



XX ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA E DESENVOLVIMENTO SOCIAL
Construindo uma Engenharia Decolonial para a Soberania Digital e Popular
29 a 31 de outubro de 2025
Campinas - SP, Brasil

Tecnologias digitais e raios X: aprendendo sem separar as misturas

**Alexandre Seidy Ioshisaqui, Universidade Estadual de Campinas,
seidy@dca.fee.unicamp.br**

ARTIGO

EIXO TEMÁTICO: ESTUDOS TECNOLÓGICOS, DESENVOLVIMENTO E SOCIEDADE

RESUMO

Partindo de uma perspectiva que compreende a existência de sistemas técnicos como resultantes de processos misturados, este trabalho apresenta um experimento sobre formas de conseguir realizar perguntas mistas sobre as tecnologias digitais, tentando evitar dicotomias que posicionem as perguntas fora ou dentro da tecnologia digital. O artigo trata um caso típico de laboratórios de física: Imageamento Difractivo Coerente (IDC), método que surge de uma combinação de conhecimentos e práticas dos campos da Física, da Matemática e da Computação. Após uma abreviada passagem descritiva deste campo, propõe-se que é possível renovar e aprofundar a atenção às complexas relações que ocorrem num campo como esse, observando-o a partir de pontos-chave. Este trabalho apresenta resultados parciais de uma pesquisa ainda em desenvolvimento.

PALAVRAS-CHAVE: Tecnologias digitais. Filosofia da tecnologia. Sociotécnica. Tecnopolítica.



XX ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA E DESENVOLVIMENTO SOCIAL
Construindo uma Engenharia Decolonial para a Soberania Digital e Popular
29 a 31 de outubro de 2025
Campinas - SP, Brasil

APRESENTAÇÃO

Uma das dificuldades que atravessam as pessoas que atuam na aproximação das disciplinas tecnológicas das disciplinas sociais é a angustiante e constante lição de que, se por um lado não podemos confiar em nenhuma neutralidade tecnológica, por outro também não podemos cair nas narrativas que colocam sistemas técnicos como entidades capazes de total autonomia e controle sobre o mundo (Simondon, 2020b). No caso das tecnologias digitais, percebemos de forma cada vez mais nítida os efeitos no mundo social dos quais estes sistemas participam (Lippold; Faustino, 2022; Silva, 2021).

De alguma maneira, para termos chance de responder à dicotomia entre narrativas de neutralidade e de dominação total por sistemas técnicos, parece necessário reconhecermos simultaneamente uma participação e uma dependência desses sistemas técnicos em relação à vida social. Esses aspectos da vida passam a ser melhor descritos como sociotécnicos ou tecnopolíticos (Iasulaitis; Silveira, 2025). Temos melhores chances de entender tais processos se acompanharmos as tramas de imbricamentos que configuram situações de propriedades simultaneamente humanas e não-humanas, condição denominada híbrida por Latour (2001).

Partindo dessa perspectiva, começo a apresentar minha pesquisa como resultante de desdobramentos que partiram das seguintes perguntas motivadoras: como, então, entender a prática de desenvolvimento tecnológico – as atividades todas que praticamos nas engenharias, atividades pelas quais nos formamos profissionalmente – com essa perspectiva? Especificamente, como entendemos o estatuto de nossa participação num dado processo se ele todo é misturado?

Assim, penso minha pesquisa como um esforço crítico reflexivo sobre meu campo de formação profissional e acadêmica, o campo de processamento digital de sinais, buscando acompanhar os imbricamentos e desdobramentos de pesquisa e desenvolvimento de tecnologia num recorte da área delimitado a um processo



XX ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA E DESENVOLVIMENTO SOCIAL
Construindo uma Engenharia Decolonial para a Soberania Digital e Popular
29 a 31 de outubro de 2025
Campinas - SP, Brasil

específico. A escolha deste processo específico demanda uma breve explicação. Escolho como processo a ser estudado a prática de Imageamento Difractivo Coerente (IDC), procedimento tipicamente desenvolvido e utilizado em laboratórios de física que possuam a infraestrutura capaz de produzir fluxos de raios X com as devidas e requeridas propriedades físicas. Além da familiaridade geral ao ambiente e problemática do campo, devida a experiência profissional prévia, conto como motivação da escolha deste processo o fato de que, como pretendo demonstrar, acompanhar o funcionamento e os desdobramentos técnicos cruciais do IDC frustra tentativas de separar as contribuições entre disciplinas de maneira definitiva e simples. Uma compreensão precisa tanto histórica quanto técnica do desenvolvimento das configurações físicas e dos algoritmos de IDC demanda um entendimento misto e composto de diferentes disciplinas da Física, da Matemática e das Engenharias.

Apesar disso, ainda pretendo encontrar maneiras de realizar perguntas sobre a participação do desenvolvimento de tecnologias digitais num processo que não pode ser facilmente desvinculado dos fatores com os quais compõem sistema. Não realizo isso como um esforço de separar a tecnologia digital de sua existência concreta misturada, mas sim como maneira de exercitar um modo de pesquisa que busca estratégias para conseguir acompanhar como se materializam tecnologias digitais dentro dessas misturas. Neste artigo, fruto de resultados parciais e provisórios de minha pesquisa em andamento, apresento uma forma de descrição inspirada pelo pensamento que enfatiza a realidade relacional e reticular (Combes, 2013; Simondon, 2020a, 2020b) como a maneira que encontro de atender à tarefa de seguir o processo do desenvolvimento das técnicas de IDC em mistura.

Todos os textos relacionados à área de Imageamento Difractivo Coerente foram acessados na língua inglesa. Ao longo do texto, apresento todas as citações através de traduções próprias.



XX ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA E DESENVOLVIMENTO SOCIAL
Construindo uma Engenharia Decolonial para a Soberania Digital e Popular
29 a 31 de outubro de 2025
Campinas - SP, Brasil

PESQUISA EM ANDAMENTO: BUSCANDO MANEIRAS DE APRENDER SOBRE O DIGITAL EM MISTURA

Breve passagem pelo desenvolvimento das práticas de Imageamento Difractivo Coerente

Começamos a mitigar o estranhamento ao tema – que se encontra associado ao peculiar campo da instrumentação de laboratórios de luz síncrotron – mediando algumas definições dadas por artigos científicos do próprio campo. O Imageamento Difractivo Coerente (IDC) é descrito como uma “família de técnicas de produção de imagens onde a resolução final deixa de ser limitada pela qualidade dos componentes óticos e passa a ser limitada pelos comprimentos de onda da radiação e do tamanho do detector” (Tonin et al., 2024, p. 1). De imediato, isto significa que não se trata de um tipo de configuração com o qual podemos ter maior familiaridade, como a fotografia ou a microscopia. Nestas últimas, as imagens são tipicamente obtidas através da radiação (em geral a luz visível) sendo refletida nas superfícies do objeto a ser observado e passando por configurações de espelhos e lentes que preparam a formação de imagem ótica para ser registrada num filme ou um detector eletrônico-digital de fótons de área (daqui em diante, me refiro apenas por detector). Em contraste, no IDC as radiações (raios X) atravessam os objetos, tendo suas trajetórias espalhadas (devido à difração) antes de incidirem sobre o detector.

Outra descrição define o IDC como o campo formado pela “combinação de difração de raios X, sobreamostragem e recuperação de fase” (Shechtman et al., 2015, p. 89). Esta descrição listada, ainda que possa parecer desconjuntada à primeira vista, nos ajuda a entender o conjunto. Começando pela região dos raios X, sua escolha tem a ver com alguns fatores. Um fator é o de que o IDC tem a resolução das imagens que produz associada ao comprimento de onda que utiliza para incidir sobre as amostras – os raios X estão na região entre 0,01 e 10 nanômetros, portanto podem alcançar uma escala comparável àquela dos átomos ou das moléculas. Outro fator notável é o de que “raios X são muito menos absorvidos pela matéria do que a luz visível”, o que



XX ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA E DESENVOLVIMENTO SOCIAL
Construindo uma Engenharia Decolonial para a Soberania Digital e Popular
29 a 31 de outubro de 2025
Campinas - SP, Brasil

resulta, no caso de ondas coerentes, na situação onde “efeitos de múltiplo-espalhamento, que na luz visível frequentemente dominam, são majoritariamente suprimidas”, assim ajudando a “extrair dos padrões de difração as estruturas dos objetos” (Veen; Pfeiffer, 2004, p. 5004).

Para limitar o escopo deste texto, não apresentarei as questões relacionadas à sobreamostragem. Mas antes de chegar ao problema da recuperação de fase, é importante tratar sobre a coerência da radiação. A coerência das ondas se refere, grosso modo, à correlação das ondas a si próprias. Ondas com alto grau de coerência se mantêm correlacionadas, mantendo interferências construtivas, enquanto ondas com baixo grau de coerência passam a se defasar e eventualmente interferir destrutivamente. Tais ondas podem ser produzidas por filtragem espacial “posicionando fendas ou furos ao longo do caminho do feixe” e por filtragem temporal “extraindo uma pequena faixa de comprimento de onda usando um monocromador” (Veen; Pfeiffer, 2004, p. 5003). Mas, para o contexto do IDC, tipicamente as fontes de raios X coerentes utilizadas são geradores de radiação síncrotron (Veen; Pfeiffer, 2004; Guizar-Sicairos; Thibault, 2021; Tonin et al., 2024). Como mencionado acima, os padrões de difração produzidos por raios X coerentes são melhores de serem recuperados do que a luz visível coerente. Em contrapartida, no caso da difração de feixes incoerentes isto seria impossível uma vez que “as fases das ondas espalhadas de diferentes partes do objeto não podem ser recuperadas do padrão de intensidades difratados” (Veen; Pfeiffer, 2004, p. 5011).

A disposição de uma configuração básica de IDC pode ser visualizada na Figura 1. Nela vemos ilustrado um feixe de raios X (volume azul vindo da esquerda para a direita) que atravessa a amostra e se espalha, formando um padrão de difração na superfície plana do detector (à direita). Aqui podemos começar a enxergar o problema da recuperação de fase: os padrões de difração não são imagens diretas sobre as amostras que queremos observar. Portanto, devemos encontrar alguma maneira de aproveitar e transformar esse padrão de difração (campo distante do feixe espalhado) numa imagem que corresponda à forma de onda que sai do plano imediatamente



XX ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA E DESENVOLVIMENTO SOCIAL
Construindo uma Engenharia Decolonial para a Soberania Digital e Popular
29 a 31 de outubro de 2025
Campinas - SP, Brasil

próximo à amostra (campo próximo do feixe espalhado). Para complicar a situação, o fator que traz a maior complexidade ao problema se deve ao fato de que, de maneira geral, “dispositivos óticos que dependem da conversão de fótons em elétrons (corrente) não permitem o registro da fase” devido ao fato de que não existem dispositivos que acompanhem as frequências dos campos eletromagnéticos. O que de fato os sistemas de detecção medem é “o fluxo de fótons, que é proporcional ao quadrado da magnitude do campo, não a fase” (Shechtman et al., 2015, p. 87).

O problema da recuperação de fase, então, consiste justamente na “recuperação de uma função [complexa] dadas as magnitudes de sua transformada de Fourier” (Shechtman et al., 2015, p. 87). Convenientemente, a situação é precisamente a de que campos eletromagnéticos têm a propriedade de que “seu campo distante corresponde à transformada de Fourier de seu campo próximo” (Shechtman et al., 2015, p.. 87). Esta conveniência na verdade deve apontar para o caso de que esta possibilidade de recuperação no contexto físico é informada pela constatação dessa mesma propriedade no contexto matemático.

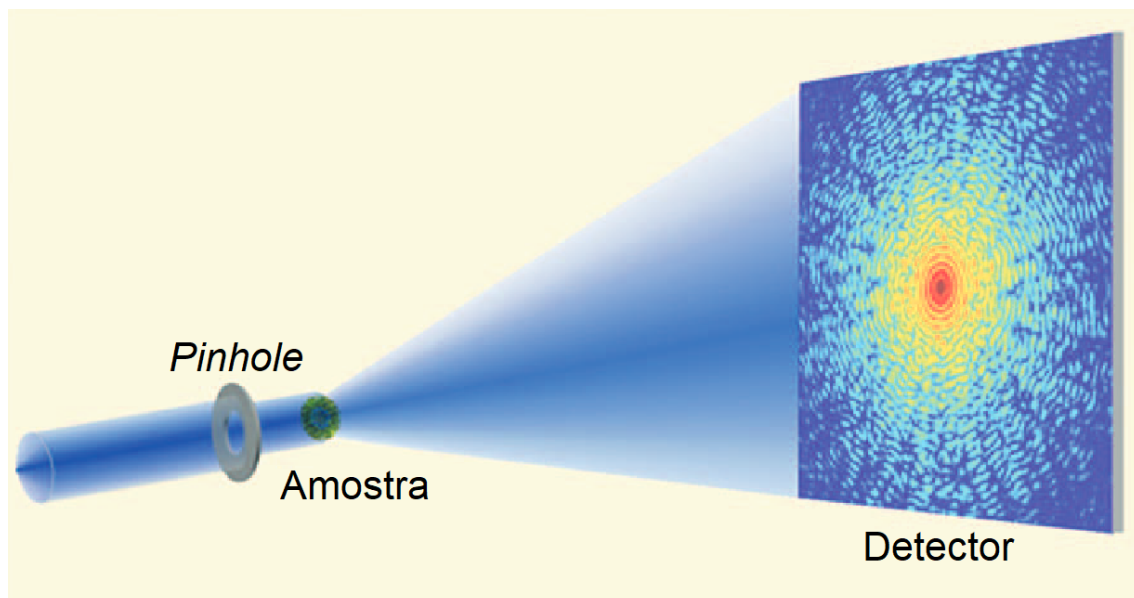


Figura 1. Configuração básica de Imageamento Difractivo Coerente. O feixe de raios X é indicado pelo volume azul que vem da esquerda para a direita, passando pelo *pinhole* (furo) que limita o perfil do feixe. Em seguida o feixe incide sobre a amostra e é espalhado, produzindo um padrão de difração na superfície plana do detector. (Imagem alterada. Original em Miao et al. (2015)).



XX ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA E DESENVOLVIMENTO SOCIAL
Construindo uma Engenharia Decolonial para a Soberania Digital e Popular
29 a 31 de outubro de 2025
Campinas - SP, Brasil

É importante destacar que esta é apenas a descrição de uma versão básica, de referência. De maneira geral o problema da recuperação de fase na ótica “é bem mais amplo e inclui outras configurações físicas que naturalmente se traduzem em problemas de processamento de sinais que são diferentes da formulação padrão de recuperação de fase” (Shechtman et al., 2015, p. 103). Interessantemente, um importante desenvolvimento técnico do IDC ocorreu através de uma interação com outro campo próximo: a pticografia. Hoje considerada uma versão de “IDC por escaneamento” (Shechtman et al., 2015, p. 104), a pticografia traz outra trajetória de desenvolvimento de metodologias e configurações físicas, mas compartilha uma mesma tarefa crucial: a recuperação de fase. Uma diferença que a pticografia possui, que foi combinada ao IDC em algumas de suas variações, é o procedimento alternativo da pticografia para a recuperação de fase, que “desacopla as contribuições do objeto e do feixe, assim permitindo que cada um seja reconstruído separadamente” (Guizar-Sicairos; Thibault, 2021, p. 45). Isto, na prática, significa um “aumento na robustez” devido à “redundância de medições obtidas através do escaneamento da amostra”, tornando o problema da recuperação de fase “matematicamente melhor posto” e eliminando “a necessidade de uma frente de onda completamente coerente e limpa” (Tonin et al., 2024, p. 1). A combinação entre essas diferentes configurações experimentais alterou o conjunto de requisitos de instalação física (acerca das condições dos feixes) e criou outras necessidades relacionadas ao desenvolvimento de algoritmos e à computação de alto desempenho (Shechtman et al., 2015; Tonin et al., 2024).

Reconhecendo um ponto-chave: a recuperação de fase

Como podemos perceber ao acompanharmos os imbricamentos e desdobramentos de uma sucinta história do IDC, a recuperação de fase não é um operação fixa, não conserva esquemas de ação estáticos de um caso para outro. Ela não acontece da mesma maneira em diferentes configurações físicas, como fica evidente pela diferença entre o “IDC tradicional” e o “IDC por escaneamento” (pticográfico). Ainda assim, há um sentido compartilhado da operação mesmo que as



XX ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA E DESENVOLVIMENTO SOCIAL
Construindo uma Engenharia Decolonial para a Soberania Digital e Popular
29 a 31 de outubro de 2025
Campinas - SP, Brasil

instâncias sejam diferentes. O próprio campo de IDC reconhece sua importância e organiza trabalhos de pesquisa e desenvolvimento em torno da operação de recuperação de fase, sob o termo “problema da recuperação de fase”.

Mais do que uma escolha meramente discursiva e arbitrária por parte de cientistas do campo, a operação da recuperação de fase pode ser percebida, segundo um acompanhamento próximo dos imbricamentos e desdobramentos do campo, como um ponto-chave relacional, isto é, um ponto que nos dá vantagem para conseguir perceber e descrever dinâmicas de estruturação dessa tecnologia. Através desta operação conseguimos ver coisas bastante distintas ganharem, na prática, sentidos convergentes: os raios X difratados, as descrições matemáticas baseadas na transformada de Fourier e os sinais digitais captados e processados por circuitos e algoritmos são tratados como uma imagem de conteúdo incompleto, o padrão de difração, mas que pode servir de base para produzir um resultado mais completo, segundo todo o trabalho deste campo que se configura como IDC.

Informando novas perguntas

Como comentei na seção inicial, penso esta pesquisa como uma busca experimental por maneiras para pensar sobre tecnologias digitais em processos cuja existência material nos demande atenção à sua existência inseparável dos outros fatores com os quais compõem sistemas concretos. Acompanhando os movimentos que dão constituição à prática de IDC, ressalto trechos dos desdobramentos técnicos que dão vislumbres sobre como o IDC possui uma dinâmica entrelaçada entre métodos computacionais e configurações físicas e depois focalizo minha atenção na operação da recuperação de fase, reconhecendo-a como um ponto-chave no processo de desenvolvimento do IDC.

A operação da recuperação de fase não é uma mera etapa fixa, reproduzida sem diferenças em cada configuração laboratorial. Pelo contrário, ela parece ser um dos fatores cruciais de dinamismo desse campo que busca produzir imagens de objetos em escala nanométrica usando padrões de difração de raios X. Ela confronta físicos e



XX ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA E DESENVOLVIMENTO SOCIAL
Construindo uma Engenharia Decolonial para a Soberania Digital e Popular
29 a 31 de outubro de 2025
Campinas - SP, Brasil

matemáticos com limites teóricos e práticos, motiva a construção de configurações físicas e tem estimulado o desenvolvimento de ferramentas computacionais e metodologias de processamento digital de sinais. Tudo isso de uma maneira profundamente entrelaçada.

O ponto em que chego neste trabalho não é o de encontrar respostas ou interpretações conclusivas. Antes, penso que um dos maiores ganhos vem da capacidade de formular novas perguntas como consequência de ter acompanhado o processo de desenvolvimento do IDC e ter reconhecido uma de suas operações cruciais, a recuperação de fase. Passamos a entender a operação da recuperação de fase como algo que, na prática, existe como um nó relacional entre os raios X difratados, a formulação da imagem baseada na transformada de Fourier e os sinais eletrônico-digitais captados pelos sensores. Tal compreensão, que ressoa com a noção reticular de existência de Simondon (Combes, 2013; Simondon, 2020a, 2020b), propicia novas perguntas, agora informadas por um conhecimento atualizado sobre a rede de relações que se configura no desenvolvimento técnico da IDC.

Para além de pensar sobre a crucialidade da recuperação de fase no desenvolvimento do IDC, penso que seja importante manter a curiosidade aberta ao que poderia já ter sido como dado: por que o IDC veio a se concretizar dessa maneira? Que outras relações fazem parte da concretização do IDC? Além de abrir perguntas sobre quais outras configurações teriam sido possíveis, antes conseguimos perguntar sobre como esta rede de relações pode ser ainda mais vasta. Se adicionássemos apenas a distinção entre materiais cristalinos e não-cristalinos, multiplicaríamos vastamente a complexidade da rede descritiva, uma vez que diversas interrelações entre todos os componentes precisariam ser revisitadas. Mas ao considerar a distinção cristalino/não-cristalino poderíamos vislucrar certos efeitos diferenciais: esta pode ser considerada uma das linhas distintivas das técnicas de IDC em relação às técnicas da cristalografia de raios X (Miao et al., 2015). O que seria essa diferença, entre materiais cristalinos e não-cristalinos, que faz a diferença entre o IDC e a cristalografia? Que outras redes de variáveis relacionadas a estes materiais poderíamos passar a



XX ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA E DESENVOLVIMENTO SOCIAL
Construindo uma Engenharia Decolonial para a Soberania Digital e Popular
29 a 31 de outubro de 2025
Campinas - SP, Brasil

considerar na concretização do IDC?

Essas questões são informadas pela compreensão da recuperação de fase como uma operação crucial que concretiza, na prática, a articulação de conhecimentos matemáticos, a construção das configurações experimentais físicas, a formulação de procedimentos computacionais e possíveis outras relações que ainda não puderam ser apreendidas. Penso que essas questões sejam úteis, menos para serem encerradas por respostas finalizantes e mais para nos permitir a continuar seguindo sua estruturação reticular.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho, evitei uma exposição aprofundada sobre os funcionamentos do imageamento difrativo coerente ou ainda um levantamento extenso sobre a história documentada deste campo de atuação. Em vez disso, compartilhei um atalho, uma trilha que pude traçar depois de algumas caminhadas sem rumo pelo meu objeto de estudo. O caminho resultante foi aquele que melhor respondeu à minha motivação inicial: acompanhar os imbricamentos e desdobramentos de um processo, buscando reconhecer e descrever os principais momentos de tensão e resolução que animam o processo.

Me debruçando sobre artigos que registram a história e os funcionamentos do campo de IDC, reconheci uma operação crucial dentro do processo de desenvolvimento: a recuperação de fase. Desenvolvo a concepção de que a recuperação de fase é um ponto-chave, isto é, um ponto importante que nos dá vantagem para conseguir descrever um momento onde diferentes realidades são convergentes, movimento que produz a compreensão de que o padrão de difração é uma imagem incompleta, motivando a tarefa técnica da recuperação de fase. E, finalmente, discorro sobre as possibilidades de abrir novas perguntas, na perspectiva de continuidade dessas descrições reticulares.

Por fim, que parte o processamento digital de sinais toma na recuperação das fases? Se não pudesse considerar os campos em relação, estaria limitado a pensar em



XX ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA E DESENVOLVIMENTO SOCIAL
Construindo uma Engenharia Decolonial para a Soberania Digital e Popular
29 a 31 de outubro de 2025
Campinas - SP, Brasil

termos que tendem a isolar o campo: teorema da amostragem de Nyquist, transformada de Fourier, formulação de algoritmos de reconstrução de imagens ou a implementação de programas de otimização matemática seriam alguns dos pontos de partida. No entanto, como busquei tornar evidente, ao longo da história dos desdobramentos técnicos do campo, sempre existiu uma dinâmica muito emaranhada entre a montagem de diferentes configurações físicas e a proposição de diferentes métodos de processamento digital de sinais. Dinâmica essa que não pode ser reduzida a um dos lados determinando o outro. As possibilidades pelas quais me interesso a partir daqui são no sentido de poder ver o processamento digital de sinais como campo de atuação sempre participando de relações no mundo, na forma de sistemas e processos concretos.

REFERÊNCIAS

- COMBES, Muriel. **Gilbert Simondon and the philosophy of the transindividual**. Cambridge, Mass: MIT Press, 2013.
- GUIZAR-SICAÍROS, Manuel; THIBAUT, Pierre. Ptychography: A solution to the phase problem. **Physics Today**, v. 74, n. 9, p. 42–48, 1 set. 2021.
- IASULAITIS, Sylvia; SILVEIRA, Sérgio Amadeu da (ORGS.). **Estudos Sociopolíticos da Inteligência Artificial**. Campina Grande, PB: Eduepb, 2025.
- LATOUR, Bruno. Um coletivo de humanos e não-humanos: No labirinto de Dédalo. *In*: **A Esperança De Pandora**. [S.l.]: Edusc - Editora Universidade Do Sagrado Coração, 2001.
- LIPPOLD, Walter; FAUSTINO, Deivison. Colonialismo digital, racismo e acumulação primitiva de dados. **Germinal: marxismo e educação em debate**, v. 14, n. 2, p. 56–78, 7 out. 2022.
- MIAO, Jianwei *et al.* Beyond crystallography: Diffractive imaging using coherent x-ray light sources. **Science**, v. 348, n. 6234, p. 530–535, maio 2015.
- SHECHTMAN, Yoav *et al.* Phase Retrieval with Application to Optical Imaging: A contemporary overview. **IEEE Signal Processing Magazine**, v. 32, n. 3, p. 87–109, maio 2015.
- SILVA, Tarcízio. **Racismo algorítmico**. São Paulo, SP: Sesc Sp, 2021.
- SIMONDON, Gilbert. **A Individuação à Luz das Noções de Forma e de Informação**. 1. ed. [S.l.]: Editora 34, 2020a.
- SIMONDON, Gilbert. **Do modo de existência dos objetos técnicos**. [S.l.]: Contraponto, 2020b.



XX ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA E DESENVOLVIMENTO SOCIAL
Construindo uma Engenharia Decolonial para a Soberania Digital e Popular
29 a 31 de outubro de 2025
Campinas - SP, Brasil

TONIN, Yuri Rossi *et al.* ssc-cdi: A Memory-Efficient, Multi-GPU Package for Ptychography with Extreme Data. **Journal of Imaging**, v. 10, n. 11, p. 286, nov. 2024.

VEEN, Friso Van Der; PFEIFFER, Franz. Coherent x-ray scattering. **Journal of Physics: Condensed Matter**, v. 16, n. 28, p. 5003–5030, 21 jul. 2004.