalho 20, 40, 60, 80 e 100W, nos tempos 30, 60 e 120 minutos, respectivamente, tabela 3. A câmara foi evacuada até a pressão de $1,0 \times 10^{-5}$ Torr e, em seguida, iniciou-se a injeção do gás para a formação do plasma, utilizando o gás Argônio 5.0, com fluxo de 10 sccm, alcançando o equilíbrio de pressão a $5,0 \times 10^{-3}$ Torr. No decorrer do todo o processo, o substrato rotacionou a uma velocidade de 20 rpm. A Tabela 3.3 traz os parâmetros (distância entre alvo e substrato, potência e tempo de deposição) adotados para cada um dos alvos.

Tabela 3. 3 – Parâmetros de deposição

Alvo	Distância entre alvo e substrato(mm)	Potência(watts)	Tempo de deposição
Cr/Cr ₂ O ₃	110	20	30 minutos
		40	
		60	
		80	
		100	
	150		60 minutos
			120 minutos

A nomenclatura utilizada para os filmes foram: S1, S2, S3...até o S30 (“S” de superfície). O filme S1 refere-se à primeira distância 110mm, a primeira potência 20W e ao primeiro tempo 30 minutos; o filme S2 a distância 110mm, a potência 20W e ao tempo 60 minutos, seguindo assim a sequência de todas as distâncias com todas as potências e todos os tempos até o último filme S30 (distância 150mm, potência 100W e tempo 120minutos).

- (iv) Para caracterização dos filmes produzidos foi utilizado o Espectrofotômetro na região do Ultravioleta, Visível e parte do Infravermelho próximo (UV-Vis-NIR), fabricante Shimadzu modelo UV-2600, operando na região entre 220 nm e 1400 nm com medidas de reflectância, utilizando o acessório esfera de integração permitindo a análise da reflectância em todas as direções. O equipamento está localizado no Laboratório de Síntese e Caracterização de Filmes Finos (LabFilm) no Centro de Energias Alternativas e Renováveis (CEAR) da UFPB.

3.3 ACV DAS SAS PRODUZIDAS – Definição do objetivo e do escopo, e análise de inventário

Esta fase da ACV nos filmes finos produzidos passa pelas seguintes etapas:

- Definição do objetivo e escopo: sistema a ser estudado, limites e unidade funcional do sistema;
- Detalhamento dos processos utilizados na fabricação das superfícies absorvedoras solares do estudo em termos de consumo de materiais e energia (vide item 3.2)
- Coleta de todos os dados desde a entrada (input) até a saída (output) presente no processo de fabricação das SAS;

- d. Construção de inventário dos processos de fabricação das SAS utilizando Magnetron Sputtering com tratamento de substrato por eletropolimento;
- e. Aplicação da metodologia de ACV utilizando o software *Simapro*;

3.3.1 Definição de objetivo e escopo

O objetivo foi definido como a produção de SAS utilizando a técnica *Magnetron Sputtering* e a unidade funcional como 1 processo de fabricação de superfícies absorvedoras solares a base de cromo, em cada processo foi produzido 9 superfícies absorvedoras solares de 30mm x 30mm, de acordo com especificações da máquina Magnetron Sputtering RF Orion 5 (fornecido pela AJA Instruments Inc) instalado no Laboratório de Filmes Finos (LabFilm) da Universidade Federal da Paraíba (UFPB).

Todos os dados coletados e quantificações para os fluxos de entrada e saída dos cenários estudados foram normalizados para a unidade funcional. A avaliação realizada compreende o processo produtivo de superfícies absorvedoras solares a base de cromo, desde a entrada das matérias-primas até a saída do produto final (os filmes finos), definindo o escopo do estudo.

As características (descrição) do processo produtivo dos filmes finos produzidos, foram mostradas no item 3.2. O fluxograma do processo de fabricação dos filmes do estudo, figura 3.4, apresenta as etapas do processo produtivo SAS pela técnica *Sputtering*, sendo a 1ª etapa a limpeza dos substratos (Input), a 2ª etapa a deposição dos filmes finos (processamento - fabricação das SAS), e a 3ª etapa produto final (filmes) (output) e a caracterização das SAS.

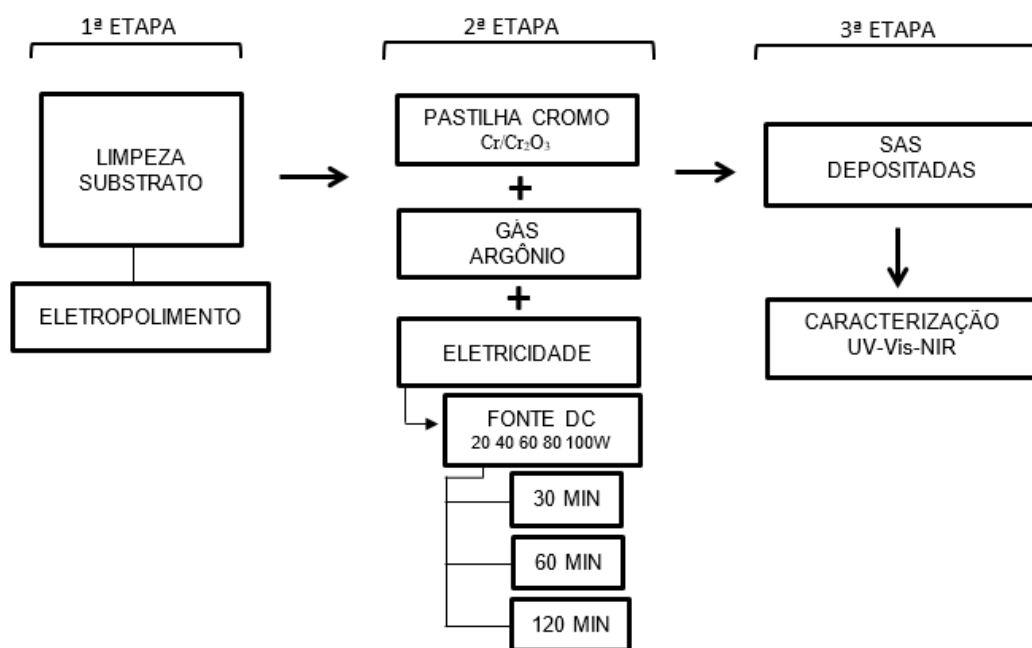


Figura 3. 4 - Fluxogramas do processo de fabricação das SAS do estudo
Para a técnica de *Magnetron Sputtering*, o processo produtivo das SAS (processo contido no estudo) utiliza limpeza do substrato (aço inoxidável), um alvo (pastilha de cromo), injeção de um gás (Argônio) e consumo de energia elétrica.

3.3.2 Análise de Inventários de ciclo de vida das SAS produzidas

Esta fase refere-se à coleta de dados e estabelecimento dos procedimentos de cálculo. Os dados foram identificados e colhidos *in loco* no laboratório de Síntese e Caracterização de Filmes Finos (LabFilm) no Centro de Energias Alternativas e Renováveis (CEAR) da UFPB, gerando os dados necessários a avaliação de ciclo de vida – ACV.

Foi executada a coleta de todas as quantidades e tipos de matérias-primas usadas no processamento e o consumo de energia elétrica (rede brasileira) dos equipamentos utilizadas no processo de produção dos filmes. Então compilados em planilha de Excel e preparado inventário de acordo com as características necessárias ao estudo de ACV (tratamento de dados no software *Simapro*) para quantificar as emissões de GEE.

A partir do inventário de entradas e saídas (matérias primas e energia), modelou-se os quantitativos do processo de fabricação das SAS. Somente os fluxos operacionais foram considerados nesta etapa do trabalho.

Tabela 3. 4 – Inventário do processo de fabricação de SAS utilizando a técnica da *Sputtering* do presente estudo

Inventário das SAS do estudo - técnica <i>Magnetron Sputtering</i>		
Pastilha de Cromo:	1	processo
	0,0294 *	
	0,0587**	
Cr/Cr ₂ O ₃	0,1170***	g
Gás Argônio	0,0892	g
Tratamento Superficial Substrato Aço - Eletropolimento	1	processo
H ₃ PO ₄ (ácido fosfórico)	2,52	g
H ₂ SO ₄ (ácido sulfúrico)	1,37	g
C ₃ H ₈ O ₃ (glicerol)	0,945	g
álcool isopropílico (C ₃ H ₈ O)=isopropanol	2,35	g
Consumo Energia elétrica	1	processo
Eletricidade baixa tensão (Brasil)	0,05831	kWh

(*) consumo para 30 min.; (**) consumo para 60 min.; (***) consumo para 120 min.

A tabela 3.4 descreve o quantitativo utilizado nos processos executados no estudo, considerou-se uma pastilha *cermet* de Cr/Cr₂O₃ (cromo/óxido de cromo (III)), pesada no laboratório, antes e após o processo produtivo (considerando os parâmetros produtivos de potência, distância e tempo de deposição)

No Tratamento Superficial Substrato de Aço inoxidável AISI 304 com dimensões de 30 mm x 30 mm:

- Eletropolimento:
 - 150ml de (H₃PO₄) ácido fosfórico x 1,68g/cm³(densidade) = 252g, com rendimento de 100 processos. Em 1(um) processo tem-se: 252g/100processos = 2,52g gramas por eletrodeposição ou por processo;
 - 75ml de H₂SO₄ (ácido sulfúrico) x 1,83g/cm³ = 137g, com rendimento de 100 processos. Em 1(um) processo tem-se: 137g/100 processos=1,37g gramas por eletrodeposição ou por processo;
 - 75ml de C₃H₈O₃ (glicerol) x 1,26g/cm³=94,5g. com rendimento de 100 processos. Em 1(um) processo tem-se: 94,5g/100processos=0,95gramas por eletrodeposição ou por processo;

- 300ml de álcool isopropílico (C_3H_8O) x $0,786g/cm^3=235g$. com rendimento de 100 processos. Em 1(um) processo tem-se: $235g/100processos=2,35g$ gramas por eletrodeposição ou por processo;

O Gás Argônio ($3C_6H_4(OH)_2O.8Ar.$) com fluxo $10sccm=10\text{ cm}^3/\text{min}$ é injetado no sistema durante 5 minutos para dentro da câmara, pressão a $5,0 \times 10^{-3}$ Torr. Injetando 10cm^3 por minuto, em 5 minutos tem-se o volume de 50cm^3 , logo calculando a massa em gramas ($m=\text{densidade do material} \times \text{volume}$) temos $0,001784g/cm^3(\text{densidade}) \times 50\text{cm}^3 = 0,089205g$.

O consumo de eletricidade de $0,05831\text{kWh}$ encontrado, foi associado a cada processo do *Sputtering* realizado e calculado pela média do consumo das potências de 20, 40, 60, 80, e 100W durante 30, 60 e 120 minutos.

3.4 ACV SAS DA LITERATURA

Esta fase da ACV nos filmes absorvedores solares da literatura contempla as seguintes etapas:

- a. Definição do objetivo e escopo: sistema a ser estudado, limites e unidade funcional do sistema;
- b. Detalhamento dos processos utilizados na fabricação das superfícies absorvedores solares dos autores selecionados da literatura, em termos de consumo de materiais e energia;
- b. Coleta de todos os dados desde a entrada (input) até a saída (output) presente no processo de fabricação das SAS, dos autores selecionados da literatura;
- c. Construção do inventário dos processos de fabricação das SAS dos autores selecionados da literatura, utilizando as técnicas:
 - i. Magnetron Sputtering com um tratamento de substrato: álcool isopropílico e Magnetron Sputtering com dois tratamentos de substrato: limpeza com hexano e eletropolimento.
 - ii. Eletrodeposição com banho de óxido de cromo e ácido hexafluorossilícico) e eletrodeposição com banho de nitrato de potássio, ácido hexafluorossilícico, carbonato de bário, e óxido de cromo, com tratamento superficial por álcool isopropílico e ácido cítrico;

- iii. Eletrodeposição com quatro tratamentos de substrato: limpeza no hexano, passivação química com ácido cítrico, eletropolimento e tratamento térmico;
- d. Aplicação do método ACV nos filmes absorvedores solares da literatura utilizando o software *Simapro*.

3.4.1 Definição de objetivo e escopo SAS da Literatura

Com o objetivo de comparar os dados obtidos na quantificação de emissões de GEE dos filmes produzidos no estudo, foram avaliadas e quantificadas as emissões de GEE de processos de fabricação de SAS de outros autores presentes na literatura que desenvolveram processos laboratoriais de produção de filmes finos.

Assim como na ACV do estudo, a unidade funcional dos estudos da literatura que serão avaliados com objetivo de comparação, também foi definida como processo de fabricação de superfícies absorvedoras solares a base de cromo. Todos os dados coletados e quantificações para os fluxos de entrada e saída dos cenários estudados também foram normalizados para a unidade funcional. A avaliação realizada compreende o processo produtivo de superfícies absorvedoras solares a base de cromo, desde a entrada das matérias-primas até a saída do produto final (os filmes finos).

Os dados identificados e coletados dos processos produtivos das SAS dos autores ocorreram em pesquisas bibliográficas nas publicações dos citados autores: artigo internacional (Andrade (2020)), dissertação de mestrado (Gonçalves (2020)) e tese de doutorado (Medeiros (2020)), além de observação *in loco* na ocasião de sua produção das eletrodeposições das SAS do estudo de Medeiros.

Os processos de fabricação das SAS dos autores a serem analisados utilizaram as técnicas de eletrodeposição e pulverização catódica (*Magnetron Sputtering*). Segue resumo dos processos e seus respectivos autores que passaram por quantificação de emissões de GEE para comparação do estudo:

1. O estudo de Medeiros (2020) avaliou o comportamento das SAS utilizando as técnicas de eletrodeposição e pulverização catódica (*Magnetron Sputtering*), com tratamento de substrato por álcool isopropílico, com caracterização óptica e morfológica:
 - Eletrodeposição com banho 1 (óxido de cromo e ácido hexafluorossilícico) e com banho 2 (nitrato de potássio, ácido

hexafluorossilícico, carbonato de bário, e óxido de cromo) e *Magnetron Sputtering*, com um tratamento de substrato por álcool isopropílico e ácido cítrico;

2. O trabalho de Gonçalves (2020) avaliou o comportamento das SAS obtidas a partir de processo de eletrodeposição comparando quatro tipos diferentes de tratamentos de substrato:
 - Eletrodeposição comparando quatro tratamentos de substrato: limpeza no hexano, passivação química com ácido cítrico, eletropolimento e tratamento térmico;
3. E o estudo de Andrade (2020) que avaliou o efeito do tratamento superficial dos substratos (hexano e eletropolimento) nas propriedades ópticas e morfológicas de superfícies seletivas utilizando pulverização catódica:
 - *Magnetron Sputtering* com dois tratamentos de substrato: limpeza com hexano e eletropolimento.

O estudo de quantificação de emissões de GEE requer detalhamento de todo o processo produtivo (matérias-primas, uso da energia elétrica dos equipamentos, detalhamento das técnicas utilizadas e todo processamento envolvido), ou seja, é necessário o detalhamento, coleta e registro de todo o processo produtivo envolvido na fabricação dos filmes.

a) Detalhamento dos processos produtivos da fabricação de SAS realizados pela autora Medeiros (2020)

A figura 3.5 mostra as etapas do processo produtivo das SAS realizada no estudo de Medeiros (2020) utilizando a técnica da eletrodeposição.

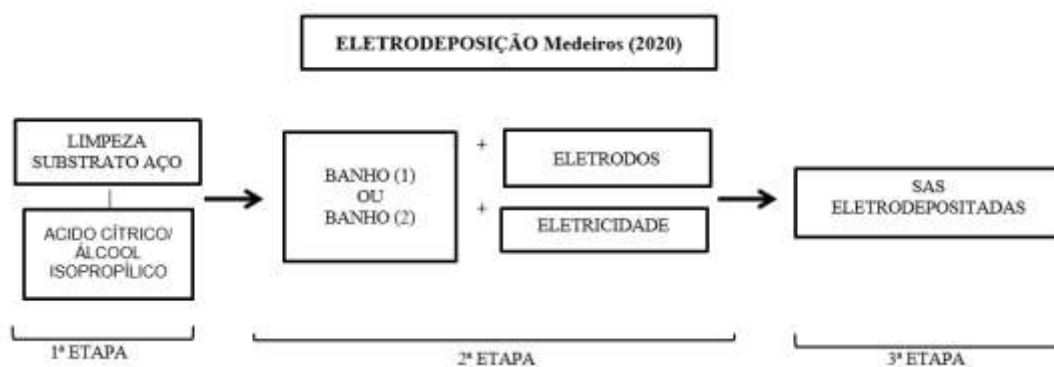


Figura 3. 5 - Fluxograma do processo de fabricação SAS por eletrodeposição
Fonte: Medeiros (2020).

Descrevendo os materiais e processo de fabricação executado por Medeiros (2020) pela técnica da eletrodeposição: antes de iniciar a eletrodeposição, os substratos passam por métodos diferentes de limpeza, em função do tipo de material, a fim de eliminar quaisquer impurezas que podem influenciar nos resultados.

A autora utilizou substrato de aço inoxidável AISI 304, com dimensões de 2 mm x 3mm. Para a limpeza dos substratos a autora utilizou um banho desengordurante preparado com uma solução de 0,768 g/ml de ácido cítrico, então as placas são retiradas da solução e colocadas em um béquer com 0,783g/ml de álcool isopropílico (isopropanol) durante 15 min, sendo sequencialmente lavadas em água destilada, secadas e armazenadas.

Para a realização da eletrodeposição, Medeiros (2020) utilizou dois banhos eletrolíticos: o banho (denominado banho1) com composição de CrO_3 (trióxido de cromo), H_2SiF_6 (ácido hexafluorossilícico) e H_2O (água) e o banho (denominado banho2) com KNO_3 (nitrato de potássio), H_2SiF_6 (ácido hexafluorossilícico), BaCO_3 (carbonato de bário), CrO_3 (trióxido de cromo) e H_2O água.

O substrato de aço inoxidável (eletrodo1) fica ligado ao polo negativo (cátodo) de fonte de alimentação (corrente contínua, 80 W, da marca *Agilent* modelo E3631A), no qual a tensão é controlada (0 – 6 V) e a corrente varia de acordo (máx. 5 A), enquanto que a liga Chumbo/Antimônio (Pb-Sb) (95-5%) (eletrodo 2) fica ligado ao polo positivo (ânodo), variando o tempo de 1, 3, 5, 10, 15, 30, 60 e 120 minutos, distâncias de trabalho de 5 e 10 cm. A energia elétrica usada para energizar os equipamentos foi a eletricidade fornecida pela rede elétrica brasileira.

O principal parâmetro avaliado na pesquisa de Medeiros (2020) foi a capacidade do filme em absorver a energia solar, e para esse fim, todos os revestimentos produzidos no

estudo da autora foram submetidos a caracterização por espectrofotometria UV-Vis-NIR, Perfilometria óptica e Análise por MEV.

Utilizando a técnica de *Magnetron Sputtering*, Medeiros (2020) produziu SAS à base de Cromo. Foi utilizado o sistema para *Sputtering* RF Orion 5, fabricado pela empresa AJA International Inc, localizado no Laboratório de Síntese e Caracterização de Filmes Finos – LabFilm – UFPB.

A figura 3.6 mostra as etapas do processo produtivo das SAS realizada no estudo de Medeiros (2020) utilizando a técnica *Sputtering*.

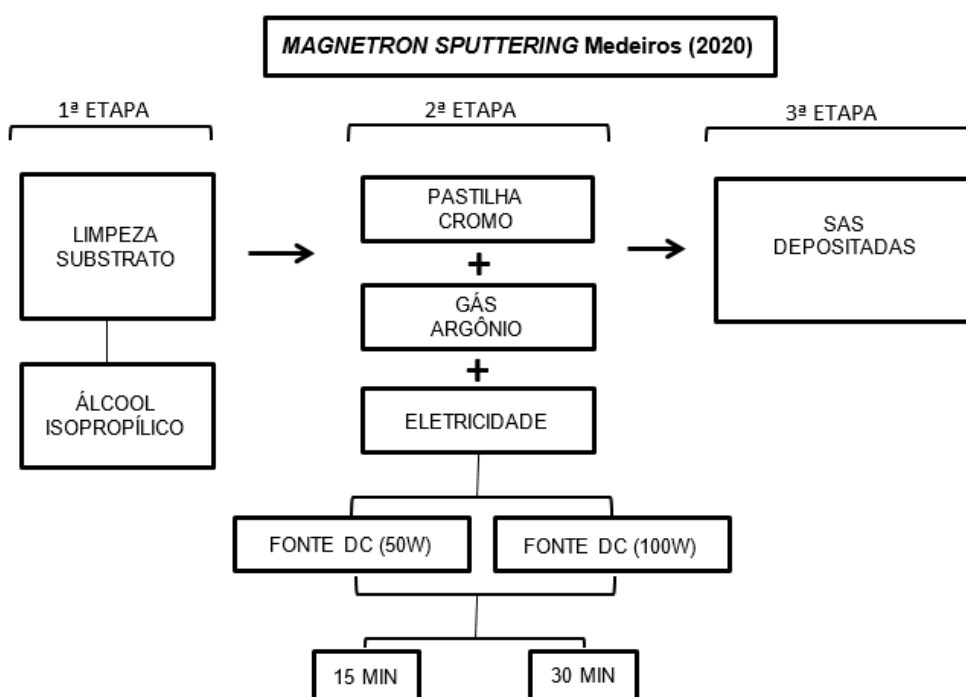


Figura 3. 6 - Fluxograma do processo de fabricação SAS por *Magnetron Sputtering*
Fonte: Medeiros (2020).

De acordo com Medeiros (2020), o processo de fabricação das SAS pela técnica *Sputtering*, descrito no fluxograma da figura 3.6, utilizou um alvo de cromo (Cr) (pureza de 99,95%), diâmetro de 2” (50,8 mm) e espessura de 0,125” (3,175 mm), fornecido pela empresa Kurt J. Lesker, substratos de aço inoxidável AISI 304, limpos com álcool isopropílico por 15 minutos, seco em temperatura ambiente e colocado na câmara de vácuo para início do processo. O alvo e o substrato foram posicionados na câmara de vácuo a uma distância de 105 mm entre si, o substrato rotacionou com velocidade de 20 rpm, e o equipamento foi alimentado pela rede elétrica com potências de trabalho de 50 e 100 watts

em tempos de deposição de 15 e 30 minutos respectivamente, a câmara foi evacuada até a pressão de $1,0 \times 10^{-5}$ Torr com o gás Argônio 5.0, o fluxo na câmara de $10 \text{ cm}^3/\text{min}$.

b) Detalhamento dos processos produtivos da fabricação de SAS realizados por Gonçalves (2020)

A figura 3.7 mostra as etapas do processo produtivo das SAS realizada no estudo de Gonçalves (2020) utilizando a técnica da eletrodeposição.

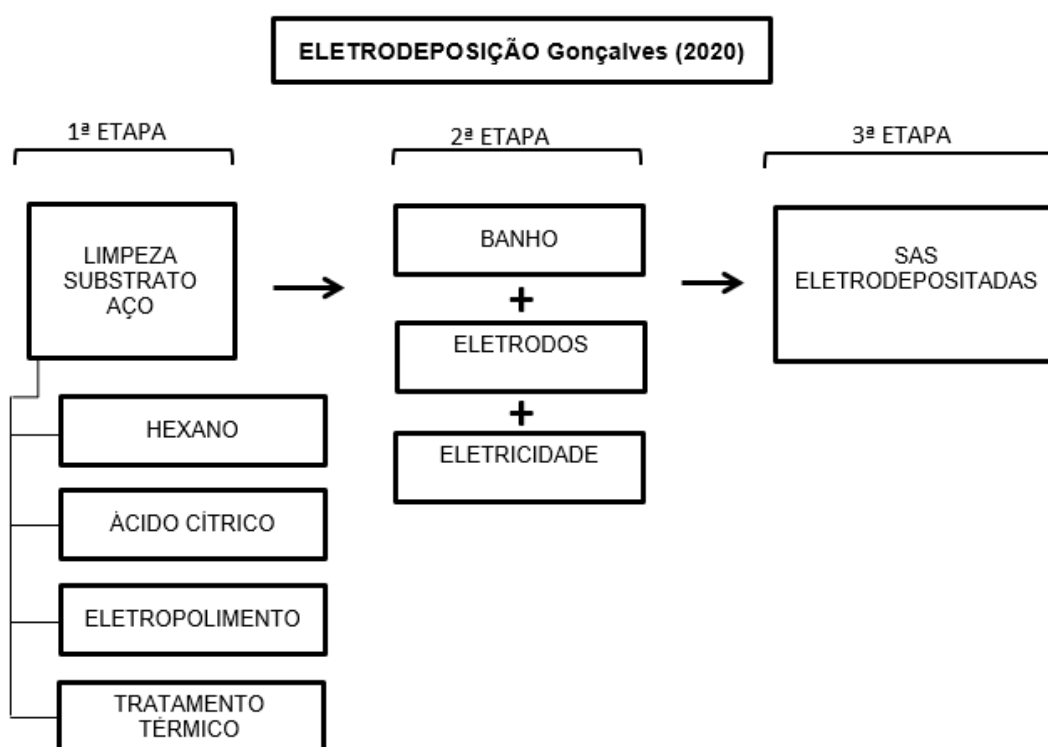


Figura 3. 7 - Fluxograma do processo de fabricação SAS

Fonte: Gonçalves (2020).

No processo de fabricação das SAS do estudo de Gonçalves (2020), o autor produziu as SAS por eletrodeposição, utilizou substrato de aço inoxidável de 6 mm de espessura com dimensões de 25 mm x 20 mm, e aplicou 4 tratamentos superficiais diferentes: limpeza no hexano, passivação química com ácido cítrico, eletropolimento e tratamento térmico, utilizando diferentes parâmetros de eletrodeposição.

Para os tratamentos dos substratos Gonçalves (2020) utilizou na limpeza com Hexano: 300 ml de C_6H_{14} (hexano), por 15 minutos; na Passivação Química: Ácido Cítrico 192,13 g de solução de ácido cítrico anidro, 250 ml de água destilada, o ácido foi diluído na água a 50°C por 10 minutos); no eletropolimento: 150ml de H_3PO_4 (ácido fosfórico), 75ml

H₂SO₄ (ácido sulfúrico), 75 ml C₃H₈O₃ (glicerol) em um béquer de 600 ml. Os substratos foram totalmente submersos na solução. Foi utilizado uma fonte de tensão de corrente contínua configurada para uma tensão de 6 V, utilizando a energia elétrica da rede brasileira. Cada substrato foi eletropolido por 10 minutos. Por fim, no tratamento térmico, os substratos foram colocados em um forno a 750 °C por 1 hora.

Na realização da eletrodeposição, Gonçalves (2020) utilizou tempos diferentes de 30, 60, 120 e 300 segundos e distâncias de trabalho de 15 mm e 30 mm. A solução (banho) preparada para a deposição tem composição de KNO₃ (nitrato de potássio), H₂SiF₆ (ácido hexafluorossilícico), BaCO₃ (carbonato de bário) e CrO₃ (trióxido de cromo), acrescentando 400ml de água destilada.

As amostras de Gonçalves (2020) fabricadas pelo processo de eletrodeposição foram caracterizadas utilizando as técnicas de Espectrofotometria no UV-Vis e Infravermelho, Perfilometria Ótica, Microscopia Eletrônica de Varredura e Difração de Raios-X, e obtiveram propriedades óticas de alta eficiência e absortâncias altas em torno de 98%.

c) Detalhamento da eletrodeposição realizada por Andrade (2020)

A figura 3.8, fluxograma, mostra as etapas do processo produtivo das SAS realizada no estudo de Andrade (2020) utilizando a técnica *Sputtering*.

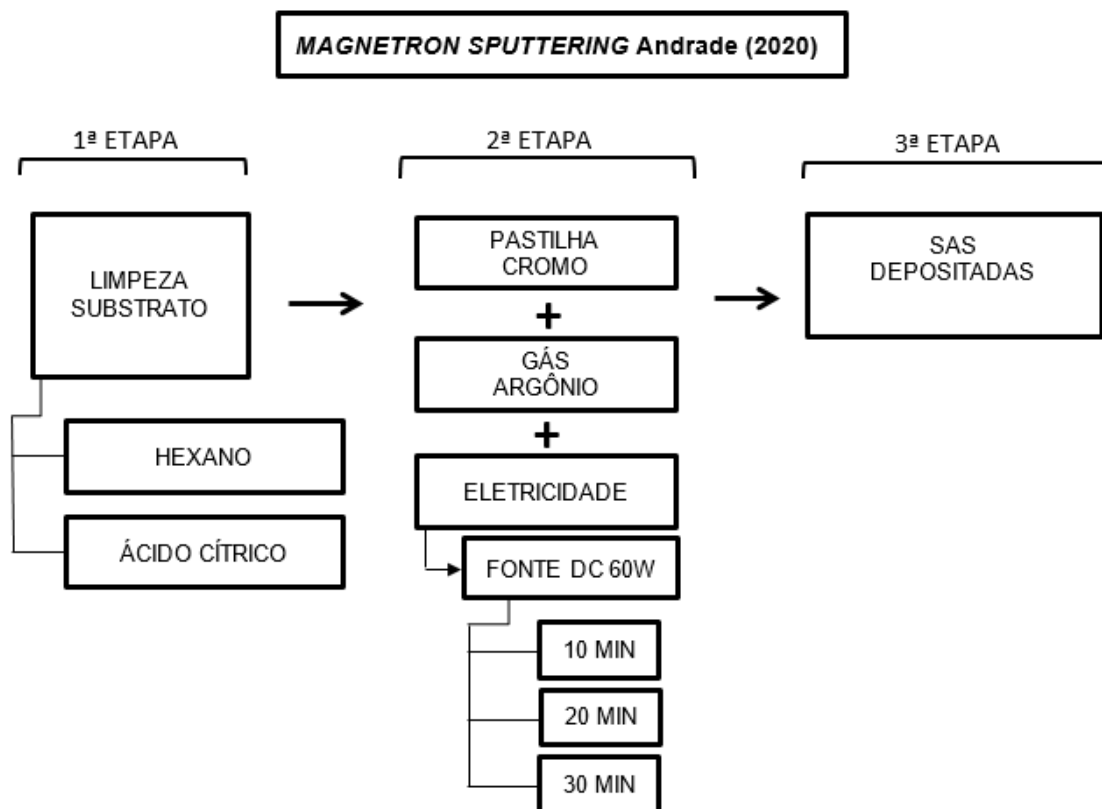


Figura 3. 8 - Fluxograma do processo de fabricação SAS
Fonte: Andrade (2020).

Na pesquisa de Andrade (2020), também foram utilizados substratos de aço inoxidável AISI 304 com dimensões de 30mm x 30mm, submetidos a dois tipos de tratamento superficial (limpeza com hexano e eletropolimento). Na limpeza com hexano (C_6H_{14}) os substratos foram imersos em um béquer por 10 minutos, sendo, posteriormente, lavados em água destilada.

Para a realização do eletropolimento, foi utilizada uma solução de ácido fosfórico, ácido sulfúrico e glicerol, uma malha de aço inoxidável AISI 304, uma fonte de tensão DC onde foi aplicada ao circuito com o polo negativo conectado à malha de aço e ao polo positivo conectado ao substrato. A tensão na fonte foi ajustada com 6 V e a corrente foi mantida em valores próximos a 1,35A. Cada substrato foi eletropolido por 10 minutos, sendo, posteriormente, lavado em água destilada.

O equipamento utilizado para produção das SAS foi *Sputtering* RF Orion 5, fabricado pela empresa *AJA International Inc*, localizado no Laboratório de Síntese e Caracterização de Filmes Finos – LabFilm – UFPB, alimentado com o valor de potência de trabalho desejado para o alvo (60W) e tempos de deposição de 10, 20 e 30 minutos, visando obter revestimentos com diferentes espessuras.

Dois alvos foram utilizados no estudo de Andrade (2020) cromo (Cr) e silício (Si), ambos fabricados comercialmente e de alta pureza, porém nosso estudo se detém apenas a avaliar os filmes a base de cromo, com dimensões de 2" (50,8 mm) de diâmetro e 0,125" (3,175 mm) de espessura.

Na deposição o alvo de cromo foi posicionado na câmara de vácuo a uma distância de 105 mm dos substratos. A câmara foi evacuada com gás Argônio 5.0, com um fluxo de 10 sccm para dentro da câmara, a uma pressão de $1,3 \times 10^{-3}$ Pa e então o gás foi injetado para formar o plasma, um novo equilíbrio de pressão atingido em 0,7 Pa. O equipamento foi fornecido com o valor de energia de trabalho de 60W, por 10 20 e 30 minutos, o substrato girou a uma velocidade de 20 rpm.

Para caracterização dos revestimentos produzidos, estes foram submetidos pela autora à espectrofotometria UV-Vis-NIR, o equipamento utilizado foi um Espectrofotômetro UV-Vis-NIR, modelo UV-2600, da Shimadzu.

3.4.2 Inventário de ciclo de vida das SAS dos outros autores

a) Inventário de ciclo de vida das SAS de Medeiros (2020)

a.1) Eletrodeposição com banho 1 (trióxido de cromo e ácido hexafluorossilícico)

Tabela 3. 5 – Inventário do processo de fabricação utilizando banho 1 na técnica da Eletrodeposição 1 - Medeiros (2020)

Inventário Eletrodeposição 1 - Medeiros (2020)		
Banho1	1	processo
H ₂ O	0,2592	g
H ₂ SiF ₆ (ácido hexafluorossilícico)	0,000220	g
CrO ₃ (trióxido de cromo)	0,0711	g
Eletrodos	1	processo
Antimônio (Sb)	0,000000552	g
Chumbo (Pb)	0,000010485	g
Consumo Energia elétrica	1	processo
Eletricidade baixa tensão (Brasil)	0,058	kWh
Tratamento Superficial Substrato Aço	1	processo
H ₂ O	0,5	g
ácido cítrico (C ₆ H ₈ O ₇)	0,384	g
isopropanol (C ₃ H ₈ O)	0,47	g

A tabela 3.6 descreve o quantitativo utilizado nos processos executados por Medeiros (2020), em substrato de Aço inoxidável AISI 304, com dimensões de 2 mm x 3mm. Na composição da solução eletrolítica, para a eletrodeposição 1 (banho 1), a qual utilizou um banho composto de:

- 0,854g/l de H_2SiF_6 (ácido hexafluorossilícico). Cálculo da massa: $0,854\text{g/l} = m/0,7\text{litros de H}_2\text{O}$, então $m = 0,5978\text{g}$, logo $m = 0,5978\text{g}/2700$ eletrodeposições = $2,21 \times 10^{-4}$ gramas por eletrodeposição ou por processo;
- 274g/l de CrO_3 (trióxido de cromo). Cálculo da massa: $274\text{g/l} = m/0,7\text{litros de H}_2\text{O}$, então $m = 191,8\text{g}$, logo $m = 191,8\text{g}/2700$ eletrodeposições = $7,1 \times 10^{-2}$ gramas por eletrodeposição ou por processo;
- 700ml de água (H_2O). Cálculo da massa por eletrodeposição: 700ml ou 700g de $\text{H}_2\text{O}/2700 = 25,92 \times 10^{-2}$ gramas por eletrodeposição ou por processo;

Para a limpeza dos substratos a autora utilizou um banho desengordurante com solução composta por:

- 0,768g/ml de ácido cítrico ($\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$), a quantidade da solução de ácido cítrico utilizada foi calculada $0,768\text{g/ml} = 192,13\text{g}/250\text{ml}$ de água, (192,13g de ácido cítrico fazem 500 processos, logo $192,13\text{g}/500\text{processos} = 38,4 \times 10^{-2}$ gramas por processo);
- 0,783g/ml de álcool isopropílico (isopropanol), calculados utilizando 300ml do isopropanol ($\text{C}_3\text{H}_8\text{O}$) x $0,786\text{g/cm}^3$ (densidade do $\text{C}_3\text{H}_8\text{O}$) = 235g, logo $235\text{g}/300\text{ml} = 0,783\text{g/ml}$ (235g de isopropanol que fazem 500 processos, logo $235\text{g}/500\text{processos} = 4,7 \times 10^{-1}$ gramas por processo).

Foi utilizado eletrodo de composição 95% Chumbo (Pb) e 5% de Antimônio (Sb):

- Peso do eletrodo 2,98g (pesado no laboratório), sendo 95% de chumbo (Pb) e 5% de antimônio (Sb), logo 2,831g de chumbo e 0,149g de antimônio. Cada eletrodo de 2,98g possui duração de 100 solução eletrolíticas, então 100 banhos x 2700 eletrodeposição = 270000, deste modo $2,831\text{g}/270000 = 1,05 \times 10^{-5}$ de Pb, e $0,149/270000 = 5,52 \times 10^{-7}$ g de Sb por processo.

O cálculo do consumo de energia elétrica foi calculado através da média das potências aplicadas por Medeiros (2020) no sistema, variando entre 10 e 30 watts durante 1 3 5 10 30 60 e 120 minutos ($\sum \text{Potência} = \text{tensão aplicada na fonte de alimentação}$

$[V] \cdot \text{corrente}[A] = P \times [W] \times \text{durante } T [min]$), considerando apenas filmes com absorvidade >90%.

a.2) Eletrodeposição com banho 2 (nitrato de potássio, ácido hexafluorossilícico, carbonato de bário, e óxido de cromo)

Tabela 3. 6 – Inventário do processo de fabricação utilizando banho 2 na técnica da Eletrodeposição 2 - Medeiros (2020)

Inventário técnica eletrodeposição2 - Medeiros (2020)		
Banho 2	1	processo
H ₂ O	0,2593	g
H ₂ SiF ₆ (ácido hexafluorossilícico)	0,000467	g
CrO ₃ (óxido de cromo (VI))	0,0944	g
BaCrO ₃ (carbonato de bário)	0,00236	g
KNO ₃ (nitrato de potássio)	0,000596	g
Eletrodos	1	processo
Antimônio (Sb)	0,000000552	g
Chumbo (Pb)	0,000010485	g
Consumo Energia elétrica	1	processo
Eletricidade baixa tensão (Brasil)	0,014	kWh
Tratamento Superficial Substrato Aço	1	processo
H ₂ O	0,500	g
ácido cítrico (C ₆ H ₈ O ₇)	0,384	g
isopropanol (C ₃ H ₈ O)	0,470	g

Fonte: Medeiros (2020).

A tabela 3.6 descreve o quantitativo utilizado nos processos executados por Medeiros (2020), em substrato de Aço inoxidável AISI 304, com dimensões de 2 mm x 3mm. Na composição da solução eletrolítica, para a eletrodeposição 2 (banho2), onde utilizou um banho composto de:

- 1,8g/l de H₂SiF₆ (ácido hexafluorossilícico). Cálculo da massa: 1,8g/l=m/0,7litros de H₂O, então m= 1,26g, logo m= 1,26g/2700 eletrodeposições= 4,67x10⁻⁴gramas por eletrodeposição ou por processo;
- 364g/l de CrO₃ (trióxido de cromo). Cálculo da massa: 364g/l=m/0,7litros de H₂O, então m= 254,8g, logo m= 254,8g/2700 eletrodeposições=9,44x10⁻²gramas por eletrodeposição ou por processo;

- 9,1g/l de BaCO_3 (carbonato de bário). Cálculo da massa: $9,1\text{g/l} = m/0,7\text{l}$ litros de H_2O , então $m = 6,37\text{g}$, logo $m = 6,37\text{g}/2700$ eletrodeposições = $2,36 \times 10^{-3}$ gramas por eletrodeposição ou por processo;
- 2,3g/l de KNO_3 (nitrato de potássio). Cálculo da massa utilizando a equação de concentração $C = m/V$: $2,3\text{g/l} = m/0,7\text{l}$ litros de H_2O , então $m = 2,3\text{g/l} \times 0,7\text{l} = 1,61\text{g}$ de KNO_3 . Então em 1(um) processo tem-se: $1,61\text{g}/2700$ eletrodeposições = $5,96 \times 10^{-4}$ gramas por eletrodeposição ou por processo;
- 700ml de água (H_2O). Cálculo da massa por eletrodeposição: 700ml ou 700g de $\text{H}_2\text{O}/2700 = 25,92 \times 10^{-2}$ gramas por eletrodeposição ou por processo;

Para o tratamento dos substratos a autora utilizou um banho desengordurante preparado com uma solução, que tem duração de 500 processos:

- 0,768 g/ml de ácido cítrico ($\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$). Cálculo da massa por eletrodeposição: $0,768\text{g/ml} = m/250\text{ml}$ de água, logo $m = 192\text{g}$. Então em 1(um) processo tem-se: $192\text{g}/500\text{processos} = 3,84 \times 10^{-1}$ gramas por processo ou por eletrodeposição;
- 300ml do isopropanol ($\text{C}_3\text{H}_8\text{O}$), onde $0,786\text{g/cm}^3$ (densidade do $\text{C}_3\text{H}_8\text{O}$). Cálculo da massa por processo: $d = m/V$, $m = 0,786\text{g/cm}^3 \times 300\text{ml}$, $m = 235,8\text{g}$. Então em 1(um) processo tem-se: $235,8\text{g}/500\text{processos} = 4,7 \times 10^{-1}$ gramas por processo ou por eletrodeposição;

Foi utilizado eletrodo de composição 95% Chumbo (Pb) e 5% de Antimônio (Sb):

- Peso do eletrodo 2,98g (pesado no laboratório), sendo 95% de chumbo (Pb) e 5% de antimônio (Sb), logo 2,831g de chumbo e 0,149g de antimônio. Cada eletrodo de 2,98g possui duração de 100 solução eletrolíticas, então 100 banhos \times 2700 eletrodeposição = 270000, deste modo $2,831\text{g}/270000 = 1,05 \times 10^{-5}$ de Pb, e $0,149/270000 = 5,52 \times 10^{-7}$ de Sb por processo ou eletrodeposição.

O cálculo do consumo de energia elétrica foi calculado através da média das potências aplicadas por Medeiros (2020) no sistema, 9 e 18watts, variando 5 e 10 minutos. ($\sum \text{Potência} = \text{tensão aplicada na fonte de alimentação [V]} \times \text{corrente [A]} = P \times [W] / \text{durante T [min]}$), considerando apenas filmes com absorvidade >90%.

a.3) *Magnetron Sputtering* com um tratamento de substrato álcool isopropílicoTabela 3. 7 – Inventário do processo de fabricação de SAS utilizando a técnica da *Sputtering*, Medeiros (2020)

Inventário <i>Magnetron Sputtering</i> - Medeiros (2020)		
Pastilha de Cromo:	1	processo
Cr(cromo)	0,01224	g
Gás Argônio	0,08920	g
Tratamento Substrato Aço	1	processo
isopropanol (C ₃ H ₈ O)	0,470	g
Consumo Energia elétrica	1	processo
Eletricidade baixa tensão (Brasil)	0,0583125	kWh

Fonte: Medeiros (2020).

A tabela 3.7 descreve o quantitativo utilizado nos processos executados por Medeiros (2020) considerou uma pastilha cromo que foi pesada no laboratório, antes e após o processo produtivo (considerando os parâmetros produtivos de potência, distância e tempo de deposição).

O Gás Argônio (3C₆H₄(OH)₂O.8Ar.) com fluxo 10sccm=10 cm³/min, o gás é injetado no sistema durante 5 minutos para dentro da câmara, fazendo com que um novo equilíbrio de pressão a 5,0x10⁻³ Torr. Então, injetando 10cm³ em 1 minuto logo em 5 minutos (filmes com absorvidade >90%) tem-se o volume de 50 cm³, logo calculando a massa em gramas (m=densidade do material x volume) temos 0,001784g/cm³(densidade) x 50cm³ = 0,089205g.

Para a limpeza dos substratos a autora utilizou:

- 0,783g/ml de álcool isopropílico (isopropanol), calculados utilizando 300ml do isopropanol (C₃H₈O) x 0,786g/cm³(densidade do C₃H₈O) = 235g, logo 235g/300ml = 0,783g/ml (235g de isopropanol que fazem 500 processos, logo 235g/500processos=0,47g/processo).

O consumo de eletricidade associado a cada processo de *Sputtering* foi calculado pela média do consumo das potências aplicadas por Medeiros (2020) no sistema (50 e 100W) durante 15 e 30 minutos descritos na tabela 08.

b) Inventário de ciclo de vida das SAS de Gonçalves (2020)

b.1) Eletrodeposição com quatro tratamentos de substrato: limpeza com hexano, passivação química com ácido cítrico, eletropolimento e tratamento térmico.

Tabela 3. 8 – Inventário do processo de fabricação utilizando a técnica da Eletrodeposição – Gonçalves (2020)

Inventário Eletrodeposição - Gonçalves (2020)		
Banho	1	processo
H ₂ O	0,14815	g
H ₂ SiF ₆ (ácido hexafluorossilícico)	0,00027	g
CrO ₃ (óxido de cromo (VI))	0,05393	g
BaCrO ₃ (carbonato de bário)	0,00135	g
KNO ₃ (nitrato de potássio)	0,00034	g
Eletrodos	1	processo
Antimônio (Sb)	0,000000552	g
Chumbo (Pb)	0,000010485	g
Tratamento Superficial Substrato Aço	1	processo
H ₂ O	0,500	g
ácido cítrico (C ₆ H ₈ O ₇)	0,3843	g
Tratamento Superficial Substrato Aço - Hexano	1	processo
C ₆ H ₁₄ (hexano)	0,3960	g
Tratamento Superficial Substrato Aço - Eletropolimento	1	processo
H ₃ PO ₄ (ácido fosfórico)	2,52	g
H ₂ SO ₄ (ácido sulfúrico)	1,37	g
C ₃ H ₈ O ₃ (glicerol)	0,945	g
álcool isopropílico (C ₃ H ₈ O)=isopropanol	2,35	g
Tratamento Superficial Substrato Aço - Trat. térmico a 750°C	1	processo
Eletricidade baixa tensão (Brasil)	2,190	kWh
Consumo Energia elétrica- eletrodeposição	1	processo
Eletricidade baixa tensão (Brasil)	0,0189	kWh

Fonte: Gonçalves (2020).

A tabela 3.8 descreve o quantitativo utilizado nos processos executados por Gonçalves (2020). O autor produziu as SAS por eletrodeposição, utilizou substrato de aço inoxidável de 6 mm de espessura com dimensões de 25 mm x 20 mm, e aplicou 4 tratamentos superficiais diferentes: limpeza no hexano, passivação química com ácido cítrico, eletropolimento e tratamento térmico. Na composição da solução eletrolítica, para a eletrodeposição utilizou um banho composto de:

- 1,8g/l de H_2SiF_6 (ácido hexafluorossilícico). Cálculo da massa: $1,8\text{g/l} = m/0,4\text{l}$ litros de H_2O , então $m = 0,72\text{g}$, logo $m = 0,72\text{g}/2700$ eletrodeposições = $2,66 \times 10^{-4}$ gramas por eletrodeposição ou por processo;
- 364g/l de CrO_3 (trióxido de cromo). Cálculo da massa: $364\text{g/l} = m/0,4\text{l}$ litros de H_2O , então $m = 145,6\text{g}$, logo $m = 145,6\text{g}/2700$ eletrodeposições = $5,39 \times 10^{-2}$ gramas por eletrodeposição ou por processo;
- 9,1g/l de BaCO_3 (carbonato de bário). Cálculo da massa: $9,1\text{g/l} = m/0,4\text{l}$ litros de H_2O , então $m = 3,64\text{g}$, logo $m = 3,64\text{g}/2700$ eletrodeposições = $1,35 \times 10^{-3}$ gramas por eletrodeposição ou por processo;
- 2,3g/l de KNO_3 (nitrato de potássio). Cálculo da massa: $2,3\text{g/l} = m/0,4\text{l}$ litros de $\text{H}_2\text{O} = 0,92\text{g}$ de KNO_3 . Então em 1(um) processo tem-se: $0,92\text{g}/2700$ eletrodeposições = $3,41 \times 10^{-4}$ gramas por eletrodeposição ou por processo;
- 400ml de água (H_2O). Cálculo da massa por eletrodeposição: 400ml ou 400g de $\text{H}_2\text{O}/2700 = 14,81 \times 10^{-2}$ gramas por eletrodeposição ou por processo.

Para o tratamento dos substratos o autor utilizou:

- Para passivação química com ácido cítrico usou 0,768g/ml. Cálculo da massa $m = 192,13\text{g} = 0,768\text{g/ml} \times 250\text{ml}$ de H_2O . Então em 1(um) processo tem-se: $192,13\text{g}/500$ eletrodeposições ou processo = $38,43 \times 10^{-2}$ gramas por eletrodeposição ou por processo;
- Hexano: foram utilizados 198g, calculados a partir de 300ml de C_6H_{14} x $0,66\text{g/cm}^3$ (densidade) = 198g com duração de 500 processos. Então em 1(um) processo tem-se: $198\text{g}/500$ eletrodeposições ou processo = 0,396 gramas por eletrodeposição ou por processo;
- Eletropolimento:
 - 150ml de H_3PO_4 x $1,68\text{g/cm}^3$ (densidade) = 252g. Em 1(um) processo tem-se: $252\text{g}/100$ eletrodeposições ou processo = 2,52g gramas por eletrodeposição ou por processo;
 - 75ml de H_2SO_4 x $1,83\text{g/cm}^3$ = 137g. Em 1(um) processo tem-se: $137\text{g}/100$ eletrodeposições ou processo = 1,37g gramas por eletrodeposição ou por processo;

- 75ml de $C_3H_8O_3$ x $1,26g/cm^3=94,5g$. Em 1(um) processo tem-se: 94,5g/100eletrodeposições ou processo=0,95g gramas por eletrodeposição ou por processo;
- 300ml de C_3H_8O x $0,786g/cm^3=235g$. Em 1(um) processo tem-se: 235g/100eletrodeposições ou processo=2,35g gramas por eletrodeposição ou por processo;
- Tratamento Térmico:
 - Foi aplicado uma temperatura de 750°C durante 1hora no forno de 3500 watts, sua temperatura máxima 1200 graus Celsius. Então para calcular o consumo de eletricidade tem-se: 1horax 3,5kW x (temperatura do aplicada no forno: 750°C/temperatura máxima do forno: 1200 °C) = 2,1875kWh.

O cálculo do consumo de energia elétrica foi calculado através da média da potência aplicada por Gonçalves (2020) no sistema nas eletrodeposições, 30watts durante 30s, 1, 2, 5 minutos nutos descritos (\sum Potência = tensão aplicada na fonte de alimentação [6V]*corrente[5A] = 30 [W] durante 0,5;1;2 e 5 [min]), considerando apenas filmes com absorvidade > 90%, mais o consumo de eletricidade no tratamento térmico.

c) Inventário de ciclo de vida das SAS de Andrade

c.1) Magnetron Sputtering com dois tratamentos de substrato: limpeza com hexano e eletropolimento

Tabela 3. 9 – Inventário do processo de fabricação de SAS utilizando a técnica da *Sputtering*, Andrade (2020)

Inventário <i>Magnetron Sputtering</i> - Andrade (2020)		
Pastilha de Cromo:	1	g
Cr(cromo)	0,0000376	g
Gás Argônio	0,089205	g
Tratamento Superficial Substrato Aço - Hexano	1	processo
C ₆ H ₁₄ (hexano)	1,98	g
Tratamento Superficial Substrato Aço - Eletropolimento	1	processo
H ₃ PO ₄ (ácido fosfórico)	2,52	g
H ₂ SO ₄ (ácido sulfúrico)	1,37	g
C ₃ H ₈ O ₃ (glicerol)	0,945	g
álcool isopropílico (C ₃ H ₈ O)=isopropanol	2,35	g
Consumo Energia elétrica	1	processo
Eletricidade baixa tensão (Brasil)	0,0583125	kWh

Fonte: Andrade (2020).

A tabela 3.9 descreve o quantitativo utilizado nos processos executados por Andrade (2020), considerou-se uma pastilha de cromo que foi pesada no laboratório, antes e após o processo produtivo (considerando os parâmetros produtivos de potência, distância e tempo de deposição).

No Tratamento Superficial Substrato de Aço inoxidável AISI 304 com dimensões de 30 mm x 30 mm:

- Hexano: foram utilizados 198g, calculados a partir de 300ml de C₆H₁₄ x 0,66g/cm³(densidade) =198g com duração de 100 processos. Então em 1(um) processo tem-se: 198g/100 eletrodeposições ou processo= 1,98gramas por eletrodeposição ou por processo;
- Eletropolimento:
 - 150ml de H₃PO₄ x 1,68g/cm³(densidade) = 252g. Em 1(um) processo tem-se: 252g/100eletrodeposições ou processo=2,52g gramas por eletrodeposição ou por processo;

- 75ml de H_2SO_4 x $1,83\text{g}/\text{cm}^3=137\text{g}$. Em 1(um) processo tem-se: $137\text{g}/100$ eletrodeposições ou processo= $1,37\text{g}$ gramas por eletrodeposição ou por processo;
- 75ml de $\text{C}_3\text{H}_8\text{O}_3$ x $1,26\text{g}/\text{cm}^3=94,5\text{g}$. Em 1(um) processo tem-se: $94,5\text{g}/100$ eletrodeposições ou processo= $0,95\text{g}$ gramas por eletrodeposição ou por processo;
- 300ml de $\text{C}_3\text{H}_8\text{O}$ x $0,786\text{g}/\text{cm}^3=235\text{g}$. Em 1(um) processo tem-se: $235\text{g}/100$ eletrodeposições ou processo= $2,35\text{g}$ gramas por eletrodeposição ou por processo;

O Gás Argônio ($3\text{C}_6\text{H}_4(\text{OH})_2\text{O}.8\text{Ar}$.) com fluxo $10\text{sccm}=10\text{ cm}^3/\text{min}$, o gás é injetado no sistema durante 5 minutos para dentro da câmara, fazendo com que um novo equilíbrio de pressão a $5,0 \times 10^{-3}$ Torr. Então, injetando 10cm^3 em 1 minuto logo em 5 minutos (filmes com absorvidade $>90\%$) tem-se o volume de 50cm^3 , logo calculando a massa em gramas ($m=\text{densidade do material} \times \text{volume}$) temos $0,001784\text{g}/\text{cm}^3(\text{densidade}) \times 50\text{cm}^3 = 0,089205\text{g}$.

O consumo de eletricidade associado a cada processo de *Sputtering* foi calculado pela média do consumo da potência de 60W durante de 10, 30 e 60 minutos.

O consumo de energia elétrica considerado nos cálculos da eletricidade foi a fornecida pela rede elétrica brasileira em 2019 (DINIZ, CARVALHO, ABRAHÃO; 2021) 66.67% hidrelétrica, 9.28% gás natural, 9.15% eólica, 8.25% bagaço da cana de açúcar, 2.79% nuclear, 1.62% carvão, 1.55% petróleo, e 0.69% solar (estes valores já incluem importações da Argentina, Paraguai, Uruguai e Venezuela (combinação de hidroelétricas e termelétricas a gás natural).

Os dados secundários de produção dos insumos químicos, água e produção de cada tipo de energia são obtidos utilizando a base de dados Ecoinvent 3.6 e precisou ser adaptada para obtenção do trióxido de cromo, combinando oxigênio e dióxido de cromo.

CAPÍTULO IV - RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados e discussões apresentados a seguir seguem a sequência de atendimento aos propósitos do estudo: estrutura do campo de conhecimento da pesquisa e análise de redes; absorvidade da superfície absorvedora solar obtida; quantitativo das emissões de GEE da superfície absorvedora solar obtida; quantitativo das emissões de GEE dos filmes absorvedores da literatura; comparação das superfícies obtidas com as superfícies da literatura em termos de absorvidade e emissão de GEE.

4.1 REVISÃO BIBLIOMÉTRICA

A tabela 4.1 mostra as sequências de *strings* que foram utilizadas com os seus respectivos resultados de busca:

Tabela 4. 1 – Strings e seus respectivos resultados de busca na base Scopus realizada em 14 de setembro 2021

Strings de busca (query):	Resultado da busca (nº de artigos):
TITLE-ABS-KEY (((("solar") AND ("Life cycle" OR "LCA" OR "carbon emission*" OR "carbon footprint*" OR "GHG" OR "greenhouse gas emission*" OR "environmental impact*" OR "environmental load*")))) AND (LIMIT-TO (DOCTYPE , "ar") OR LIMIT-TO (DOCTYPE , "re")))	8.875
TITLE-ABS-KEY (((("solar energy") AND ("Life cycle" OR "LCA" OR "carbon emission*" OR "carbon footprint*" OR "GHG" OR "greenhouse gas emission*" OR "environmental impact*" OR "environmental load*")))) AND (LIMIT-TO (DOCTYPE , "ar") OR LIMIT-TO (DOCTYPE , "re")))	3.275
TITLE-ABS-KEY ((("Selective solar surfac*" OR "thin film*" OR "Collectors solar" OR "solar thermal energy" OR "Deposition techniques" OR "Black Chrom*" OR "Electrodeposition" OR "Sputtering") AND ("Life cycle" OR "LCA" OR "carbon emission*" OR "carbon footprint*" OR "GHG" OR "greenhouse gas emission*" OR "environmental impact*" OR "environmental load*")	823

) AND (LIMIT-TO (DOCTYPE , "ar") OR LIMIT-TO (DOCTYPE , "re"))	
TITLE-ABS-KEY((((("Selective solar surfac*" OR "thin film*") OR ("Collectors solar") OR ("solar thermal energy")) AND ("Life cycle" OR "LCA" OR "carbon emission*" OR "carbon footprint*" OR "GHG" OR "greenhouse gas emission*" OR "environmental impact*" OR "environmental load*")))) AND (LIMIT-TO (DOCTYPE , "ar") OR LIMIT-TO (DOCTYPE , "re"))	684
TITLE-ABS-KEY ((("solar" AND (("Life cycle" OR "LCA" OR "carbon emission*" OR "carbon footprint*" OR "GHG" OR "greenhouse gas emission*" OR "environmental impact*" OR "environmental load*"))) AND ("Selective surfac*" OR "thin film*" OR "Deposition techniques" OR "Black Chrom*" OR "Electrodeposition" OR "Sputtering")))) AND (LIMIT-TO (DOCTYPE , "ar") OR LIMIT-TO (DOCTYPE , "re"))	154
TITLE-ABS-KEY (((("Selective solar surfac*" OR "thin film*" OR "Collectors solar" OR "solar thermal energy") AND ("Deposition techniques" OR "Black Chrom*" OR "Electrodeposition" OR "Sputtering")) AND ("Life cycle" OR "LCA" OR "carbon emission*" OR "carbon footprint*" OR "GHG" OR "greenhouse gas emission*" OR "environmental impact*" OR "environmental load*"))) AND (LIMIT-TO (DOCTYPE , "ar") OR LIMIT-TO (DOCTYPE , "re"))	36
TITLE-ABS-KEY ((("Selective surfac*" OR "thin film*") AND ("Deposition techniques" OR "Electrodeposition" OR "Sputtering")) AND ("Black Chrom*"))) AND (LIMIT-TO (DOCTYPE , "ar"))	09
TITLE-ABS-KEY (("Selective solar surfac*" OR "thin film*" OR "Collectors solar" OR "solar thermal energy") AND ("Deposition techniques" OR "Electrodeposition" OR "Sputtering")) AND ("Black Chrom*")) AND (LIMIT-TO (DOCTYPE , "ar"))	04
TITLE-ABS-KEY (("Selective solar surfac*" OR "thin film*" OR "Collectors solar" OR "solar thermal energy") AND ("Deposition techniques" OR "Electrodeposition" OR "Sputtering")) AND ("Black Chrom*")) AND ("Life cycle" OR "LCA" OR "carbon emission*" OR "carbon footprint*" OR "GHG" OR "greenhouse gas emission*" OR "environmental impact*" OR "environmental load*"))	Nenhum documento encontrado

Fonte: Autora.

A 1ª *string* de busca utilizada foi focada no termo geral “Solar” e “ACV – Análise do Ciclo de Vida”, visto que, inicialmente se pretendia visualizar como se desenhavam as pesquisas no campo desses dois termos, obteve-se uma amostra 8.875 publicações, sendo artigos e revisões. As áreas temáticas que se destacaram e concentraram os maiores números

de publicação foram Energia, Ciência Ambiental e Engenharia, com 24,3%, 19,3% e 18,2, respectivamente, do total da amostra, de acordo com a figura 4.1.

Áreas temáticas	nº de artigos
Energia	4192
Ciência ambiental	3338
Engenharia	3136
Ciência de materiais	866
Ciências Sociais	746
Ciências da Terra e Planetárias	696
Engenheiro químico	545
Química	535
Física e Astronomia	509
Ciências Agrárias e Biológicas	485
Matemática	419
Negócios, Gestão e Contabilidade	410
Ciência da Computação	348
Bioquímica, Genética e Biologia Molecular	205
Economia, econometria e finanças	205
Medicina	196
Multidisciplinar	184
Imunologia e Microbiologia	55
Farmacologia, Toxicologia e Farmacêutica	47
Ciências da Decisão	46
Artes e Humanidades	45
Psicologia	13
Neurociência	11
Veterinário	10
Profissões de Saúde	6
Enfermagem	5

Figura 4. 1 - Áreas temáticas com maiores números de publicação
Fonte: Autora.

No intuito de verificar a evolução das pesquisas no campo geral da análise do ciclo de vida em estudos solares, a amostra de 8.875 documentos publicados (artigos e revisões) mostra uma curva, na Figura 4.2, com uma evolução sempre crescente no decorrer dos 50 anos da amostra, iniciada em 1971 com 01 documento até os dias atuais (14 de setembro de 2021) com 1055 documentos.

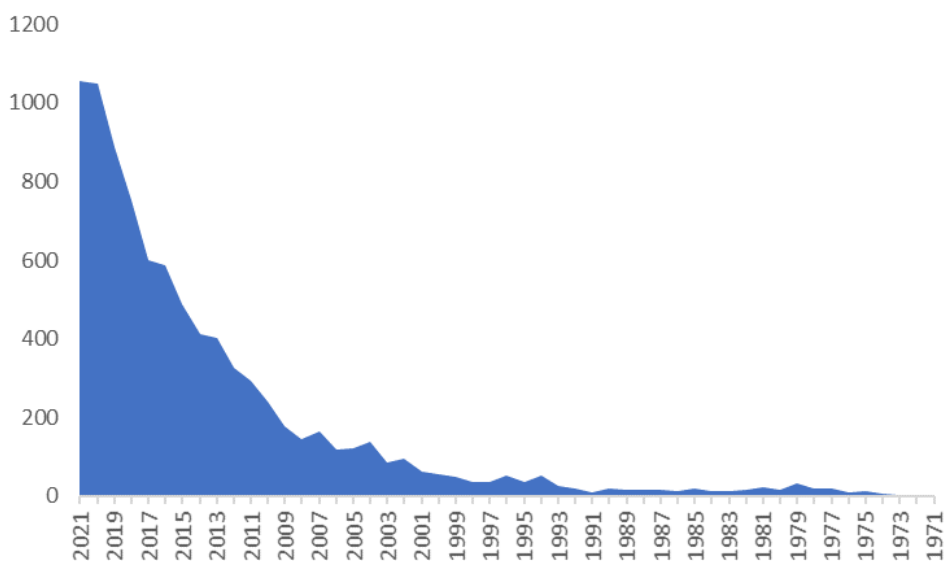


Figura 4. 2 - Evolução no decorrer dos anos da amostra de 8875 documentos com os termos gerais “Solar” e ”ACV”

Fonte: Autora.

Seguindo as sequências de buscas de acordo com as *strings* selecionadas, verifica-se que inserindo o termo “Energy” na *string* anterior, ou seja, a composição “Energia solar” x “ACV”, a amostra reduz para 3.275 documentos (artigos e revisões) mostrando abrangência dos termos ao utilizarmos o conectivo “AND”.

Restringindo a pesquisa com termos mais específicos e de interesse do estudo da pesquisa: “ (“Selective solar surfac*” ou “thin film*” ou “Collectors solar” ou “solar thermal energy” ou “Deposition techniques” ou “Black Chrom*” ou “Electrodeposition” OR “Sputtering”) AND (“Life cycle” OR “LCA” OR “carbon emission*” OR “carbon footprint*” OR “GHG” OR “greenhouse gás emission*” OR “environmental impact*” OR “environmental load*”), ou seja, Superfície Solar Seletiva(SAS) ou o sinônimo Filme fino, Coletores Solares ou Energia Solar térmica ou Técnicas de Deposição ou Cromo negro ou eletrodeposição ou *Sputtering*, e ACV com alguns de seus sinônimos, verificou-se uma amostra de 823 documentos entre artigos e revisões.

Fazendo uma análise nesta amostra de 823 documentos que envolve os termos de coletores solares e superfícies absorvedoras solares (SAS), em termos de anos e países, observa-se uma tendência crescente no número de estudos que envolvem a área. A Figura 4.3 mostra a evolução desde o ano de 1968 até os dias atuais (dia da pesquisa 14 de setembro de 2021), análise importante devido a observação de declives (entre 2002 e 2003) no decorrer dos anos, veja que em 1974(1)...1999 (8 documentos), 2000 (13), 2001(22 documentos),

2002 (14), 2003 (12), 2004 (21), 2005(27), porém em análise global houve picos e tendência de crescimento nas pesquisas na área da busca, meados de 2005 chegou a uma média de 30 documentos publicados na área e 2020 com 78 entre artigos e revisões.

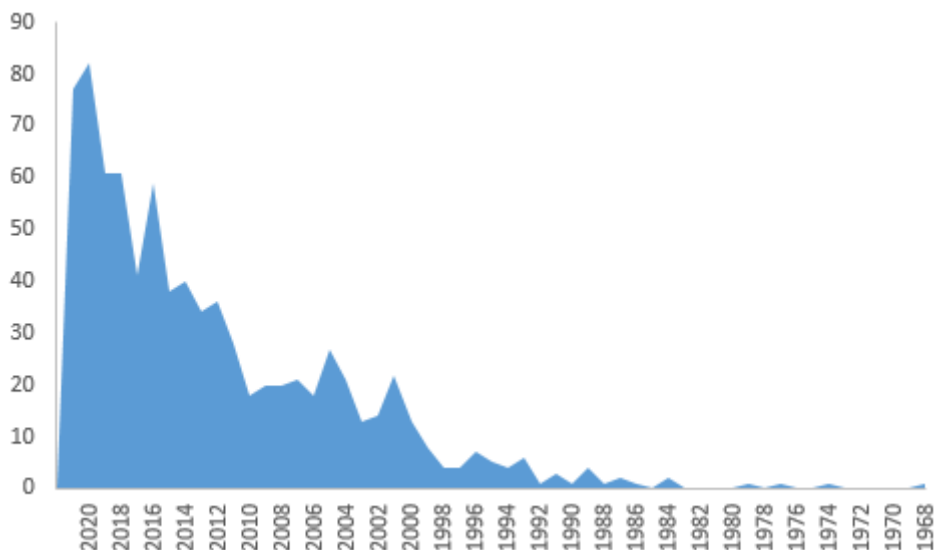


Figura 4. 3 - Evolução por ano do número de publicações da amostra de 823 documentos

A Figura 4.4 mostra uma performance de comportamento das publicações nos países do mundo entre os anos pesquisados de 1971 a 2021, tendo destaque os Estados Unidos da América com quase 200 documentos (entre artigos e revisões), logo em seguida China, o Reino Unido, Itália e Japão, na lista encontramos o Brasil com a marca de 20 publicações.

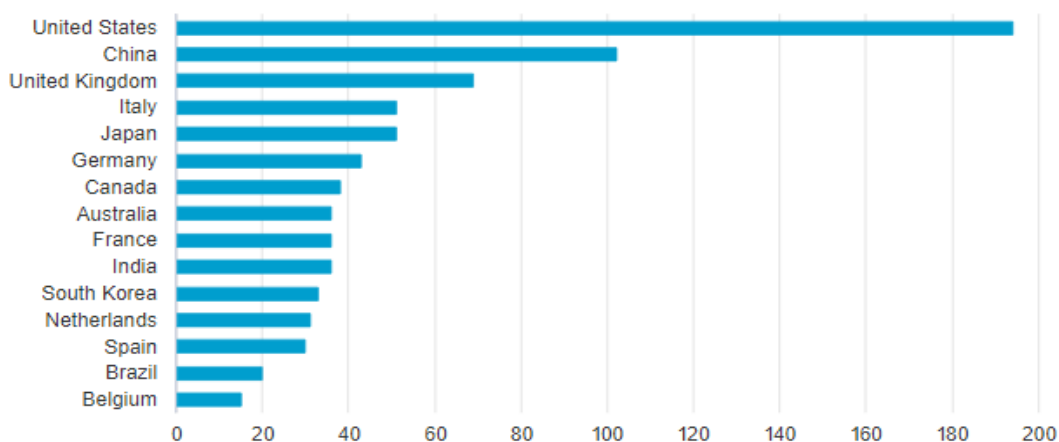


Figura 4. 4 - Evolução do número de publicações nos países no mundo de acordo com amostra de 823 documentos, foco em Solar x ACV

Corroborando com este gráfico de barras mostrado na Figura 4.3, o gráfico de redes de coautoria apresenta a análise em países, gerado no *software VosvieWer* a partir dos metadados exportados para o *Excel* da pesquisa de 823 documentos na base Scopus. Percebe-se a formação de 7 clusters, de acordo com as 7 cores mostradas na figura 4.5. Na rede formada entre os países, percebe-se o Estados Unidos da América - EUA (cluster roxo) em destaque no tamanho do frame e número de cocitações, justifica-se tal evidência com 194 documentos e 31 ligações, seguido da China (cluster azul claro) com 106 documentos e 20 ligações, o Brasil apresenta 20 documentos e 7 ligações, se encontra no cluster laranja, com Portugal e Canadá em correlação.

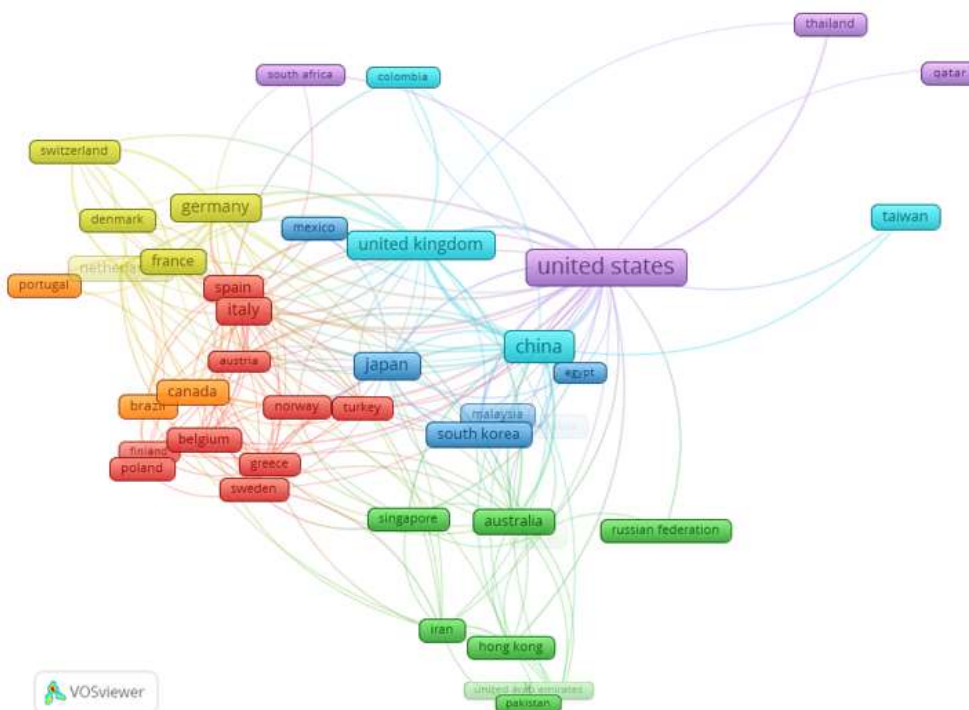


Figura 4. 5 – Gráfico de redes de coautoria entre países do mundo

No gráfico de redes são formados clusters (aglomerados), as cores iguais mostram que os elementos fazem parte do mesmo cluster, geralmente tratando-se de mesmo tema estudado e com cocitações entre si. As redes mostram nas ligações as coocorrências de palavras chaves, cocitação entre autores, cocitação entre países, acoplamento bibliográfico (relação entre dois artigos com base no número de referências em comum citadas pelos dois artigos), mapas baseados em cocitação. Análise de cocitação mede a relação entre dois artigos com base no número de publicações em que estes aparecem citados concomitantemente (GRACIO, 2016). O nível de conexão em cada nó (ou frame) é

	Autores	Título	Ano	Fonte
1	Fiameni, S. et al.	Implementing sustainability in laboratory activities: A case study on aluminum titanium nitride based thin film magnetron sputtering deposition onto commercial laminated steel	2021	Journal of Cleaner Production
2	Sayyed, SG, et al.	Investigation of electrochemical performance and stability of electrodeposited Mn ₃ O ₄ thin films in different aqueous electrolytes for its application in flexible supercapacitors	2021	Journal of Energy Storage
3	Nam, JS,et al.	Free-Standing Carbon Nanofibers Protected by a Thin Metallic Iridium Layer for Extended Life-Cycle Li-Oxygen Batteries	2020	ACS Applied Materials and Interfaces
4	Andler, J., et al.	Guiding the environmental design of a novel solar absorber through life cycle assessment by identifying anticipated hot spots	2020	Journal of Cleaner Production
5	Piedade, AP, Canguero, L.	Influence of carbyne content on the mechanical performance of nanothick amorphous carbon coatings	2020	Nanomaterials
6	Oviroh, PO,et al.	New development of atomic layer deposition: processes, methods and applications	2019	Science and Technology of Advanced Materials
7	Weber, M., et al.	Atomic layer deposition (ALD) on inorganic or polymeric membranes	2019	Journal of Applied Physics

8	Borhani-Haghighi, S. et al.	Synthesis of nanostructured LiMn ₂ O ₄ thin films by glancing angle deposition for Li-ion battery applications	2016	Nanotechnology
9	Tamvakos, A. et al.	NO ₂ Gas Sensing Mechanism of ZnO Thin-Film Transducers: Physical Experiment and Theoretical Correlation Study	2016	ACS Sensors
10	Louwen, A., et al.	Life-cycle greenhouse gas emissions and energy payback time of current and prospective silicon heterojunction solar cell designs	2015	Progress in Photovoltaics: Research and Applications
11	Soppe, W., et al.	Silicon-light: A European project aiming at high efficiency thin film silicon solar cells on foil	2014	EPJ Photovoltaics
12	Khon Kaen	5th KKU International Engineering Conference 2014, KKU-IENC 2014	2014	Advanced Materials Research
13	Di Benedetto, F., et al.	Electrodeposition of ternary Cu _x SnySz thin films for photovoltaic applications	2014	Progress in Photovoltaics: Research and Applications
14	Eisenberg, DA, et al.	Comparative alternative materials assessment to screen toxicity hazards in the life cycle of CIGS thin film photovoltaics	2013	Journal of Hazardous Materials
15	Bakke, JR, et al.	Nanoengineering and interfacial engineering of photovoltaics by atomic layer deposition	2011	Nanoscale
16	Okamoto, A., et al.	Application of sputtered ZnO _{1-x} S _x buffer layers for Cu(In,Ga)Se ₂ solar cells	2011	Japanese Journal of Applied Physics
17	Yulianto, B., et al.	Synthesis of metal oxide nanostructure and its characterization as gas pollutant monitoring	2011	WIT Transactions on Ecology and the Environment
18	Tariq Saeed, M., et al.	Organic Cu/cellulose/ PEPC/Cu humidity sensor	2010	Optoelectronics and Advanced Materials
19	Smyaglikov, IP, et al.	Spectroscopic and probe diagnostics of carbon plasma flows of a pulse vacuum arc	2010	High Temperature Material Processes
20	Pan, Y., et al.	Design and fabrication of ultra broadband infrared antireflection hard coatings on ZnSe in the range from 2 to 16 μm	2009	Infrared Physics and Technology
21	Yu, N., et al.	Electrodeposited PbO ₂ thin film as positive electrode in PbO ₂ /AC hybrid capacitor	2009	Electrochimica Acta
22	Hao, X., Li, Y., Pritzker, M.	Pulsed electrodeposition of nickel hexacyanoferrate films for electrochemically switched ion exchange	2008	Separation and Purification Technology

Continua...

23	Kao, HL, et al.	Epitaxial AlN thin film surface acoustic wave devices prepared on GaN/sapphire using low-temperature helicon sputtering system	2008	Japanese Journal of Applied Physics
24	Devaraj, S., Munichandraiah, N.	The effect of nonionic surfactant triton X-100 during electrochemical deposition of MnO ₂ on its capacitance properties	2007	Journal of the Electrochemical Society
25	Vermeiden, P. et al.	Effect of the deposition technique on the metallurgy and hydrogen storage characteristics of metastable Mg _y Ti(1-y) thin films	2006	Electrochemical and Solid-State Letters
26	Song, F., et al.	Life cycle studies of field emission of BN thin films	2005	Physica B: Condensed Matter
27	Koguma, K., et al.	Relationship between oxygen contents and lubrication properties of Mo-S-O films onto rollers prepared by reactive sputtering method	2005	Toraibarojisuto/Journal of Japanese Society of Tribologists
28	Leonhardt, D., et al.	Applications of electron-beam generated plasmas to materials processing	2005	IEEE Transactions on Plasma Science
29	Boyd, A. et al.	Influence of target surface degradation on the properties of r.f. Magnetron-sputtered calcium phosphate coatings	2003	Surface and Interface Analysis
30	Baldwin, SF	Renewable energy: Progress and prospects	2002	Physics Today
31	O'Brien, J., Kelly, PJ	Characterisation studies of the pulsed dual cathode magnetron sputtering process for oxide films	2001	Surface and Coatings Technology
32	Blaschke, H., et al.	Absolute measurements of non-linear absorption near LIDT at 193 nm	2001	Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering
33	Bielawski, M.	Hard chromium plating alternative technologies	2000	Canadian Aeronautics and Space Journal
34	Yamaki, J.-I., et al.	A consideration of the morphology of electrochemically deposited lithium in an organic electrolyte	1998	Journal of Power Sources
35	Bennun, L., Gomez, J.	Determination of mercury by total-reflection X-ray fluorescence using amalgamation with gold	1997	Spectrochimica Acta - Part B Atomic Spectroscopy
36	Sberveglieri, G., et al.	Capacitive humidity sensor with controlled performances, based on porous Al ₂ O ₃ thin film grown on SiO ₂ -Si substrate	1994	Sensors and Actuators: B. Chemical

Figura 4. 8 – Dados da amostra de 36 documentos, autores, título, ano e fonte

Autores	Ano	Assunto do estudo baseado no resumo
Fiameni, S., Battiston, S., Castellani, V., Barison, S., Armelao, L.	2021	Identificação dos hotspots ambientais de um trabalho de pesquisa experimental em escala de laboratório que consiste na deposição física de vapor magnetron sputtering de revestimentos finos à base de nitreto de titânio de alumínio em aço laminado comercial., várias estratégias de otimização foram avaliadas para reduzir o consumo geral de eletricidade e para melhorar o perfil ambiental das atividades experimentais.
Andler, J., Mathur, N., Sutherland, J., Zhao, F., Handwerker, C.	2020	A avaliação do ciclo de vida (LCA) pode ser uma ferramenta poderosa para minimizar os impactos do ciclo de vida agregado, se usada durante a pesquisa em estágio inicial, antes que os materiais, processos e projetos de sistema sejam definidos. Este estudo examina os efeitos do ciclo de vida da substituição de dois promissores polimorfos contendo arsênio de Cu ₃ As ₄ como as camadas absorventes em células fotovoltaicas de filme fino (PV) de junção única.
Tamvakos, A., Korir, K., Tamvakos, D., Calestani, D., Cicero, G., Pullini, D.	2016	O estudo teórico e experimental combinado aqui descrito fornece conhecimentos sobre o mecanismo de detecção que ajudará a otimizar a concepção do transdutor de ZnO para a medição quantitativa do NO ₂ esgotado por sistemas de combustão que serão utilizados, em última análise, para o ajuste otimizado da combustão resultando numa redução da emissão de poluentes e gases com efeito de estufa.
Louwen, A., Van Sark, WGJHM, Schropp, REI, Turkenburg, WC, Faaij, APC	2015	As células de silício de heterojunção (SHJ) oferecem altas eficiências e várias vantagens no processo de produção em comparação com as células solares de silício cristalino convencional. Realizamos uma avaliação do ciclo de vida para identificar a pegada de gás com efeito de estufa (GHG), o tempo de retorno de energia (EPBT) e a procura cumulativa de energia de quatro diferentes designs de células solares SHJ.
Soppe, W., Krc, J., Leitner, K., Haug, F.-J., Duchamp, M., Sanchez Plaza, G., Wang, Q.-K.	2014	No projeto europeu Silicon-Light, desenvolvemos conceitos e tecnologias para aumentar a eficiência de conversão de células solares de silício de filme fino em folha. A análise do ciclo de vida mostrou que a produção em larga escala de módulos com base nas tecnologias desenvolvidas na Silicon-Light teria um tempo de retorno de energia de 0,85 anos nos países da Europa Central.
Di Benedetto, F., Bencistà, I., Caporali, S., Cinotti, S., De Luca, A., Lavacchi, A., Vizza, F., Muniz Miranda, M., Foresti, ML, Innocenti, M.	2014	Filmes finos para a tecnologia de células solares com baixo investimento de energia e impacto ambiental desprezível.
Eisenberg, DA, Yu, M., Lam, CW, Ogunseit, OA, Schoenung, JM	2013	Produzir menos emissões de gases de efeito estufa do que as fontes de energia baseadas em combustíveis fósseis nos processos de fabricação do CIGS e os dispositivos de células solares usam materiais perigosos.
Okamoto, A., Minemoto, T., Takakura, H.	2011	Do ponto de vista do impacto ambiental do Cd e da necessidade de processamento em linha para produção em massa, é necessário encontrar uma alternativa para o CdS depositado quimicamente por via úmida. Neste estudo, filmes finos de ZnO 1-xSx foram preparados por co-sputtering de radiofrequência usando alvos de ZnO e ZnS, o que deve permitir alta controlabilidade das razões composicionais de O e S.
Yulianto, B., Faizal, M., Iqbal, M., Julia, S., Nugraha, T.	2011	Sistemas de monitoramento de gases poluentes desenvolvidos usando o dispositivo sensor resultante após o processo de calibração.
Koguma, K., Ikeda, M., Sunahara, K., Matsuda, K., Kaneta, M.	2005	Filmes de Mo-SO com vários conteúdos de oxigênio foram preparados por deposição catódica rf em gás argônio, incluindo oxigênio (0,1-1%). No outro filme, a vida útil aumentou com a espessura do filme.
Baldwin, SF	2002	A limpeza inerente das tecnologias de energia renovável minimiza os custos de descomissionamento e as preocupações de saúde e segurança de longo prazo. As emissões de dióxido de carbono da bioenergia renovável foram amplamente equilibradas pela absorção de dióxido de carbono atmosférico da safra seguinte. O uso de biomassa auxilia na remoção de resíduos vegetais e animais. Combustíveis de biomassa têm baixo teor de enxofre e alta reatividade, baixando temperaturas e tempos reduzidos em sistemas de gaseificação.

Figura 4. 9 - Dados dos 11 documentos analisados (autores, título, assunto do artigo baseado no resumo)

A amostra de 9 artigos contém parte dos termos de interesse do tema em estudo, a *string* de busca envolve: “superfícies absorvedoras solares ” e ‘técnicas de deposição’ e “cromo negro”, esta amostra possui alguns dos trabalhos que o grupo deste estudo publicou (item 1 e 2 - tabela 3), tornando assim relevante esta parte da busca, visto que os artigos dos autores estão inseridos na revisão de literatura, e cooperando na busca das lacunas na área do estudo. A figura 4.10 detalha autores, título e ano de publicação e a figura 4.11 os nomes dos autores e o quantitativo de publicações. Ainda seguindo as buscas realizadas foi encontrada uma amostra de 6 documentos. E colocando a última *string* que contém todos os termos da pergunta de pesquisa utilizando o conectivo “AND”, verificou-se nenhum documento encontrado, mostrando assim o ineditismo do estudo.

	Autor	Ano	Título
1	Medeiros, IDM, Gomes, KC, Gonçalves, RPDN, Galvão, GO	2019	Superfície solar seletiva à base de cromo preto: Influência dos parâmetros de eletrodeposição na absorção de superfícies
2	Medeiros, IDM, da Nóbrega Gonçalves, RP, Menezes, VL, Galvão, GO, Gomes, KC	2019	Avaliação do potencial de sílica residual como camada anti-reflexiva para superfície solar seletiva de cromo preto
3	Nunes, RAX, Costa, VC, Sade, W., Araújo, FR, Silvaa, GM	2018	Superfícies seletivas de cromo preto para uso em absorvedores solares
4	Hamid, ZA	2009	Eletrodeposição de cromo preto a partir de eletrólito ambiental com base em sal de cromo trivalente
5	Yin, Y., Pan, Y., Hang, LX, McKenzie, DR, Bilek, MMM	2009	Superfícies seletivas solar de cermet de Cr-Cr2O3 reativa de corrente contínua para aplicações de água quente solar
6	Carbunescu, Eugenia, Baluta, Gh.	1987	Utilização de revestimentos de cromo preto para conversão fototérmica de energia solar
7	Motorista, PM	1981	Uma abordagem eletroquímica para a caracterização de superfícies seletivas de cromo preto
8	Prasad, GSS, Mohan, S., Vasu, KI	1980	Caracterização microestrutural de uma superfície de cromo preto eletrodepositada.
9	Murr, LE, Inal, OT	1979	Defeitos de cristal em revestimentos e sua influência nas propriedades do revestimento

Figura 4. 10 – Dados da amostra de 9 documentos (autores, ano, título)

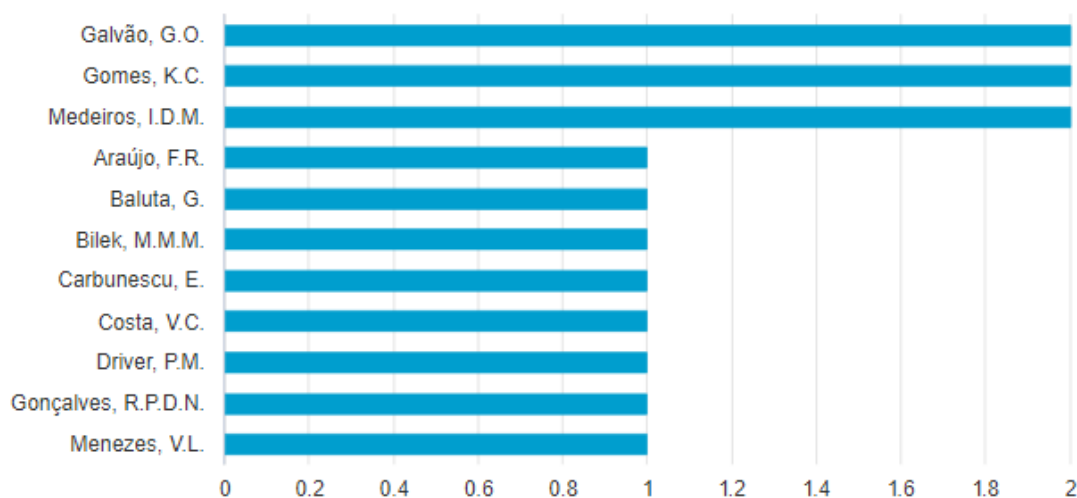


Figura 4. 11 - Nome dos nomes dos autores e número de publicações da amostra de 9 artigos

Portanto, baseado nos dados, gráficos, mapas de redes que embasaram as análises bibliométricas e de revisão de literatura proposta neste estudo. Conclui-se que há uma lacuna de pesquisa referente a avaliação de ciclo de vida em superfícies absorvedoras solares de cromo negro utilizando as técnicas de eletrodeposição e *Sputtering*. O que reforça a contribuição do estudo aqui desenvolvido em quantificar GEE, contribuir na redução do CO₂ de processos produtivos de produtos de fontes de energia renováveis não poluentes, visto que quantidades consideráveis de gases poluentes do efeito estufa podem ser evitadas ou otimizadas.

4.2 ABSORTIVIDADE DAS SUPERFÍCIES ABSORVEDORAS SOLARES PRODUZIDAS

Para caracterização por Espectofotometria UV-Vis- NIR, os filmes absorvedores produzidos por *Sputtering* foram submetidos à radiação com comprimentos de onda na faixa de 220 nm a 1400 nm, utilizando o acessório esfera de integração o qual possibilita a análise de filmes, de forma que foi determinada a reflectância espectral desses filmes, correspondentes às regiões ultravioleta, visível e infravermelho próximo.

Esta caracterização foi utilizada para determinar a reflectância dos revestimentos. Sabendo que, de acordo com a lei de Kirchhoff, a soma da absorptância, transmitância e reflectância de uma superfície em um comprimento de onda particular é igual a 1, nas superfícies opacas cuja transmitância é zero, conforme mostrado na Eq. (1).

Após as devidas conversões para níveis de absorptância, os resultados dos níveis de absorção ao longo do espectro em estudo, bem como as médias de absorção e seus respectivos desvios padrões, podem ser observados nas Figuras 4.11 e 4.12, respectivamente.

O espectro mostrado na figura 4.11 apresenta o comportamento médio dos espectros de cada revestimento e o gráfico de barras é a média de absorção. O cálculo da média de absorção foi realizado pelo valor médio da integral da área de cada espectro (amostras de cada revestimento), figura 4.8.

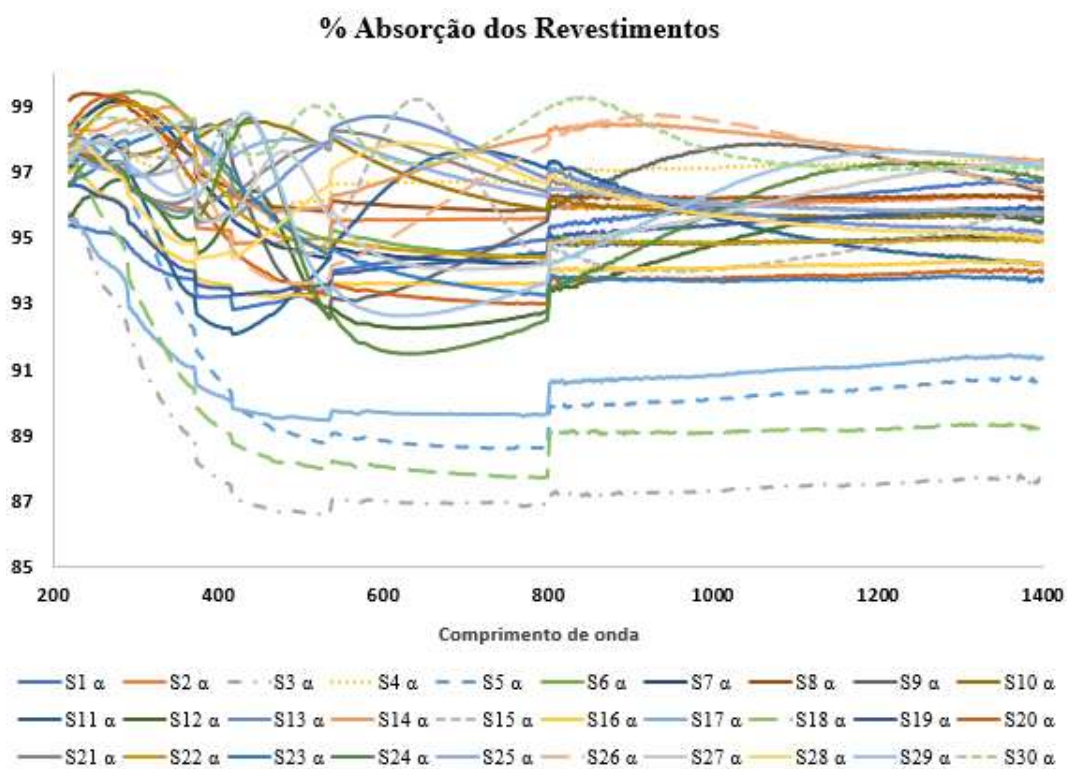


Figura 4. 12 - Espectro de absorptância para os diferentes filmes absorvedores depositados por meio da técnica de pulverização catódica

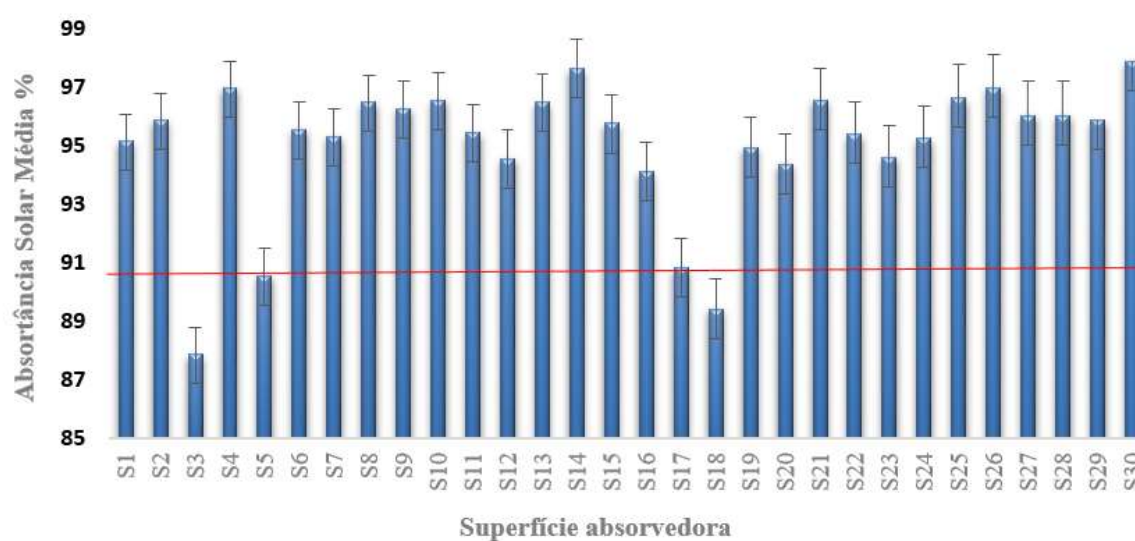


Figura 4. 13 - Média da absorção e desvio padrão dos filmes absorvedores depositados por meio da técnica de pulverização catódica

Tabela 4. 2 - Absortância Solar Média e Desvio Padrão dos Filmes do estudo

Amostras*	Absortância Solar Média(%)	Amostras	Absortância Solar Média (%)	Amostras	Absortância Solar Média (%)
S1	95,14 ± 0,897	S11	95,44 ± 0,96	S21	96,55 ± 1,06
S2	95,88 ± 0,90	S12	94,56 ± 0,97	S22	95,39 ± 1,08
S3	87,87 ± 0,91 ↓	S13	96,48 ± 0,98	S23	94,59 ± 1,10
S4	96,97 ± 0,91	S14	97,63 ± 0,98	S24	95,23 ± 1,12
S5	90,56 ± 0,92	S15	95,75 ± 0,99	S25	96,62 ± 1,13
S6	95,56 ± 0,93	S16	94,10 ± 1,01	S26	96,97 ± 1,15
S7	95,30 ± 0,93	S17	90,81 ± 1,02	S27	96,01 ± 1,16
S8	96,47 ± 0,94	S18	89,41 ± 1,03	S28	96,03 ± 1,18
S9	96,27 ± 0,94	S19	94,93 ± 1,03	S29	95,87 ± 1,19
S10	96,55 ± 0,94	S20	94,36 ± 1,05	S30	97,88 ± 1,21 ↑

Tabela 4. 3 – Parâmetros de deposição e Absortância Solar Média dos Filmes do estudo

Parâmetros de deposição - <i>Sputtering</i> do estudo			
Potência (w)	tempo (min)	Absort. Média (distância 110mm)	Absort. Média (distância 150mm)
20	30	95,14%	94,09%
	60	95,87%	90,81%
	120	87,87% ↓	89,40%
40	30	96,97%	94,92%
	60	90,56%	94,36%
	120	95,55%	96,54%
60	30	95,30%	95,38%
	60	96,47%	94,58%
	120	96,26%	95,23%
80	30	96,54%	96,61%
	60	95,44%	96,97%
	120	94,56%	96,01%
100	30	96,48%	96,03%
	60	97,63%	95,86%
	120	95,75%	97,88% ↑

(*) A nomenclatura “S_n” significa superfície n=1,2,3...

A tabelas 4.2 mostra as absortâncias solares médias e os seus desvios padrões (calculados com base nos valores médios da absortância das triplicatas de cada condição) para os filmes das Figuras 4.12 e 4.13 respectivamente. De modo geral, boa parte das amostras exibiu baixas faixas de tolerância (0,897 a 1,21 %), sugerindo uma ótima reprodutibilidade das condições pelo *Magnetron Sputtering*.

Por meio da Figura 4.12 e tabela 4.2, percebe-se que o S30 (superfície absorvedora 30) foi o filme que apresentou os maiores níveis de absortância e de estabilidade de absorção ao longo do espectro em análise (220 nm a 1400 nm), exibindo uma alta absortância solar (97,88 %), a maior dentre todos os filmes do estudo, com uma das menores faixas de tolerância ($\pm 1,21$ %), com parâmetros (potência 100W, distância 150mm, tempo 120 minutos). O filme S3 apresentou os menores níveis de absortância e de estabilidade de absorção ao longo do espectro em análise (220 nm a 1400 nm – 88%), com parâmetros (potência 20 W, distância do alvo 110 mm, tempo 120 minutos). Ressalta-se que todas as amostras desse trabalho atingiram o valor de absorção mínima ($\alpha_s = 85$ %) exigido para uma superfície solar seletiva (XIAO *et al.*, 2011).

A tabela 4.3 mostra os parâmetros de deposição utilizados na fabricação dos filmes e suas respectivas absorções solares média, verifica-se que os parâmetros potência 100 W, distância do alvo 150 mm e tempo 120 minutos possibilitaram as melhores condições em termos de absorção e estabilidade, entretanto observando valores de absorções de outros filmes com valores bem próximos ao valor da absorção do filme que obteve 97,88%, o filme S4 obteve valor de absorção 96,97%, na potência 40W, distância 110mm e tempo 30 minutos, mostrando-se mais viável em termos de tempo de produção e redução de 60% em potência resultando em menos eletricidade consumida, conseqüentemente menos consumo de material.

Estabelecendo correlações com filmes produzidos a base de cromo, pesquisas como a de Nunes *et al.* (2003) permitiram a obtenção de superfícies seletivas de Cr-Cr₂O₃, utilizando a mesma técnica do estudo, o *Sputtering*, obtendo absorção em torno de 94%. Enquanto que Barshilia *et al.* (2008) produziram filmes seletivos com multicamadas de cromo e óxido de cromo usando o método de pulverização pulsada com absorção solar variando de 89-91%.

Para tanto, na comparação das SAS produzidas com as da literatura, bem como para o cálculo das emissões da GEE serão utilizadas as SAS com percentuais de absorvidade superiores a 90%, visto o potencial de aplicação industrial.

4.3 AVALIAÇÃO DE IMPACTO DO CICLO DE VIDA E INTERPRETAÇÃO DAS SAS PRODUZIDAS

Para a quantificação das emissões de gases de efeito estufa utilizou-se o software *SimaPro* v.9.1.0.8 (SIMAPRO, 2019) e base de dados *Ecoinvent* 3.6 (2019), cujos processos escolhidos caracterizam uma alocação atribucional. O método de avaliação de Impacto empregado foi o IPCC 2013 GWP 100a (IPCC - *Intergovernmental Panel on Climate Change*, 2013), que engloba apenas o potencial de aquecimento global como categoria de impacto. Nesse método, os cálculos se dão de modo que, ao longo de 100 anos, as sequelas cumulativas dos gases de efeito estufa são contabilizadas e expressas em kg CO₂-eq (quilogramas de CO₂ equivalente) (IPCC, 2013).

A utilização de energia da rede elétrica nacional, utilizou-se a metodologia proposta por Carvalho e Delgado (2017) para estimar as emissões de gases de efeito estufa associadas ao consumo de 1 kWh de energia da matriz elétrica do Brasil no ano de 2019. Os dados do

Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS, 2020) mais recentes no período foram utilizados, dividindo as fontes de geração de energia em: 66.67 % hidroelétrica, 9.28 % gás natural, 9.15 % eólica, 8.25 % biomassa (bagaço de cana-de-açúcar), 2.79 % nuclear, 1.62 % carvão, 1.55 % óleo, e 0.69 % solar. O valor total das emissões é dado em kg CO₂-eq/ano.

4.3.1 ACV das SAS produzidas no estudo por *Magnetron Sputtering*

A Tabela 14 mostra a quantificação das emissões de GEE dos processos e materiais utilizados na fabricação das SAS do estudo utilizando a técnica de *Magnetron Sputtering*.

A Tabela 14 - Emissões de GEE, parâmetros de deposição e absorvidade do processo de fabricação SAS do estudo, utilizando a técnica de *Magnetron Sputtering*

Emissões de GEE (kg CO ₂ eq)	Parâmetros de deposição			
	Potência (w)	tempo (min)	Absort. Média (distância 110mm)	Absort. Média (distância 150mm)
Pastilha de Cromo (Cr/Cr ₂ O ₃)	20	30	95,14%	94,09%
		60	95,87%	90,81%
		120	87,87% ↓	89,40%
	40	30	96,97%	94,92%
		60	90,56%	94,36%
		120	95,55%	96,54%
Gás Argônio	60	30	95,30%	95,38%
		60	96,47%	94,58%
Limpeza de Substrato - eletropolimento	60	120	96,26%	95,23%
		30	96,54%	96,61%
Eletricidade (Rede elétrica brasileira)	80	60	95,44%	96,97%
		120	94,56%	96,01%
		30	96,48%	96,03%
Total	100	60	97,63%	95,86%
		120	95,75%	97,88% ↑
		30	96,48%	96,03%
			0,00012*	
			0,00024**	
			0,00048***	
			0,00021	
			0,01202	
			0,01323	
			0,02557*	
			0,02569**	
			0,02594***	

(*) consumo para 30 min.; (**) consumo para 60 min.; (***) consumo para 120 min.

Na tabela 14, observa-se os resultados encontrados na quantificação de emissões de GEE e os parâmetros utilizados no processo de fabricação, percebe-se que o processo da eletricidade consumida foi o que mais contribuiu para as emissões de GEE em aproximadamente 51%, a limpeza de substrato em 46% (utiliza uma pequena quantidade de eletricidade no seu processo). O somatório das outras etapas contabiliza o restante das emissões 2%. Portanto, o uso da energia elétrica proveniente da rede de energia brasileira tem se mostrado como aquele que gera maior impacto para o processo produtivo de fabricação das SAS nas condições e características estudadas.

A variação das emissões de GEE do cromo, tem relação direta com os parâmetros de deposição, em especial o tempo e a potência e deve ser considerado se realmente é necessário maior tempo e potência, com absorvidades relativamente próximas e sua comparação com as emissões de GEE.

Observa-se, na tabela 14, que os resultados das potências 40 watts e 100 watts se mostram com valores de absorvidades próximos, percebe-se assim que na tomada de decisão dos parâmetros eficientes, em termos de absorvidade e GEE, não necessariamente precisa-se considerar o maior tempo e uma maior potência (maior consumo de energia) aplicada ao equipamento de fabricação dos filmes por Magnetron Sputtering para conseguir bons níveis de absorção.

Contabilizando as emissões em metros quadrados, de acordo com especificações da máquina Magnetron Sputtering RF Orion 5 (fornecido pela AJA Instruments Inc) instalada no Laboratório de Filmes Finos (LabFilm) da Universidade Federal da Paraíba (UFPB), cada processo tem a capacidade de produzir 9 superfícies absorvedoras solares de 30mm x 30mm, ou seja, 0,0081m², deste modo, 1m² das SAS produzidas nas especificações descritas no presente estudo, geram 3,156; 3,171 e 3,202 kg de CO₂ equivalente, respectivamente, para os tempos de 30, 60 e 120 minutos de processo produtivo.

Os resultados das emissões de GEE encontradas do estudo utilizando o *Sputtering* corroboram com Fiameni *et al.* (2021), que estudou a deposição por pulverização catódica de filme fino de *Magnetron* à base de nitrato de titânio de alumínio em aço laminado comercial. O principal fator de impacto nas atividades laboratoriais analisadas foi a eletricidade utilizada para a operação dos instrumentos.

Estas também foram as conclusões de (CORONA *et al.*, 2018; PICINNO *et al.*, 2018; ELGINOZ *et al.*, 2020), e deve ser destacado que a magnitude da contribuição de eletricidade é altamente dependente do local. Se a fonte da eletricidade consumida aqui for deslocada para gás de síntese de biomassa, como o estudo de caso apresentado por Melo (2019) para o mesmo local, a pegada de carbono da eletricidade é 0,1973 kg CO₂-eq / kWh. Outro estudo de caso realizado no mesmo local utilizou energia solar fotovoltaica para gerar eletricidade a 0,03937kg CO₂-eq / kWh.

4.4 AVALIAÇÃO DE IMPACTO CICLO DE VIDA E INTERPRETAÇÃO DAS SAS DE OUTROS AUTORES (*SPUTTERING* X ELETRODEPOSIÇÃO)

4.4.1 Quantificação e comparação das SAS da literatura com SAS do estudo por *Magnetron Sputtering*

A tabela 4.4, apresenta a quantidade de emissões de GEE dos processos e materiais utilizados na fabricação de SAS utilizando a técnica de *Magnetron Sputtering* Medeiros (2020).

Tabela 4. 4 - Emissões de GEE, parâmetros de deposição e absorvidade do processo de fabricação SAS do estudo Medeiros (2020), utilizando a técnica de *Magnetron Sputtering*

Emissões de GEE (kg CO2 eq)		Parâmetros de deposição			
		Potência (w)	tempo (min)	distância (mm)	Absort. Média
Pastilha de cromo (Cr/CrO3)	0,000085	50	15	105	91,42%
Gás Argônio	0,000214		30		87,62%
Limpeza de Substrato (isopropanol)	0,003470	100	15	30	90,15%
Eletricidade	0,006386				
Total	0,010154				

Da tabela 4.4 observa-se que a limpeza do substrato contribuiu para as emissões de GEE em torno de 35%, a eletricidade 63%, e o somatório das outras etapas, pastilha de cromo e o gás argônio, contabilizam o restante das emissões em 2%.

Comparando as emissões de GEE ($1,015 \times 10^{-2}$ kgCO₂-eq) e parâmetros de deposição 50 100 watts de potência e 15 e 30 minutos de tempo de deposição do *Sputtering* de Medeiros (melhor média de absorvância 91,42%), com os níveis de emissão de GEE ($\sim 2,50 \times 10^{-2}$ kg de CO₂eq) e absorvância ($\sim 97,00\%$), que processo do estudo emitiu, observando a tabela 17, visualiza-se que o tratamento do substrato por eletropolimento (utiliza eletricidade) emite mais gases de efeito estufa que o tratamento de substrato com isopropanol, e como relação aos níveis de GEE gerados pela eletricidade utilizada no processo, percebe-se que o parâmetro tempo (120min) influenciou diretamente em maiores impactos em termos de GEE.

A tabela 4.5 mostra a quantificação das emissões de GEE dos processos utilizados na fabricação de SAS utilizando a técnica de *Magnetron Sputtering* por Andrade (2020),

com resultados dos dois tratamentos de substrato hexano e eletropolimento executados pela autora, e seus parâmetros de deposição e absorvidade.

Tabela 4. 5 – Emissões de GEE, parâmetros de deposição e absorvidade do processo de fabricação SAS do estudo de Andrade (2020), utilizando a técnica de *Magnetron*

Emissões de GEE (kg CO2 eq)			<i>ing</i> , Parâmetros de deposição			
			Tratamento substrato	Potência (w)	tempo (min)	distância (mm)
Processos	Hexano	Eletropolimento			10	89,92%
Pastilha de cromo (Cr/CrO3)	0,00033	0,00033	Hexano		20	91,75%
Gás Argônio	0,00021	0,00021			30	89,11%
Limpeza de Substrato	0,00022	0,01220			10	95,31%
Eletricidade	0,00454	0,00454	Eletropolimento	60	20	97,76%
Total	0,00531	0,01729			30	96,38%

Na tabela 4.5 observa-se que a limpeza do substrato por eletropolimento é o processo da técnica de *Sputtering* que mais contribuiu para as emissões, ou seja, 0,01220kg de CO2eq, representa 70,80% das emissões de GEE do processo, a eletricidade com 26,34% e a pastilha de cromo junto com o gás argônio representando 2,86% do valor de emissões de GEE, porém em relação aos parâmetros de deposição, o processo que utiliza o eletropolimento, potência de 60W, durante 20 minutos e distância do alvo 105mm, mostrou-se com uma média de absorção de 97,76%. Usando o hexano como limpeza de substrato tem-se quase 6% a menos de eficiência em termos de absorção.

Comparando os resultados da produção das SAS produzidas obtidos por Medeiros (2020) e Andrade (2020), tabelas 4.4 e 4.5, com os resultados da produção das SAS produzidas nessa pesquisa, tabela 4.3, observa-se que o processo que mais gera emissões de GEE é o tratamento do substrato por eletropolimento, devido a eletricidade utilizada em sua composição, comparado com os níveis de emissão da pastilha de cromo e gás argônio. Porém, vale destacar que o tratamento com hexano pode gerar impactos em outras categorias de impactos. Toxicidade ao homem e organismos aquáticos. Sabe-se que o equipamento *Sputtering* é alimentado por eletricidade da rede brasileira de tensão, logo, este processo contribuirá quase em sua totalidade com níveis mais altos de emissão de GEE, otimiza-se, como colocado anteriormente, diminuindo o tempo de deposição e potência utilizada, desde que obtenha bons níveis de absorção.

4.4.2 Quantificação e comparação das SAS da literatura com SAS do estudo por Eletrodeposição

A Tabela 4.6 mostra as emissões de GEE dos processos e materiais, parâmetros da deposição e absorvidade, utilizados nas Eletrodeposição 1 (banho 1) e Eletrodeposição 2 (banho 2), estudadas por Medeiros (2020).

Tabela 4. 6 - Emissões de GEE, parâmetros de deposição e absorvidade do processo de fabricação SAS do estudo Medeiros (2020), utilizando a técnica de eletrodeposição

Processo de deposição	Parâmetros de deposição				
	Potência (w)	tempo (min)	distância (mm)	Absort. Média	
Eletrodeposição 1	30	1		94,07%	
	10	3		97,48%	
	30	30	5	96,91%	
	10		60		88,76%
			120		90,61%
	30	5	5	93,07%	
	10		10		91,59%
			10		91,32%
	30	10	10		93,16%
			5		91,05%
Eletrodeposição 2				96,35%	
				98,74%	
	9	5	5	98,51%	
				96,15%	
	18	10	10	98,21%	
				97,48%	
				97,06%	
			96,35%		
Emissões de GEE (kg CO2 eq)					
(Tratamento substrato isopropanol/ácido cítrico)					
Processos	Eletrodeposição 1		Eletrodeposição 2		
Banho	0,00038		0,00051		
Eletrodos	7,99X10 ⁻⁸		7,99X10 ⁻⁸		
Tratamento do Substrato	0,00347		0,00347		
Eletricidade (rede brasileira)	0,00121		0,00038		
Total	0,00506		0,00436		

A Tabela 4.6 mostra que tratamento de substrato contribui em 68,58% das emissões na eletrodeposição¹, o consumo de eletricidade representou 23,91% e o banho 7,51%. O utilizando o álcool isopropílico, foi o mesmo utilizado em ambos os processos de deposição, representando em torno de 79,59% das emissões de GEE da eletrodeposição². A eletrodeposição¹ impacta em torno de 8% a mais que a eletrodeposição 2. Verifica-se que praticamente 100% das etapas do processo da Eletrodeposição 2 obtiveram pegadas de carbono inferiores ao processo de fabricação das SAS utilizando as composições que caracterizam a Eletrodeposição do banho¹.

Com relação aos parâmetros de deposição, percebe-se que a utilização de 10 watts de potência, 3 minutos de tempo de deposição e uma distância de 10mm, a eletrodeposição que utilizou o banho eletrolítico com as configurações 1, descritas no item 3.4, obtiveram absorvidade em torno de 97,48%. Já a eletrodeposição que utilizou o banho eletrolítico com as configurações 2 (vide item 3.4), obteve média de absorvância em torno de 98,74%, como 9 watts de potência, 5 minutos de tempo de deposição e 10mm de distância.

Percebe-se que, como os valores de absorção são muito próximos e os valores dos parâmetros também, dos dois processos de eletrodeposição, logo, para uma tomada de decisão na busca de otimização, verificaram-se as emissões de GEE, com $5,06 \times 10^{-3}$ de CO_2eq e $4,36 \times 10^{-3}$, respectivamente para a eletrodeposição 1 e 2. Portanto, a configuração do processo de eletrodeposição com o banho eletrolítico 2 mostra-se mais viável em termos de maiores níveis de absorção e menores impactos quanto a emissão de GEE.

Na quantificação das emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) das etapas dos processos e materiais utilizados na fabricação de SAS utilizando a técnica de Eletrodeposição realizada por Gonçalves (2020), com os diferentes tratamentos de substratos, a Tabela 4.7 mostra os resultados.

Tabela 4. 7 - Emissões de GEE, parâmetros de deposição e absorvidade do processo de fabricação SAS do estudo Gonçalves (2020), utilizando a técnica de eletrodeposição com diferentes tipos de tratamento de substrato

Emissões de GEE (kg CO ₂ -eq) Gonçalves (2020)				
Processos	Hexano	Ácido Cítrico	Eletropolimento	Tratamento térmico
Banho	0,00051	0,00051	0,00051	0,00051
Eletrodos	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
Tratamento Substrato	0,00022	0,00197	0,01217	0,49713
Eletricidade (rede elétrica Brasil)	0,00024	0,00024	0,00024	0,00024
Total	0,00097	0,00272	0,01292	0,49788

Distância (mm)	tempo(min)	Absortividade Média			
15		89,78%	86,44%	97,45%	90,11%
		94,46%	88,21%	97,66%	91,87%
	1/2	95,21%	95,99%	97,61%	96,44%
	1	96,61%	95,87%	97,30%	97,16%
30	2	90,15%	86,33%	94,56%	89,58%
	5	92,80%	87,44%	97,76%	93,49%
		96,03%	90,14%	97,50%	95,41%
		96,85%	95,14%	97,09%	97,00%

Verificando os valores encontrados na tabela 4.7 para as emissões dos quatro diferentes tipos tratamentos de substrato, percebem-se a diferença que o tratamento térmico teve em emissões de GEE ($4,97 \times 10^{-1} \text{kgCO}_2\text{eq}$) em relação aos outros tratamentos (Hexano $9,7 \times 10^{-4} \text{kg CO}_2\text{eq}$; ácido cítrico $2,72 \times 10^{-2} \text{kg CO}_2\text{eq}$; $1,29 \times 10^{-2} \text{kg CO}_2\text{eq}$). Esta disparidade se dá ao fato que o tratamento térmico tem em seu processo consumo considerável de eletricidade (2,19 kWh) para alimentar um forno a 150°C, com relação aos outros processos.

Com relação aos níveis de absorção solar, percebe-se, na tabela 4.9, que os parâmetros utilizados na deposição, Gonçalves (2020) utilizou potência de 30 watts em todos os seus processos, o tempo de 1 minutos, distância de 30mm e tratamento de substrato por eletropolimento obteve o melhor valor médio de absortância (97,76%), entretanto, devidos aos níveis de emissão de GEE desse processo, verifica-se que processo que utiliza o hexano como limpeza de substrato obteve bons níveis médios de absorção e menores impactos. Porém, vale destacar que o tratamento com hexano pode gerar impactos em outras categorias de impactos. Toxicidade ao homem e organismos aquáticos

Comparando os processos de fabricação em termos de utilização da técnica de eletrodeposição dos estudos de Medeiros (2020) e Gonçalves (2020), observou-se que, em termos de menores níveis de emissão de GEE temos o processo da eletrodeposição utilizando

o hexano como tratamento de substrato ($9,70 \times 10^{-4}$ kg de CO₂eq), segundo estudo de Gonçalves (2020), e com relação as melhores médias de absorção temos 98,74%, do estudo de Medeiros, com os parâmetros de deposição: tempo (5 minutos), potência 9 watts e distância de 10mm, e a configuração do banho eletrolítico 2.

A Tabela 4.8 sumariza a comparação dos valores de emissões de GEE de todos os processos de fabricação de SAS analisados, do estudo com as dos autores selecionados, comparando as técnicas *Sputtering* e Eletrodeposição.

Tabela 4. 8 - Emissões de GEE e parâmetros de deposição de todos os processos de fabricação dos autores de SAS analisados no estudo das técnicas *Sputtering* e Eletrodeposição

Autores	Tratamento Substrato	Parâmetros de deposição			Absort. Média	Emissões de GEE (kg CO ₂ .eq)	
		Técnica de deposição	Potência (w)	tempo (min)			distância (mm)
Menezes (autora)	eletropolimento		40	30	110	96,97%	0,0257
Medeiros	isopropanol	Sputtering	50	15	105	91,42%	0,0152
Andrade	hexano		60	20	105	91,75%	0,0072
Andrade	eletropolimento					97,76%	0,0191
Medeiros - banho1	isopropanol/ácido cítrico		30	3	5	97,48%	0,0051
Medeiros - banho2	isopropanol/ácido cítrico		9	5	10	98,74%	0,0044
Gonçalves	hexano	Eletrodeposição		5	30	96,85%	0,0010
Gonçalves	ácido cítrico		30	2	15	95,99%	0,0027
Gonçalves	eletropolimento		1	30	97,76%	0,0129	
Gonçalves	tratamento térmico		5	15	97,16%	0,4979	

Analisando e comparando os processos de fabricação que utilizaram a técnica *Sputtering* para produzir SAS, o processo do estudo com os processos de Medeiros (2020), e de Andrade (2020), observou-se que a configuração do processo produtivo que utiliza o tratamento de substrato com hexano desenvolvido por Andrade (2020) mostrou o menor nível de emissão de GEE ($7,2 \times 10^{-3}$ kg CO₂eq), porém não obteve os melhores níveis de absorção comparados aos outros processos, porém utilizando o eletropolimento como tratamento do substrato, a autora Andrade (2020) obteve bons níveis de absorção e menor emissão de GEE ($1,91 \times 10^{-2}$ kg CO₂eq) quando comparado aos valores obtidos nos dados de emissão de GEE do presente estudo ($2,57 \times 10^{-2}$ kg CO₂eq). Logo, a configuração de parâmetros de deposição mais favorável indica uma potência de 60 watts, no tempo de 20 minutos com uma distância de 105mm.

Analisando e comparando os processos de fabricação que utilizaram a técnica de Eletrodeposição (Medeiros (2020) e Gonçalves (2020) para produzir SAS, com o processo

do estudo pela técnica *Sputtering*. O processo produtivo da técnica de eletrodeposição do estudo de Gonçalves (2020) utilizando hexano como limpeza do substrato apresenta o menor valor de emissão de GEE em com 1×10^{-3} kg de CO₂-eq, ou seja, 0,167% do total de emissões de GEE em relação a todos os processos de fabricação de SAS estudados na pesquisa. Já a técnica de eletrodeposição com tratamento térmico como tratamento de substrato de Gonçalves (2020) foi a que apresentou o maior valor de emissões de GEE, com $4,979 \times 10^{-1}$ kg de CO₂-eq, ou seja 84,22% do total de emissões de GEE em relação a todos os processos de fabricação de SAS estudados na pesquisa.

Com relação aos níveis de absorção e emissão de GEE do processo de eletrodeposição com a configuração do banho 2 e tratamento de substrato por isopropanol e ácido cítrico, do trabalho de Medeiros (2020), mostrou-se favorável com 98,74% de absorvidade, com 9 watts de potência, 5 minutos de deposição 10mm de distância, e $4,4 \times 10^3$ kg CO₂eq de GEE. Porém, para otimização do processo pode-se sugerir troca do tratamento de substrato por hexano para desta forma melhorar os níveis de emissão de gases de efeito estufa.

Portanto, comparando a técnica *Sputtering* versus a eletrodeposição, em termos de absorvidade e emissão de GEE, sugere-se, baseado nos resultados obtidos, a configuração de processo produtivo de SAS a base de cromo, utilizando o tratamento de substrato com eletropolimento, na técnica de *Sputtering*, com os parâmetros de deposição de 60 watts, tempo de 20 minutos e distância do alvo de 105mm. E utilizando o tratamento de substrato com hexano, na técnica eletrodeposição com os parâmetros de deposição de 9 watts, tempo de 5 minutos e distância de 10mm, com o banho eletrolítico de configuração 2.

O estudo de Altun-Çiftçioğlu *et al.* (2016) comparou a etapa de processamento da abordagem convencional de SAS com emissões de 8,68 kg CO₂-eq enquanto a produção rolo a rolo emitiu 3,4 kg CO₂-eq. Sánchez-Cruces *et al.* (2014) realizou estudo impacto ambiental em filmes finos seletivos solares por eletrodeposição (revestimentos de CO₃O₄) e por técnicas de sol-gel (CO (CH₃COOH) 2), e obteve 862,61 e 872,18 kg CO₂eq/m². Gökulu *et al.* (2011) apresentou estudo ACV da produção contínua de SAS com menos emissão de GEE em comparação aos processos de mineração de Cu e Ni.

Percebeu-se, a partir dos resultados obtidos no estudo que a energia elétrica utilizada provoca o aumento das emissões nos processos que a utilizam, uma maneira de diminuir as emissões de GEE é usar energia solar fotovoltaica para suprir a demanda elétrica. Neste caso, baseado em Diniz, Carvalho e Abrahão (2021) as emissões de GEE tem 0.0766 kg CO₂-

eq/kWh para a energia solar fotovoltaica, contra 0,227 kgCO₂eq/kWh consumido da rede (baixa tensão).

A tabela 4.9 apresenta os resultados de emissões de GEE dos processos de fabricação de SAS pelas técnicas estudadas comparando o uso de energia elétrica rede brasileira x energia fotovoltaica. Os valores que foram contabilizados no cálculo das emissões de GEE do consumo energia elétrica pela rede de energia de baixa tensão brasileira foram substituídos pelas emissões de GEE da energia fotovoltaica, ou seja, 0,227kg CO₂eq/kWh emissões de GEE consumido da rede (baixa tensão) por 0,0766kg CO₂-eq/kWh para a energia solar fotovoltaica.

Tabela 4. 9 - Emissões de GEE comparando uso de energia elétrica brasileira x energia fotovoltaica

Emissões de GEE (kg CO ₂ -eq) energia elétrica brasileira x energia fotovoltaica				
Autores		Tratamento substrato	Energia elétrica brasileira	Energia fotovoltaica
Resultado do Estudo		eletropolimento	0,0257	0,0170
Medeiros	<i>sputtering</i>	isopropanol	0,0152	0,0110
		hexano	0,0053	0,0023
Andrade		eletropolimento	0,0173	0,0143
Medeiros	eletrodeposição1	isopropanol/ácido cítrico	0,0051	0,0043
	eletrodeposição2		0,0044	0,0041
		hexano	0,0010	0,0008
Gonçalves	eletrodeposição	ácido cítrico	0,0027	0,0026
		eletropolimento	0,0129	0,0128
		tratamento térmico	0,4979	0,1678

Observando a tabela 4.9, percebe-se que houve redução das emissões de GEE em todos os processos produtivos, independente da técnica. Entretanto, o *Sputtering* realizado no estudo obteve redução significativa de emissões CO₂-eq comparando a estudos de Medeiros (2020) e Andrade (2020), assim como quando comparado a técnica de eletrodeposição realizada por Gonçalves (2020), onde o processo utilizando o tratamento térmico como limpeza de substrato ainda se mostra com índices altos de emissão de GEE mesmo após substituição pela energia fotovoltaica. Com relação aos tipos de tratamento de substrato (isopropanol, hexano, ácido cítrico, eletropolimento tratamento térmico) considerados, percebeu-se que tratamento térmico foi o responsável pela maior porção de

emissões, devido ao uso intenso de eletricidade, porém o uso da energia fotovoltaica mitiga essas emissões, como mostrado na tabela 4.9.

A ACV aqui apresentada identifica os principais pontos dos processos produtivo de SAS que possuem margens de melhoria ou adequação vislumbrando menores impactos ambientais. Conforme mencionado por Delgove *et al.* (2019), as ACVs em escala de laboratório são particularmente relevantes para a comparação de processos em estágio inicial, para identificar a rota mais vantajosa para aumento de escala de uma perspectiva ambiental. Operações em menor escala também são relevantes do ponto de vista ambiental, dada a ampla gama de produtos químicos usados e a energia consumida nessas operações de processamento (BARJOVEANU *et al.*, 2020).

De acordo com dados lançados pelo Sistema de Estimativas de Emissões de Gases de Efeito - SEEG, o Brasil emitiu 2,2 bilhões de toneladas de gases de efeito estufa (GEE) em 2019. O setor de Energia foi responsável por 19% dessas emissões, enquanto o de Processos Industriais e Uso de Produtos (PIUP) teve responsabilidade por 5% do total emitido no país. Esses dois segmentos totalizaram, portanto, 24% das emissões nacionais. As emissões associadas aos setores apresentam-se crescendo sustentadamente desde 1970. Juntas, as emissões desses setores cresceram aproximadamente 113% entre 1990 e 2016 (IEMA, 2020).

Segundo Simon (2021), em 2018 cerca de 2,1 bilhões de toneladas de GEE foram emitidas pela indústria, o equivalente ao total de todas as emissões da França, Alemanha e Reino Unido combinadas. Considerando a dimensão desse impacto, é esperado que as empresas estejam atuando na mitigação dos problemas gerados.

Sampaio *et al.* (2017) já argumentou que, apesar dos desafios da aplicação da ACV desde os estágios iniciais de pesquisa, os resultados podem indicar alternativas ou caminhos (que são viáveis em termos de requisitos de equipamento e levam a cargas ambientais mais baixas - sem essas avaliações, avanços científicos simplesmente não poderiam evoluir do laboratório à escala industrial).

Este estudo contribui para expandir a base de conhecimento, fornecendo dados de produção e inventário de ciclo de vida dos processos produtivos de filmes absorvedores solares a base de cromo. A inovação e monitoramento fazem parte do progresso de desenvolvimento de novos produtos, vislumbrando bom desempenho e tecnologia ambiental.

Espera-se que este estudo inspire a aplicação de ACVs comparativos em estágio inicial para o desenvolvimento de produtos e processos de baixo carbono e, mais especificamente, de superfícies absorvedoras solares. ACVs como o aqui apresentado podem ser usados como ferramentas de aprendizagem para comparar o desempenho ambiental de processos, mesmo em uma escala prospectiva.

CAPÍTULO V

5.1 CONCLUSÕES

A avaliação das emissões de gases de efeito estufa associada à obtenção e comparação das superfícies absorvedoras solares com aplicação do cromo pelas técnicas de *Sputtering* e eletrodeposição mostrou-se satisfatória e relevante, uma vez que, segundo os experimentos realizados, foi possível produzir, caracterizar, quantificar, comparar e obter resultados em absorvância solar e CO₂-eq da produção de superfícies com propriedades óticas de alta eficiência, com absorvâncias tão altas quanto 98%, e com tratamentos superficiais diferenciados.

O mapeamento da estrutura do campo de conhecimento, nas áreas de interesse “superfícies absorvedoras solares e ACV”, feita pela revisão bibliométrica e de redes utilizando o software *VosVieWer*, encontrou 8.875 artigos na primeira busca mais abrangente, após o aumento do número de termos e uso dos conectivos de busca chegou a 9 e 4 artigos e por fim 0 resultados, quando incluído todos os termos da pergunta de pesquisa com o conectivo “AND”, até a data de 14 de setembro de 2021. Deste modo percebeu-se a lacuna de pesquisa referente a avaliação proposta, reforçando a contribuição do estudo.

A metodologia da Avaliação de Ciclo de Vida e o método de avaliação de impacto ambiental IPCC 2013 GWP 100, com a utilização do software *Simapro*, mostrou-se clara e eficiente, visto que foram elaborados inventários do processo produtivo proposto pelo estudo e da literatura.

As emissões das SAS fabricadas por *Sputtering* foram 25,7g CO₂-eq/processo com tratamento de substrato por eletropolimento. As emissões dos estudos comparativos de eletrodeposição foram 5,1g e 4,4 g CO₂-eq/processo para o banho 1 e banho 2, respectivamente. Considerando eletrodeposições comparando diferentes tratamentos de substrato, as emissões foram 1,0 2,7 12,9 e 49,79g CO₂-eq/processo, respectivamente para hexano, ácido cítrico, eletropolimento, e tratamento térmico. Quando o *Sputtering* foi

realizado com tratamento de substrato com isopropanol, hexano e eletropolimento, as emissões foram 15,2 7,2 e 19,1g CO₂-eq/processo.

Contabilizando as emissões de GEE em metros quadrados, nas condições descritas no item 4.3.1, tem-se que em 1m² das SAS produzidas nas especificações descritas no presente estudo, seriam gerados 3,156; 3,171 e 3,202 kg de CO₂ equivalente de GEE, respectivamente, para os tempos de 30, 60 e 120 minutos do processo produtivo do estudo.

Utilizando a técnica *Sputtering* obteve-se resultados de 10% a mais de emissões CO₂-eq comparando a estudos com a mesma técnica, porém 25% a menos de emissões de GEE quando comparado a técnica de eletrodeposição utilizando o tratamento térmico como limpeza de substrato.

Com relação aos tipos de tratamento de substrato (isopropanol, hexano, ácido cítrico, eletropolimento tratamento térmico) considerados, percebeu-se que tratamento térmico foi o responsável pela maior porção de emissões, devido ao uso intenso de eletricidade. Porém, vale destacar que o tratamento com hexano pode gerar impactos em outras categorias de impactos. Toxicidade aos homens e organismo aquáticos. Observou-se que os filmes do estudo depositados em substratos eletropolidos apresentaram boas absorções solares (90-98%), comparando aos tratamentos com hexano, álcool isopropílico e ácido cítrico.

Entretanto, observou-se que para ambas as técnicas de deposição de filmes, o consumo de eletricidade associado foi responsável pela maior parte da pegada de carbono total. Isso pode então ser melhorado usando energia solar fotovoltaica. A destinação de resíduos não foi avaliada, mas deve ser considerada em um estudo futuro com o objetivo de obter índices mais baixos de pegada de carbono total.

Sendo o primeiro estudo a produzir SAS e relatar o inventário detalhado de ACV de pulverização catódica e eletrodeposição para os processos de fabricação de superfícies seletivas de Cr_xO_y e apresentar os resultados de absorância e pegada de carbono correspondente, percebe-se relevante contribuição aos novos revestimentos seletivos solares desenvolvidos em laboratório, promovendo a melhoria do desempenho ambiental, contribuindo na redução o CO₂ de processos produtivos de produtos de fontes de energia renováveis não poluentes, visto que quantidades consideráveis de gases poluentes do efeito estufa podem ser evitadas ou otimizadas.

5.2 CONTRIBUIÇÕES DA TESE

Artigos publicados:

- MENEZES, V. L.; GOMES, K. C.; CARVALHO, M.. Evaluation of the manufacturing processes for solar selective surfaces based on CrxOy from a carbon footprint perspective. *Cleaner Materials*, v. 3, p. 100035, 2022;
- MEDEIROS, I. D.M; GONÇALVES, R. P.N.; MENEZES, V. L.; GALVÃO, G. O.; GOMES, K.C.. Evaluation of Potential Residual Silica as Antireflective Layer for Selective Solar Surface of Black Chromium. *Materials Research Journal of Materials*, v. 22, p. 1-3, 2019.
- MENEZES, V. L.; MEDEIROS, I. D.M.; GOMES, K. C.; CARVALHO, M.; Eletrodeposição para fabricação de superfícies seletivas para mitigação de mudanças climáticas no semiárido. In: II Congresso Internacional da Diversidade do Semiárido, 2017. v. 1.

Artigo em submissão:

- MENEZES, V. L.; GOMES, K. C.; CARVALHO, M.. Bibliometric review of chrome based solar absorber surface evaluating greenhouse gas emission, 2022.

Artigo em elaboração:

- MENEZES, V. L.; GOMES, K. C.; CARVALHO, M.. Chrome-based Solar Absorber Surface: A Study of the Greenhouse Gas Emissions associated with its manufacturing processes.

5.3 SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos futuros sugere-se a consideração do cenário final (descarte) dos materiais, em especial os banhos da eletrodeposição, e análises de sensibilidade quanto a origem da eletricidade consumida.

Avaliação da possibilidade de construir modelos de otimização, utilizando pesquisa operacional, quanto a busca de uma combinação ótima de processo produtivo de técnicas de deposição para minimizar o impacto ambiental total (ou mesmo por etapa).

REFERÊNCIAS

- ABBAS, A. *Solchrome solar selective coating—an effective way for solar water heaters globally*. *Renew. Energy*, 19 (2000), p. 145
- ABBOTT, D. *Keeping the energy debate clean: How do we supply the world's energy needs?* *Proceedings of the IEEE*, v. 98, n. 1, p. 42-66, 2010.
- ARDENTE, F.; BECCALI, G.; CELLURA, M.; LO BRANO, V. (2005). *Life cycle assessment of a solar thermal collector*. *Renewable Energy*, 30(7), 1031-1054.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS Técnicas - ABNT. *Gestão Ambiental – Avaliação do Ciclo de Vida - Princípios e estrutura: NBR ISO 14040*, Rio de Janeiro: ABNT, 2009 – versão corrigida 2014a.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. *Gestão ambiental — Avaliação do ciclo de vida — Requisitos e orientações: NBR ISO 14044*, Rio de Janeiro: ABNT, 2009 – versão corrigida 2014b.
- AGUILAR, M.; BARRERA, E.; PALOMAR-PARDAVÉ, M.; HUERTA, L.; MUHL, S. *Characterization of black and White chromium electrodeposition films: surface and optical properties*. *Journal of non-crystalline solids*, v. 329, n. 1-3, p. 31-38, 2003.
- ARBAULT, D. *et al. Integrated earth system dynamic modeling for life cycle impact assessment of ecosystem services*. *Science of The Total Environment*, v. 472, p. 262-272, 2014.
- AXELBAUM, R. L.; BRANDT, H. *The effect of substrate surface preparation on the optical properties of a black chrome solar absorber coating*. *Solar energy*, v. 39, n. 3, p. 233-241, 1987.

ALTUN-ÇİFTÇIOĞLU, G.A.; GÖKULU, O.; KADIRGAN, F.; KADIRGAN, M.A.N. *Life cycle assessment (LCA) of a solar selective surface produced by continuous process and solar flat collectors*. Solar Energy, Volume 135, Pages 284-290, ISSN 0038-092X, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.05.049>.

ATKINSON, C.; SANSOM, C. L.; ALMOND, H. J.; SHAW, C. P. (2015). *Coatings for concentrating solar systems—A review*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 45, 113-122.

ACTION. Programme of the European Community, Environment 2010, 31 Final.

ARKIAN AH, NAJAFI G, GORJIAN S, LONI R, BELLOS E, YUSAF T. *Performance assessment of a solar dryer system using small parabolic dish and alumina/oil nanofluid: simulation and experimental study*. Energies 2019;12:4747. <https://doi.org/10.3390/en12244747>.

A. HOSSEINI, A. BANAKAR, S. GORJIAN. *Development and performance evaluation of an active solar distillation system integrated With a vacuum-type heat exchanger*. Desalination, 435 (2018), pp. 45-59, 10.1016/j.desal.2017.12.031

AB KHELIFA, S. KHAMLICH, ZY NURU, L. KOTSEDI, A. MEBRAHTU, M. BALGO UTHI, AA GUIZANI, W. DIMASSI, M. MAAZA. *Crescimento e caracterização do absorvedor solar multicamadas de Cr_2O_3 / Cr / Cr_2O_3 espectralmente seletivo por evaporação de feixe de elétrons*. J. Alloys Compd., 734 (2018), pp. 204 - 209, 10.1016 / j. jallcom.2017.11.036

ALTUN-ÇİFTÇIOĞLU, G. A., GÖKULU, O., KADIRGAN, F., & KADIRGAN, M. A. N. (2016). Life cycle assessment (LCA) of a solar selective surface produced by continuous process and solar flat collectors. Solar Energy, 135, 284-290.

BACON, D.; IGNATIEV, A. *The role of the substrate in the optical degradation of solar absorbing black chrome*. Solar Energy Materials, v. 9, n. 1, p. 3–19, 1983.

- BARBOSA, R. R.; CARVALHO, M. *Dimensionamento de um sistema de aquecimento solar de água para aplicações industriais*. Engevista (UFF), v. 20, p. 214-238, 2018.
- BARE J.C.; HOFSTETTER P.; PENNINGTON D.W.; DE HAES HA U. *Life cycle impact assessment midpoints vs. endpoints: the sacrifices and the benefits*. International Journal of Life Cycle Assessment, v.5, n.5, 2000.
- BEN (2020). *Balanço Energético Nacional. Ano Base 2020*. Empresa de Pesquisa Energética, Rio de Janeiro e Ministério de Minas e Energia, Brasília, Brasil. 292 pp.
- BÖRNER, K.; CHEN, C.; BOYACK, K. W. *Visualizing knowledge domains*. Annual Review of Information Science and Technology, v. 37, n. 1, p. 179-255, 2003.
- BJØRN, A., Owsianiak, M., Molin, C., & Hauschild, M. Z. (2018). LCA history. In Life Cycle Assessment (pp. 17-30). Springer, Cham.
- BOGAERTS, W. F.; LAMPERT, C. M. *Materials for photothermal solar energy conversion*. Journal of Materials Science, v. 18, n. 10, p. 2847-2875, 1983.
- BARRERA, CE.; SALGADO, L.; MORALES, U.; GONZÁLEZ, I. *Absorção solar de filmes de cobalto preto e cobalto-prata preto e sua relação com o coeficiente de rugosidade*. Renovar. Energia, 24 (2001), pp. 357 - 364, 10.1016 / S0960-1481 (01) 00017-9
- CARVALHO, M.; SANTANA FREIRE, R.; BRITO, A. M. V. G. (2016). *Promotion of sustainability by quantifying and reducing the carbon footprint: new practices for organizations*. In Energy, transportation and global Warming (pp. 61-72). Springer, Cham.
- CURRAN, MA, editor, 1999. *The status of LCA in the USA*. International Journal of Life Cycle Analysis, v.4, n.3, pp. 123-124.
- COM, 2001a. Commission of the European Communities. Sixth Environmental

- CARVALHO, M., & DELGADO, D. (2017). *Potential of photovoltaic solar energy to reduce the carbon footprint of the Brazilian electricity matrix*. LALCA-Revista Latino-Americana em Avaliação do Ciclo de Vida, 1(1), 64-85
- C. INGRAO, A. LOGIUDICE, J. BACENETTI, C. TRICASE, G. DOTELLI, M. FIALA, et al. *Energy and environmental assessment of industrial hemp for building applications: a review*. Renew Sustain Energy Rev, 51 (2015), pp. 29-42, 10.1016/j.rser.2015.06.002
- CAO, F.; MCENANEY, K.; CHEN, G.; REN, Z. *A review of cermet-based spectrally selective solar absorbers*. Energy & Environmental Science, v. 7, n. 5, p. 1615-1627, 2014.
- CARVALHO, M.; SERRA, L.M.; LOZANO, M.A. *Optimal synthesis of trigeneration systems subject to environmental constraints*. Energy, v. 36, n. 6, p. 3779-3790, 2011.
- CARVALHO, M.; DELGADO, D. B. M. *Potential of photovoltaic solar energy to reduce the carbon footprint of the Brazilian electricity matrix*. Revista Latino Americana em Avaliação do Ciclo de Vida, v.1, n.1, 2017.
- CARVALHO, M. *Thermoeconomic and environmental analyses for the synthesis of polygeneration systems in the residential-commercial sector*. Tese de doutorado, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Zaragoza. Zaragoza, Espanha: UniZar, 2011.
- CARVALHO, M.; FREIRE, R. S. ; BRITO, A. M. V. G. . *Promotion of Sustainability by Quantifying and Reducing the Carbon Footprint: Knew Practices for Organizations*. In: Panagiotis Grammelis. (Org.). Energy, transportation and global Warming. 1ed.: Springer International Publishing, v. 1, p. 61-76, 2016.
- CHAKRABORTY, D.; ROY, J. *Corporate carbon footprint accounting: estimating carbon footprint of an indian paperboard and paper production unit*. International Journal of Business Insights & Transformation, 6(1), 18-26, 2013.

- CHERUBINI, F.; BARGIGLI, S.; ULGIATI, S. *Life Cycle Assessment (LCA) of Waste management strategies: landfilling, sorting plant and incineration*. Energy, v. 34, p. 2116-2123, 2009.
- CURRAN MA, editor. *Environmental life cycle assessment*. Knew York: McGraw-Hill; 1996.
- CURRAN, M. *The status of LCA in the USA*. International Journal of Life Cycle Analysis, v.4, n.3, PP. 123-124. 1999.
- CAVALCANTE, N. G. L. *et al. Implementação da produção enxuta em saúde: uma revisão sistemática de redes*. Revista Produção Online, Florianópolis, v. 20, n. 1, p. 172-201. 2020. ISSN 16761901.
- CAO, F., KRAEMER, D., TANG, L., LI, Y., LITVINCHUK, A. P., BAO, J., ... & REN, Z. (2015). *A high-performance spectrally-selective solar absorber based on a yttria-stabilized zirconia cermet with high-temperature stability*. Energy & Environmental Science, 8(10), 3040-3048.
- DAN, A., BASU, B., ROY CHOWDHURY, S., BISWAS, K., & RAJ, B. (2018). *Nanotechnology and energy conversion: A solution using spectrally selective solar absorbers and thermoelectric*. In: Nanoscience and Nanotechnology: Advances and Developments in Nano-sized Materials (p. 234). Walter de Gruyter GmbH & Co KG.
- DUPONT *et al.* 2020. Available solar energy under physical and energy return on investment constraints. Appl. Energy, 257.
- DARYABEGY, M.; MAHMOODPOOR, A. R. *Method of manufacturing absorbing layers on copper for solar applications (I)*. Renewable Energy Organization of Iran, v. 2, p. 35-39, 2006.

- DIAMANTINO, T. C. *et al.* *Accelerated aging tests for solar absorber coatings*. EuroSun 2018 : 12th International Conference on Solar Energy for Buildings and Industry. Anais...Rapperswil, Switzerland: 2018
- DINIZ, D.P., CARVALHO, M., ABRAHÃO, R. (2021). *Greenhouse gas accounting for the energy transition in a brewery*. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 40(2), e13563.
- DOĞAN, NILGÜN; TUĞRUL, A. BERİL. *Optical and solar parameters of irradiated lead–alkali–silicate glass*. *Solar energy materials and solar cells*, v. 69, n. 3, p. 241-250, 2001.
- ECK, N.V. & WALTMAN, L. (2010). “Software survey: a computer program for bibliometric mapping”. *Scientometrics*.
- ECOINVENT. *Ecoinvent: Implementation of Life Cycle Impact Assessment Method*. Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Suíça, 2018.
- ERIKSSON, E.; KARLSSON, P.E.; HALLBERG, L.; JELSE, K. *Carbon footprint of cartons in Europe: carbon footprint methodology and biogenic carbon sequestration*. Stockholm: IVL Swedish Environmental Research Institute, p. 1-59, 2010.
- EHRMANN, N.; REINEKE-KOCH, R. *Selectively coated high efficiency glazing for solar-thermal flat-plate collectors*. *Thin Solid Films*, v. 520, p. 4214-4218, 2012.
- EVANGELISTI, L., VOLLARO, R. D. L., & ASDRUBALI, F. (2019). *Latest advances on solar thermal collectors: A comprehensive review*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 114, 109318.
- FAROOQ, M.; RAJA, I. A. *Optimisation of metal sputtered and electroplated substrates for solar selective coatings*. *Renewable Energy*, v. 33, n. 6, p. 1275-1285, 2008.

- FINNVEDEN, G., HAUSCHILD, M. Z., EKVALL, T., GUINEE, J., HEIJUNGS, R., HELLWEG, S., ... & SUH, S. *Recent developments in life cycle assessment. Journal of environmental management*, 91(1), 1-21, 2009.
- FLORINDO, T.J.; MEDEROS, G.I.B.; RUIVARO, C.F.; COSTA, J.S. *Avaliação do impacto do ciclo de vida: uma discussão metodológica. Natureza on line*, v. 13, n. 5, p. 211-219, 2015.
- FREIRE, R. S. ; CARVALHO, M. ; CARMONA, C. U. M. ; BRITO, A. M. V. G. . *Perspectives on the Implementation of Climate Change Public Policies in Brazil. In: Panagiotis Grammelis. (Org.). Energy, Transportation and Global Warming. 1ed.: Springer International Publishing, 2016, v. 1, p. 13-2.*
- FULLANA, P.; PUIG, R. *Análisis del Ciclo de Vida*. Barcelona: Rubes Editorial, 1997.
- GUINÉE, J.B. *Life Cycle Assessment: An operational guide to the ISO Standards; LCA in Perspective; Operational Annex to Guide*, The Netherlands: Centre for Environmental Science, Leiden University, 2001.
- GORALCZYK, 8M. *Avaliação do ciclo de vida no setor de energia renovável. Appl Energia*, 75 (2003), pp. 205 – 211.
- GONÇALVES, R. P. N. *Avaliação dos efeitos do envelhecimento em superfícies absorvedoras solares de CrxOy obtidas a partir de processo de eletrodeposição*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2020.
- GOLDEMBERG, J.; LUCON, O. *Energia, Meio Ambiente e Desenvolvimento*. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2011.
- GOMES, K. C. *et al. Avaliação das características da cinza do bagaço da cana-de-açúcar obtida por moagem de alta energia. Revista InterScientia*, v. 5, n. 2, p. 39-50, 2017a.

- GOMES, K. C. *et al.* *Superfície seletiva solar a base de cinza do bagaço da cana-de-açúcar via deposição por pintura*. Revista InterScientia, v. 5, n. 1, p. 64-74, 2017b.
- GUINÉE, J.B. . *Handbook on life cycle assessment: operational guide to the ISO standards*, Boston: Kluwer Academic Publishers, 2002.
- GORJIAN, S., EBADI, H., CALISE, F., SHUKLA, A., INGRAO, C. *A review on recent advancements in performance enhancement techniques for low temperature solar collectors*. Energy Conversion and Management, Volume 222, 113246, ISSN 0196-8904. 2020.<https://doi.org/10.1016/j.e.nconman.2020>
(<https://WWW.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890420307901>)
- GUIMARAES, M C R. *Deposição e caracterização de filmes finos de CrN depositados por diferentes processos de magnetron Sputtering*. 2017. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento, Caracterização e Aplicação de Materiais) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2017. doi:10.11606/D.18.2017.tde-17112017-104317.
- GÖKULU, O., ÇİFTÇIOĞLU, G. A. A., & KADIRGAN, M. N. (2011). *Cradle to gate life cycle assessment of continuous production for solar collector selective surface*. Marmara Fen Bilimleri Dergisi, 23(4), 160-170.
- GRÁCIO, M. C. C. (2016). Acoplamento bibliográfico e análise de cocitação: revisão teórico-conceitual. *Encontros Bibli: Revista eletrônica De Biblioteconomia E Ciência Da informação*, 21(47), 82-99. <https://doi.org/10.5007/1518-2924.2016v21n47p82>
- G.B. Smith, G. Zajac, A. Ignatiev. Surf. Sci., 114 (1981), p. 614
- G. ZAJAC, G.B. SMITH, A. IGNATIEV. J. Appl. Phys., 51 (1980), p. 554
- HAMID, Z. A. *Electrodeposition of black chromium from environmentally electrolyte based on trivalent chromium salt*. *Surface and Coatings Technology*. Volume 203, Issue Pages 3442-3449,ISSN 0257-8972.

H. HOU, G. SHAO, W. YANG, W.-Y. WONG. *Nanoestruturas inorgânicas mesoporosas unidimensionais e suas aplicações em energia, sensor, catálise e adsorção*. Prog. Mater. Sci., 113 (2020), p. 100671, 10.1016 / j. pmatsci.2020.100671.

HAUSCHILD, M. Z., GOEDKOOP, M., GUINÉE, J., HEIJUNGS, R., HUIJBREGTS, M., JOLLIET, O., MARGNI, M., SCHRYVER, A., HUMBERT, S., LAURENT, A., SALA, S., PANT, R. *Identifying best existing practice for characterization modeling in life cycle impact assessment*. The International Journal of Life Cycle Assessment, 18(3), 683-697, 2012.

HEAVENS, O. S. *Optical properties of thin solid films*. Dover Publications. New York. VII, 261 p. 1991.

IEA. 2018 World Energy Outlook – Executive Summary. Oecd/Iea 2018:11.

IPCC - (*International Panel on Climate Change* - IPCC, 2014).

IEMA - Instituto de Energia e Meio Ambiente. *Emissões dos setores de energia e Processos industriais e uso de produtos*. SEEG, documento de análise 2018, 2020

INCROPERA, F. P.; WITT, D. P. *Fundamentos da transferência de calor e massa*, 3ª Edição. Rio de Janeiro. LTC, 1992.

ISO 14040. *Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework*. International Organization for Standardization (ISO), Genebra, 2006.

ISO 14044. *Environmental management - Life cycle assessment - Requirements and guidelines*. International Organization for Standardization (ISO), Genebra, 2006.

J.P. HOARE. J. Electrochem. Soc., 126 (1979), p. 190

JAFARI, S.; ROZATI, S. M. *Characterization of black chrome films prepared by electroplating technique*. In: World Renewable Energy Congress-Sweden; 8-13 May;

2011; Linköping; Sweden. Linköping University Electronic Press, p. 3999-4005, 2011.

JOLY, M.; ANTONETTI, Y.; PYTHON, M.; GONZALEZ, M.; GASCOU, T.; SCARTEZZINI, J.-L.; SCHULER, A. *Novel black selective coating for tubular solar absorber sbasedon a sol-gel method*. Solar Energy, v. 94, p. 233–239, 2013.

KALOGIROU, S. A. *Solar thermal collectors and applications. Progress in energy and combustion science*, v. 30, n. 3, p. 231-295, 2004. KALOGIROU, S.A. Solar thermal collectors and applications. Progress in energy and combustion science. V.30, p.231-395, 2004.

KARLSSON, B.; RIBBING, C. G.; ROOS, A.; VALKONEN, E; KARLSSON, T. *Optical Properties of Some Metal Oxides in Solar Absorbers*. Physica Scripta.

KASAEIAN, A. *et al. Performance evaluation and nanofluid using capability study of a solar parabolic trough collector*. Energy Conversion and Management, v. 89, p. 368–375, jan. 2015v 25, n. 6A, p. 826--831, 1982.

KELLY, P. J.; ARNELL, R. D. *Magnetron sputtering: a review of recent developments and applications*. Vacuum, v. 56, n. 3, p. 159-172, 2000.

KENNEDY, Cheryl E. *Review of mid-to high-temperature solar selective absorber materials*. National Renewable Energy Lab., Golden, 2002.

KOKOROPOULOS, P.; SALAM, E.; DANIELS, F. *Selective Radiation Coatings. l'amélioration des performances des collecteurs solaires*. Surface Technology, v. 11, p. 229-258, 1980.

KHELIFA, A.B., S. KHAMLICH, Z.Y. NURU, L. KOTSEDI, A. MEBRAHTU, M. BALGOUTHY, A.A. GUIZANI, W. DIMASSI, M. MAAZ. *Growth and characterization of spectrally selective Cr₂O₃/Cr/Cr₂O₃ multilayered solar absorber by e-beam evaporation*. Journal of Alloys and Compounds. Volume 734, Pages 204-209, ISSN 0925-8388, 2018.<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.11.036>.

K.D. LEE, W.C. JUNG, J.H. KIM. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, 63 (2000), p. 125

KUMAR, S. K., SURESH, S., MURUGESAN, S., RAJ, S.P. *Filmes finos de CuO feitos de nanofibras para aplicações de absorvedor solar seletivo*. *Sol. Energy*, 94 (2013), pp. 299 - 304, 10.1016 / j. solener.2013.05.018

KUMAR, SK; MURUGESAN, S.; SURESH. *Preparação e caracterização de nanoestruturas de CuO em substrato de cobre como absorvedores solares seletivos*. *Mater. Chem. Phys.*, 143 (2014), pp. 1209 - 1214, 10,1016 / j. matchemphys.2013.11.023

KLÜPPEL, R. P. *Curso de conversão térmica da energia solar: Parte I – Fundamentos*. João Pessoa, 2017.

LABEEE UFSC. *Manual Técnico para Projeto e Construção de Sistemas de Aquecimento Solar & Gás Natural*, 2011.

LACERDA, L. M. *et al. Avaliação dos impactos ambientais de um processo industrial utilizando como matéria-prima policarbonatos virgem e reciclado*. *Engenharia Sanitaria e Ambiental [online]*. 2019, v. 24, n. 6 [Acessado 26 Junho 2021] , pp. 1103-1113. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/S1413-41522019177627>>. Epub 20 Dez 2019. ISSN 1809-4457. <https://doi.org/10.1590/S1413-41522019177627>.

LEE, K. D.; JUNG, W. C.; KIM, J. H. *Thermal degradation of black chrome coatings*. *Solar energy materials and solar cells*, v. 63, n. 2, p. 125-137, 2000.

LEE, H. C.; SEO, J. Y.; CHOI, Y. W.; LEE, D. W. *The growth of indium-tin-oxide thin films on glass substrates using DC reactive magnetron sputtering*. *Vacuum*, v. 72, n. 3, p. 269-276, 2004.

LEE, K. D. *Preparation and characterization of black chrome solar selective coatings*. *Journal of Korean Physical Society*, v. 51, p. 135, 2007.

- LEED, U. S. *Green Building Council*. LEED for Neighborhood Development, 2009. Disponível em: WWW. gbcbrasil.org.br/?p=leed-for-neighborhood-development. Acesso em: 10 março 2021.
- LIMA, A. M. F.; KIPERSTOCK, A.; CALDEIRA-PIRES, A. *Avaliação do ciclo de vida no meio acadêmico brasileiro*. In I Simpósio Nordestino de Saneamento Ambiental – ABES, Seção Paraíba. João Pessoa, 2006.
- LIZAMA-TZEC, FI, DM HERRERA-ZAMORA, O. ARÉS-MUZIO, VH GÓMEZ ESPINOZA, I. SANTOS-GONZÁLEZ, M. CETINA-DORANTES, AG VEGA-POOT, O. GARCÍA-VALLADARES, G. OSKAM. *Eletrodeposição de revestimentos seletivos com base em níquel negro para aquecedores solares de água de placa plana*. Sol. Energia, 194 (2019), pp. 302 - 310, 10.1016 / j.solener.2019.10.066
- LOGESH, K., VASUDEVAN, A., SUBRAMANI, K., & KOLAPPAN, S. (2021). *Study on selective surface black chromium-coated copper characteristics of a solar receiver at mid-temperature*. International Journal of Ambient Energy, 42(3), 279-284.
- MARTINS, M. *Produção de Superfícies Seletivas por Magnetron Sputtering para Aplicação em Coletores Solares*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e dos Materiais) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.
- MAUTHNER, F.; WEISS, W. *Markets and Contribution to the Energy Supply*. Solar Heating & Cooling Programme International Energy Agency, 2013.
- MEDEIROS, I. D. M. *Obtenção de filmes absorvedores solares a base de cromo: caracterização óptica e morfológica*. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) Universidade Federal da Paraíba. João Pessoa, 2020.
- MELO, R. L. *Eletrodeposição, Caracterização e estudos de corrosão de camadas de Ni-Mo-P*. Universidade Federal do Ceara. 2009

MEDEIROS, I.D.M.; SILVA NETO, J.F.; LEITE, K.S.; SILVA, A.K.B.; GOMES, K.C.
Eletrodeposição de filmes de cromo negro em substratos de cobre para absorção solar. Enciclopédia Biosfera. 2017;14(26):1370-137.

MEDEIROS, I. D. M.; GOMES, K. C.; GONCALVES, R. P. N. ; GALVAO, G. O. .
Selective Solar Surface Solar Based on Black Chromium: Influence of Electrodeposition Parameters in the Absorption of Surfaces. Mat. Res., São Carlos , v. 22, n. 2, e20180625, 2019.

MENESES, M. F. de O.; Andrade, C. R. de; Assis, L. F. C. de; Gonçalves, R. P. da N.; Gomes, K. C. *Influência do tratamento superficial em superfícies absorvedoras seletivas à base de Cr_2O_3 para coletores solares*. VIII Congresso Brasileiro de Energia Solar, Fortaleza, 2020.

MM RAHMAN, Z.-T. JIANG, C.-Y. YIN, LS CHUAH, H.-L. LEE, A. AMRI, B.- M. GOH, BJ WOOD, C. CREAGH, N. MONDINOS, M. ALTARAWNEH, BZ DL UGOGORSKI. *Estabilidade térmica estrutural de revestimentos de óxido de cobre-cobalto dopados com óxido de grafeno como uma superfície seletiva solar*. J. Mater. Sci. Technol., 32 (2016), pp. 1179 - 1191, 10.1016 / j. jnst.2016.09.002

MUSTOE, F. J. McGraw-Hill Ryerson Chemistry 12. 2002

N. MURUGESAN, S. SURESH, M. KANDASAMY, S. MURUGESAN, S. KARTHICK KUMAR. *Facile preparation of reduced graphene oxide Wrapped copper oxide thin film solar selective absorbers*, Ceramics International, Volume 46, Issue 17,2020, Pages 27897-27902, ISSN 0272-8842, <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.07.143>.

NUNES R.A.X., COSTA V.C., SADE W., ARAÚJO F.R., SILVAA G.M., *Selective surfaces of black chromium for use in solar absorbers*.2018. Materials Research

OLIVEIRA, A. S. *Avaliação da influência de tratamentos superficiais na eficiência térmica de superfícies seletivas obtidas via Sputtering*. Relatório de Qualificação

(Mestrado em Energias Renováveis), Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2020.

OREL, B.; SPREIZER, H.; SLEMENIK PERSE, L.; FIR, M.; SURCA VUK, A.; MERLINI, D.; VODLAN, M.; KOHL, M. *Silicone-based thickness insensitive spectrally selective (TISS) paints as selective paint coatings for coloured solar absorbers* (Part I). *Solar Energy Materials & Solar Cells*, v. 91, p. 93–107, 2007.

PAULA, Francisco. *Deposição electroquímica*. *Ciência & Tecnologia dos Materiais*, v. 22, n. 3-4, p. 87-93, 2010.

PEREIRA, G. F. *Superfícies seletivas absorvedoras com base em CrO₃: avaliação dos tratamentos dos substratos e influência nas propriedades ópticas dos filmes*. Dissertação (Mestrado em Energias Renováveis), Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2019.

PRÉCONSULTANTS. *Simapro Software*. Disponível em:

<https://acvbrasil.com.br/software/simapro> < Acesso em março 2021 >

PETTIT, R. B.; SOWELL, R. R.; HALL, I. J. *Black chrome solar selective coatings optimized for high temperature applications*. *Solar Energy Materials*, v. 7, n. 2, p. 153-170, 1982.

P.M. DRIVER, R.W. JONES, C.L. RIDDIFORD, R.J. SIMPSON. *Sol. Energy*, 19 (1977), p. 301

PONTE, H. A. *Fundamentos da eletrodeposição: Introdução*. Departamento de Tecnologia Química, Universidade Federal do Paraná, 1999.

RIBEIRO, M. A. J. *Aplicação da avaliação do ciclo de vida na busca de ecoeficiência na fabricação de Paes de forma*. Dissertação de mestrado. Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, CEFET/RJ. 2011.

- ROUMPEDAKIS, TC; VASTA, S.; SAPIENZA, A.; KALLIS, G.; KARELLAS, S.; WITTSTADT, U.; TANNE, M.; HARBORTH, N.; SONNENFELD, U. *Performance Results of a Solar Adsorption Cool and Heating Unit. Energies* 2020, 13, 1630.
- R.H.E. HASSANIEN, M. LI, LIN W. DONG. *Advanced applications of solar energy in agricultural greenhouses. Renew Sustain Energy Rev*, 54 (2016), pp. 989-1001, 10.1016/j.rser.2015.10.095
- R. LONI, E. ASKARI ASLIARDEH, B. GHOBADIAN, A.B. KASAEIAN, S. GORJIAN. *Thermodynamic analysis of a solar dish receiver using different nanofluids. Energy*, 133 (2017), pp. 749-760, 10.1016/j.energy.2017.05.016
- RABAIA, M. K. H., ABDELKAREEM, M. Ali, SAYED, E. T., Khaled Elsaid, Kyu-Jung Chae, Tabbi Wilberforce, A.G. Olabi.(2021). *Environmental impacts of solar energy systems: A review. Science of The Total Environment*, Volume 754, 141989, ISSN 0048-9697, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141989>.
- SANI, E.; MERCATELLI, L.; JANFRANCESCO, D.; SANS, J. L.; SCITI, D. *Ultra-High Temperature Ceramics for solar receivers: spectral and high-temperature emittance characterization. Journal of the European Optical Society-Rapid Publications*, v. 7, article number 12052, 2012.
- SANTOS, J. J. C. S.; PALACIO, J. C. E.; REYES, A. M. M.; CARVALHO, M.; Romero, A.; BARONE, M. A. *Concentrating Solar Power*. In: Imene Yahyaoui. (Org.). *Advances in Renewable Energies and Power Technologies*. 1ed. Amsterdâ: Elsevier, v. 1, p. 373-402, 2018.
- SELVAKUMAR, N.; BARSHILIA, H.C. *Review of physical vapor deposited (PVD) spectrally selective coatings for mid- and high-temperature solar thermal applications. Solar Energy Materials & Solar Cells*, v. 98, p. 1-23, 2012.

- SAIC – Scientific Applications International Corporation. *Life cycle assessment: principles and practice*. Cincinnati (Ohio, USA): National Risk Management Research Laboratory, US Environmental Protection Agency; 2006.
- SANTOS, E. C. et al. *Energia solar na fruticultura irrigada familiar*. Tecnologia & Ciências Agropecuárias. João Pessoa, v.1, n.2, p.1-7, dez. 2007.
- SHAFFER, L.H. *Wavelength-dependent (selective) processes for the utilization of solar energy*. Solar Energy. v. 2, 3–4, p. 21-26, 1958. [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(58\)90050-1](https://doi.org/10.1016/0038-092X(58)90050-1).
- SHEU, H. H.; LU, C. E.; LEE, H. B.; PU, N. W.; WU, P. F.; HSIEH, S. H.; GER, M. D. *Electrodeposition of black chromium–cobalt alloy based on trivalent sulfate electrolyte*. Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers, v. 59, p. 496-505, 2016.
- SILVA NETO, J.F. *Desenvolvimento de Superfícies Seletivas para Coletores Solares com Deposição Multicamadas de Cr e SiO₂*. 2017. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2017.
- SONNEMANN, G.; CASTELLS, F.; SCHUHMACHER, M. *Integrated Life-Cycle and Risk Assessment for Industrial Processes*. Boca Raton: CRC Press, 2003.
- SURVILIENĖ, S.; ČEŠŪNIENĖ, A.; JUŠKĖNAS, R.; SELSKIENĖ, A.; BUČINSKIENĖ, D.; KALINAUSKAS, P.; JUSKEVICIUS, K.; JUREVICIUTE, I. *The use of trivalent chromium bath to obtain a solar selective black chromium coating*. Applied Surface Science, v. 305, p. 492-497, 2014.
- SANTOS JÚNIOR, E. P. *Concentração, polarização e efeito espaço-temporal da bioeletricidade florestal no Brasil (2000 - 2019)*. Dissertação de mestrado. UFPB - João Pessoa, 2020. 186 f.

- SÁNCHEZ-CRUCES, E., BARRERA-CALVA, E., LAVANDEROS, K., & GONZÁLEZ, F. (2014). *Life cycle analysis (lca) of solar selective thin films by electrodeposition and by sol-gel techniques*. Energy Procedia, 57, 2812-2818.
- SATHISH, T. (2020). *Experimental investigation on degradation of heat transfer properties of a black chromium-coated aluminium surface solar collector tube*. International Journal of Ambient Energy, 41(7), 754-758.
- SOUSA, G. C. P. *Avaliação do potencial da ilmenita para produção de superfícies seletivas para coletores solares térmicos*. Dissertação Universidade Federal de Campina Grande, 2019.
- S. GORJIAN, B. GHOBADIAN, HASHJIN T. TAVAKKOLI. *Modeling of solar radiation potential in Iran using artificial neural networks*. J Agric Sci Technol, 17 (2015), pp. 1707-1723
- S. GORJIAN, T. TAVAKKOLI HASHJIN, B. GHOBADIAN, A. BANAKAR. *A thermal performance evaluation of a medium-temperature point-focus solar collector using local Weather data and artificial neural networks*. Int J Green Energy, 12 (2015), pp. 493-505, 10.1080/15435075.2013.848405
- S. GORJIAN, B. GHOBADIAN, T. TAVAKKOLI HASHJIN, A. BANAKAR. *Experimental performance evaluation of a stand-alone point-focus parabolic solar still*. Desalination, 352 (2014), pp. 1-17, 10.1016/j.desal.2014.08.005
- SHIVA GORJIAN, HOSSEIN EBADI, FRANCESCO CALISE, Ashish Shukla, Carlo Ingraio. *A review on recent advancements in performance enhancement techniques for low-temperature solar collectors*, Energy Conversion and Management, Volume 222, 2020, 113246, ISSN 0196-8904, <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113246>.
- SENGUPTA, MANAJIT, HABTE, ARON, WILBERT, STEFAN, GUEYMARD, CHRISTIAN, AND REMUND, JAN. *Best Practices Handbook for the Collection*

and Use of Solar Resource Data for Solar Energy Applications: Third Edition.
United States: N. p., 2021. Web. doi:<https://dx.doi.org/10.2172/1778700>.

SALVI, S. S., BHALLA, V., TAYLOR, R. A., KHULLAR, V., OTANICAR, T. P.,
PHELAN, P. E., & Tyagi, H. (2018). *Technological advances to maximize solar
collector energy output: a review*. Journal of Electronic Packaging, 140(4).

SÁNCHEZ-CRUCES, E.; BARRERA-CALVA, E.; LAVANDEROS, K.; GONZÁLEZ, F.
*Life Cycle Analysis (LCA) of Solar Selective Thin Films by Electrodeposition and by
Sol-gel Techniques*. Energy Procedia, Volume 57, Pages 2812-2818, ISSN 1876-
6102, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.10.314>.

SILVA, G. F.. *Análise de desempenho em empresas de fast fashion com base nas
dimensões TBL com apoio multicritério à decisão*. 2022. 64f. Trabalho de Conclusão
de Curso (Graduação em Engenharia de Produção) - Universidade Federal
Fluminense, Niterói, 2022.

TABOR, H. *Solar collectors, selective surfaces and heat engines*. Proceedings of the
National Academy of Sciences of the United States of America, v. 47, p. 1271–1278,
1961.

TIAN, Y.; ZHAO, C.Y. *A review of solar collectors and thermal energy storage in solar
thermal applications*. Applied energy, v. 104, p. 538-553, 2013.

VASUDEVAN, N.; GRIPS, V. K. W.; RAJAGOPALAN, I. The present status of black
chromium plating. Surface Technology, v. 14, n. 2, p. 119-132, 1981.

VILELA, M. F. *Obtenção de uma superfície Seletiva em Cromo Negro em um substrato de
AISI 304 para conversão térmica da energia solar*. Dissertação de mestrado.
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, UFPB, João Pessoa, 1985.

VILLALVA, M.G.; GAZOLI, J.R. *Energia solar fotovoltaica: conceitos e aplicações*. 1ª
Edição. São Paulo. Editora Érica, 2012.

- WASA, K.; KANNO, I.; KOTERA, H. *Handbook of Sputter Deposition Technology*, 2^a Edição. Reino Unido. Elsevier, 2012.
- WEISS, W.; ROMMEL, M. *Process Heat Collectors: State-of-the-Art Within Task 33/IV, IEA SHC-Task 33 and Solar PACES-Task IV*. Solar Heat for Industrial Processes, 2008.
- YANGWI WU; WEIFENG ZHENG; LIMEI YIN; YAN QU; FACHUN LAI. *Colored solar selective absorbing coatings With metal Ti and dielectricAlN multilayer structure*. *Solar Energy Materials & Solar Cells*. 115, 145-150, 2013.
- Y. CHEN , Z. FAN , Z. ZHANG , W. NIU , C. LI , N. YANG , B. CHEN , H. ZHANG. *Nanomateriais de metal bidimensionais: síntese, propriedades e aplicações*. *Chem. Rev.* , 118 (2018) , pp. 6409 - 6455 , 10,1021 / acs.chemrev.7b00727
- Y. LEI , Y. CUI , Q. HUANG , J. DOU , D. GAN , F. DENG , M. LIU , X. LI , X. ZHANG , Y. WEI. *Preparação fácil de grupos sulfônicos Mxenes funcionalizados para remoção eficiente de azul de metileno*. *Ceram. Int.* , 45 (2019) , pp. 17653 - 17661 , 10.1016 / j.ceramint.2019.05.331
- YOUSIF, K.M.; ABDULGAFAR, S.A. *LoW-Cost Solar Selective Absorbers by Electrodepositing Technique*. Em: Sayigh A. (eds) *Energia renovável e edifícios sustentáveis. Energia renovável inovadora*. Springer, Cham. (2020)
https://doi.org/10.1007/978-3-030-18488-9_25
- XIAO, X.; MIAO, L.; XU, G.; LU, L.; SU, L.; SU, Z.; WANG, N.; TANEMURA, S. A *facile process to prepare copper oxide thin films as solar selective absorbers*. *Applied Surface Science*, v. 257, 2011.
- XU, K., DU, M., HAO, L., MI, J., YU, Q., & LI, S. (2020). *A review of high-temperature selective absorbing coatings for solar thermal applications*. *Journal of Materiomics*, 6(1), 167-182.