

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
CÂMPUS EXPERIMENTAL DE SÃO JOÃO DA BOA VISTA
BACHARELADO EM ENGENHARIA ELETRÔNICA E DE TELECOMUNICAÇÕES

AMANDA BELCHIOR PEREIRA

AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS AMBIENTAIS DE UM AMPLIFICADOR ÓPTICO EDFA
POR MEIO DA ACV: ESTUDO SOBRE A FASE DE USO E CONSUMO ENERGÉTICO

SÃO JOÃO DA BOA VISTA

2021

AMANDA BELCHIOR PEREIRA

AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS AMBIENTAIS DE UM AMPLIFICADOR ÓPTICO EDFA
POR MEIO DA ACV: ESTUDO SOBRE A FASE DE USO E CONSUMO ENERGÉTICO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”
como requisito para obtenção de título de Bacharel em
Engenharia Eletrônica e de Telecomunicações

Orientador: Prof. Dr. Ivan Aritz Aldaya Garde

SÃO JOÃO DA BOA VISTA

2021

P436a

Pereira, Amanda Belchior

Avaliação dos impactos ambientais de um amplificador óptico EDFA por meio da ACV : estudo sobre a fase de uso e consumo energético / Amanda Belchior Pereira. -- São João da Boa Vista, 2021
34 p. : il., tabs.

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Engenharia de Telecomunicações) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Câmpus Experimental de São João da Boa Vista, São João da Boa Vista

Orientador: Ivan Aritz Aldaya Garde

1. Ciclo de vida do produto. 2. Comunicações ópticas. 3. Óptica. 4. Telecomunicações. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca do Câmpus Experimental de São João da Boa Vista. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
CÂMPUS EXPERIMENTAL DE SÃO JOÃO DA BOA VISTA
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELETRÔNICA E DE TELECOMUNICAÇÕES

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS AMBIENTAIS DE UM AMPLIFICADOR ÓPTICO
EDFA POR MEIO DA ACV: ESTUDO SOBRE A FASE DE USO E CONSUMO
ENERGÉTICO**

Aluna: Amanda Belchior Pereira
Orientador: Prof. Dr. Ivan Aritz Aldaya Garde

Banca Examinadora:

- Ivan Aritz Aldaya Garde (Orientador)
- José Augusto de Oliveira (Examinador)
- Mirian Paula dos Santos (Examinadora)

A ata da defesa com as respectivas assinaturas dos membros encontra-se no prontuário do aluno (Expediente nº 013/2020)
--

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus que me guiou, que me abençoou e sempre esteve ao meu lado em todos estes anos de graduação. Agradeço a todos os meus familiares, principalmente aos meus pais, Marisa Belchior Pereira e Luis Roberto Pereira que me apoiaram desde o início, do ingresso na faculdade até agora, me ajudando, me apoiando nos momentos difíceis e me dando forças, viabilizando meu estudo para que eu chegasse até aqui.

Agradeço ao meu companheiro Daniel de Paiva Mucin que também se fez presente em toda minha graduação, com seu apoio, ajuda e paciência. Agradeço aos meus amigos Letícia Dal'Col Vilela, Ana Letícia Coradi, Leonardo Marques Pereira Peres, Gabriela Cristina Kenedi Prestes, Débora Beatriz Claro Zanitti, Julia Danielli Duarte, Thais Tavares, Welder Perina e todos os outros colegas que comigo estiveram em todos os momentos, por todos estes anos de parceria e amizade.

Agradeço ao meu orientador Ivan Aritz Aldaya Garde por toda ajuda, dedicação e paciência para elaboração deste trabalho. Agradeço à banca examinadora José Augusto de Oliveira e Mirian Paula dos Santos pela participação e contribuição. Agradeço a UNESP-Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” campus de São João da Boa Vista, à todos os professores e funcionários pelo empenho e dedicação para minha formação e de todos os alunos, vocês são parte fundamental de minha história.

“Terei sempre apego pelo que vale a pena e desapego pelo que não quer valer. Não sei viver de mentira. Sou sempre eu mesma, mas com certeza não serei a mesma para sempre.”

Clarice Lispector

RESUMO

Este projeto de pesquisa visa avaliar os respectivos impactos ambientais causados pela fase de uso de um amplificador óptico à fibra dopada com érbio (do inglês Erbium Doped Fiber Amplifiers, EDFA) utilizando a matriz energética brasileira, ou seja, hidroelétrica. Primeiramente, foi proposto uma unidade funcional para EDFAs para posteriormente, avaliar os impactos ambientais deste dispositivo na sua etapa de uso. Por meio da aplicação da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) e com base na ISO 14040 (2009), foram identificados os principais impactos ambientais causados na fase de utilização do amplificador óptico e quantificá-los em função da potência consumida, bem como as diferenças na potência consumida nos diferentes amplificadores EDFA do mercado. As principais contribuições deste trabalho é a identificação da potência agregada por canal como unidade funcional para o objeto de pesquisa e a quantização do consumo energético do amplificador óptico, de forma a avaliar os impactos ambientais utilizando os métodos CML 2001, Environmental Footprint 2.0, ReCipe 2016 e TRACI.

Palavras-chave: Amplificador EDFA, comunicações ópticas, avaliação do ciclo de vida.

ABSTRACT / RESUMEN

This research project aims to evaluate the respective environmental impacts caused by the phase of using an optical amplifier to erbium-doped fiber (EDFA) using the Brazilian energy matrix, that is, hydroelectric. First, a functional unit for EDFAs was proposed to later assess the environmental impacts of this device in its use stage. Through the application of Life Cycle Assessment (LCA) and based on ISO 14040 (2009), the main environmental impacts caused in the phase of use of the optical amplifier were identified and quantified according to the power consumed, as well as the differences in the power consumed in the different EDFA amplifiers on the market. The main contributions of this work are the identification of the aggregate power per channel as a functional unit for the research object and the quantification of the energy consumption of the optical amplifier, in order to assess the environmental impacts using the methods CML 2001, Environmental Footprint 2.0, ReCipe 2016 and TRACI.

Keywords: EDFA amplifier, optical communications, life cycle assessment.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1:Três aplicações para amplificadores ópticos: (a)amplificadores em linha; (b) como um reforço de potência para o transmissor; (c) como pré-amplificador.....	3
FIGURA 2: Ganho de pequeno sinal em função da (a) potência de bombeio e (b) comprimento do amplificador para um EDFA utilizando comprimento de onda a 1,48 μm	7
FIGURA 3: Relação de potência consumida pelo ganho de um amplificador EDFA.....	17
FIGURA 4: Relação de potência consumida por potência máxima de saída de um amplificador EDFA.....	18
FIGURA 5: Potenciais de Impacto segundo CML 2001.....	19
FIGURA 6: Potenciais de Impacto segundo Environmental Footprint 2.0.....	19
FIGURA 7: Potenciais de Impacto segundo ReCipe 2016.....	19
FIGURA 8: Potenciais de Impacto segundo TRACI.....	20

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

ACV – Avaliação do Ciclo de Vida

CEN – European Comite for Standardization

CFC - Clorofluorcarboneto

EDFA – Amplificadores Ópticos de Fibra dopada com Érbio

FP – Fabry Perot

HCFC - Hidroclorofluorcarboneto

ISO – International Organization for Standardization

ODP – Depleção da Camda de Ozônio

ONU – Organização das Nações Unidas

PDL – Perda Dependente da Polarização

PMD – Dispersão por Modo de Polarização

SOA – Amplificadores Ópticos de Semicondutores

TW – Traveling Wave

UV – Ultravioleta

UVB – Ultravioleta B

WDM - Wavelength-division Multiplex

SUMÁRIO

1 OBJETIVOS	1
2 MOTIVAÇÃO E CONTRIBUIÇÕES	1
3 INTRODUÇÃO	2
4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	2
4.1. Amplificadores ópticos	2
4.1.1 Amplificadores ópticos semicondutores	4
4.1.2 Amplificadores ópticos Raman	5
4.1.3 Amplificadores ópticos EDFA	6
4.1.4 Comparação entre os amplificadores EDFA, Raman e semicondutores	7
4.2 Gestão Ambiental	9
4.2.1 Avaliação do ciclo de vida	10
5 METODOLOGIA	14
6 RESULTADOS E DISCUSSÃO	16
7 CONSIDERAÇÕES FINAIS	22
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	24

1. OBJETIVO

Este trabalho tem como foco o estudo do consumo energético de amplificadores ópticos com fibras dopadas com érbio (EDFA), bem como a avaliação dos impactos ambientais causados durante a sua fase de uso. Neste estudo foram obtidos impactos ambientais baseados em dados obtidos de distintos amplificadores encontrados no mercado. O conhecimento sobre o consumo energético dos EDFAs pode ajudar a direcionar estudos sobre os seus impactos ambientais e propor soluções para projetar redes com um impacto reduzido. Foi proposto uma métrica dependente da potência de consumo para que fosse possível a obtenção dos impactos ambientais do amplificador.

2. MOTIVAÇÃO E CONTRIBUIÇÕES

Existem poucos trabalhos na literatura sobre Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) no setor de telecomunicações, o que demonstra a necessidade no conhecimento sobre esses dados. Utilizando a técnica da ACV, é possível avaliar o desempenho ambiental do produto ao longo das diferentes fases de seu ciclo de vida. Deste modo, pela definição do sistema de produto com a fase de uso dos amplificadores EDFAs será possível utilizar a ACV para identificar os impactos ambientais em função da matriz energética brasileira. Com tais informações, as empresas poderão realizar análises e estudos a fim de propor soluções para a diminuição de tais impactos ambientais decorrentes do alto consumo energético dos EDFAs, considerando os impactos tanto na etapa de projeto do produto como em operações de redes. Considerando o crescimento do consumo energético dos sistemas de comunicações, é importante que se tenha conhecimento dos impactos ambientais causados por produtos do setor de telecomunicações em sua fase de uso na qual concentra-se o maior período de sua vida útil.

Pereira *et. al* (2018) realizou uma revisão bibliográfica sistemática, a fim de encontrar pesquisas e artigos sobre a técnica da ACV que estivessem relacionados com o setor de telecomunicações. O total de artigos encontrados por Pereira (2018) foi 47, na qual apenas dois se utilizavam da técnica da ACV. Tan (2005) analisou o ciclo de vida de um *smartphone* pela abordagem do berço ao túmulo (*cradle to grave*) que por meio do estudo dos impactos ambientais, foi possível propor soluções por meio de mudanças no inventário do produto, por exemplo. Doolan *et. al.* (2014) utilizou a abordagem de estudo do túmulo ao túmulo (*grave to grave*) e sua pesquisa demonstrou a grande importância para reduzir os impactos ambientais

provenientes de sedimentos produzidos por meio da reciclagem de *smartphones* em alguns países.

Ressalta-se que não foram encontrados artigos que utilizassem a prática da ACV aplicado a comunicações ópticas, especificamente, o que reforça a importância deste atual trabalho, bem como a necessidade da introdução cada vez mais frequente da ACV neste setor. Deste modo, técnicas como a ACV tem potencial de se tornar uma aliada da indústria e de cientistas que buscam quantificar os impactos ambientais causados pelos produtos e serviços no setor de telecomunicações para assim, prover melhorias, inovações e soluções que sejam menos nocivas ao planeta e ao mesmo tempo economicamente viáveis.

3. INTRODUÇÃO

Faz-se uso comumente de amplificadores que são utilizados principalmente em enlaces de média e longa distância compensando as perdas ao longo de um sistema óptico de modo que o sinal possa chegar ao receptor com a qualidade necessária. Os amplificadores ópticos tem como objetivo regenerar simultaneamente os diferentes sinais transmitidos que sofrem a atenuação das fibras.

Conhecer o consumo energético da fase de uso de um amplificador óptico é relevante, pois será possível conhecer não só as potências consumidas destes aparelhos, mas também descobrir os impactos ambientais causados por eles em sua principal fase de vida, e portanto, propor melhoria para o projeto do produto, bem como das operações de redes de telecomunicações.

Este estudo visa avaliar os efeitos do consumo de energia de amplificadores ópticos EDFA. Foi proposto uma unidade funcional adequada que permita a comparação dos impactos ambientais associados ao consumo energético do mesmo. A ACV é uma das principais técnicas para avaliação dos impactos ambientais durante o ciclo de vida de um produto, considerando todas as suas fases (UNEP, 2007). Com os resultados da aplicação da ACV torna-se viável a obtenção de informações necessárias que influenciam em um processo de tomada de decisão mais consciente e sustentável no âmbito ambiental.

4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1. Amplificadores Ópticos

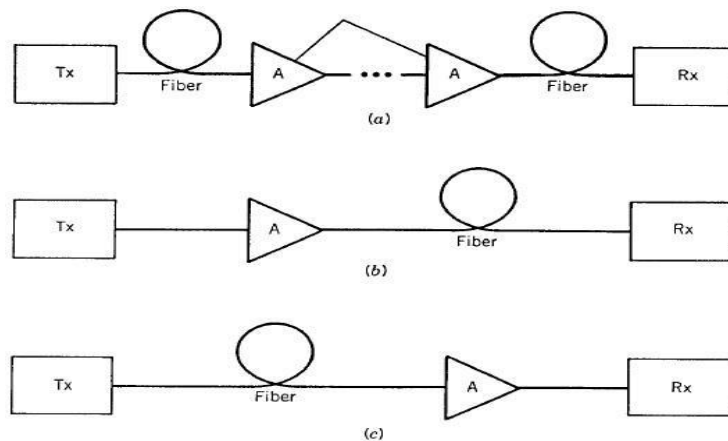
Os amplificadores ópticos são amplamente utilizados em enlaces ópticos para

compensar as perdas do sinal causadas pela transmissão por fibra em enlaces de médias e longas distâncias. Dessa forma, os amplificadores ópticos tornaram-se componentes críticos dos sistemas de comunicações de longa distancia modernos, representando a principal fonte de consumo nestes sistemas até hoje, pois além do custo benefício, não se necessita do uso de regeneradores no enlace nem conversões elétrico-ópticos, fazendo com que os amplificadores ópticos sejam essenciais para qualquer sistema óptico (AGRAWAL, 2002).

Para atingir ganho óptico, os amplificadores requerem de inversão de população. Isto é, uma concentração de átomos excitados suficientemente grande que faça com que a emissão estimulada seja mais provável que a emissão espontânea. O processo pelo qual consegue-se a inversão de população denomina-se bombeio e pode ser óptico (fazendo incidir luz que excite os átomos) ou elétrico (passando uma corrente elétrica). Uma vez atingida a inversão de população, os fótons de um sinal lumínico incidente provocam emissão estimulada dos portadores / íons excitados, obtendo-se um número maior de fótons coerentes e resultando em um ganho (AGRAWAL, 2002).

A Figura 1 apresenta as três configurações utilizando amplificadores ópticos, (a) amplificação em linha, (b) amplificação *booster* e (c) preamplificação, são particularmente uteis em sistemas de curta distancia. Em enlaces de longa distancia, por outro lado, é necessário a utilização de multiplos amplificadores em linha para evitar que a combinação de efeitos não lineares e o ruído agregado deteriore excessivamente o sinal. Outra forma comum de emprego de amplificadores ópticos é introduzindo o mesmo antes de um transmissor de maneira que a potência transmitida seja aumentada consideravelmente, fazendo com que o sinal possa ser transmitido a distâncias de 100 km.

Figura 1: Três aplicações para amplificadores ópticos: (a) amplificadores em linha; (b) como um reforço de potência para o transmissor; (c) como pré-amplificador. Fonte: (AGRAWAL, 2002).



4.1.1. Amplificadores Ópticos Semicondutores

Além das diferentes configurações, existem diferentes tecnologias de amplificação que podem ser usadas, as três mais comumente utilizadas são: os amplificadores ópticos semicondutores (SOA), os amplificadores Raman e os EDFAs. Os amplificadores ópticos semicondutores (SOAs) funcionam praticamente como os lasers semicondutores, sendo desenvolvidos logo após o surgimento dos lasers. Os lasers semicondutores possuem alto índice de reflexões devido a facetas clivadas, como um Fabry-Perot. Existem os chamados amplificadores FP que possuem modo de propagação TW (*Travelling Wave*), ou seja, de forma que a onda viaje numa direção direta (AGRAWAL, 2002). Os amplificadores FP normalmente não são apropriados para determinadas aplicações. Sabe-se que para um bom fator de amplificação, $G\sqrt{R_1R_2}$ (R_1 e R_2 são as refletividades nas facetas) deve ser bem próximo de 1, mas a largura de banda é pequena nestes casos. Pode-se reduzir o *feedback* dos SOAs do tipo TW, revestindo suas facetas (AGRAWAL, 2002).

Segundo Agrawal, se a variação do ganho for maior que 3dB, então a largura de banda poderá ser definida por meio das ressonâncias da cavidade e não pelo espectro de ganho. Para atingir um ganho de 30 dB, as refletividades das facetas devem estar abaixo de $1,7 \times 10^{-4}$. Desta forma se obterão refletividades baixas mesmo com a introdução de revestimentos antireflexos de forma previsível.

Os SOAs apresentam algumas características indesejáveis como valores de figura de ruído típicas de 9 dB, que acontecem segundo Agrawal (2002), devido a presença de emissão estimulada. Também apresentam sensibilidade à PDL (Perda Dependente da Polarização) e PMD (Dispersão por Modo de Polarização) devido à ausência de simetria cilíndrica, onde o sinal se propaga por duas polarizações ortogonais entre si e também ao longo do caminho, tornando os SOAs sensíveis a estes problemas, pois o ganho dos amplificadores são distintos para modos de propagação transversais diferentes (AGRAWAL, 2002).

Segundo Agrawal (2002), os SOAs podem ser utilizados para amplificar vários canais e também para monitoramento de desempenho da rede. Os SOAs possuem resposta relativamente rápida em relação a amplificação de diversos canais simultaneamente, mas, ao mesmo tempo, são excitadas muitas não-linearidades como a diafonia intercanal. A diafonia inter-canal acontece ativamente do espaçamento entre canais. Afim de evitar tal problema, reduz-se a potência do canal.

Por conta dos diversos problemas apresentados pelos SOAs na prática, como a diafonia,

a dependência a polarização e elevado ruído, buscou-se estudar sobre novas alternativas que contornassem tais problemas deste amplificador. Deste modo, surgiram os amplificadores Raman e EDFA que serão discutidos nas seções posteriores.

4.1.2. Amplificadores Ópticos Raman

Amplificadores Raman são baseados em fibras compostas por sílica na qual ocorrem a dispersão Raman estimulada (SRS). Para obter-se o ganho em amplificadores Raman, o meio deve ser estimulado opticamente, de forma que o bombeio e o sinal sejam associados e transmitidos pela fibra por meio de um acoplador óptico. O espectro de Raman apresenta banda larga devido ao formato amorfo do vidro. A vantagem de se utilizar Raman fica evidente em relação a sua largura de banda para diversas implementações em sistemas ópticos mas deve-se tomar cuidado pela presença de dispersão que ocorre para longos comprimentos de fibra (AGRAWAL, 2002).

A saturação de ganho nos amplificadores Raman é bem diferente dos SOAs que é transmitida pela fibra devido a dois fatores. Por um lado, as perdas de transmissão da fibra na janela de 1550 nm são geralmente governadas pelo espalhamento Rayleigh. Por outro lado, a potência transferida do bombeio para o sinal é amplificada. Ambos efeitos resultam em uma redução da potência de bombeio, também denominado de depleção. Uma diminuição na potência do bombeio P_0 reduz o ganho óptico. Esta redução no ganho é conhecida como saturação de ganho (AGRAWAL, 2002). A diferença do espalhamento estimulado de Brillouin, segundo Agrawal (2002) embora uma pequena parte do sinal seja retroespalhada ela não possui impacto na transmissão, a não ser que a mesma seja amplificada por extensos quilômetros de fibra.

Nos amplificadores Raman, o grau de diafonia pode passar de 1% (20 dB) para $L > 80$ km e $G(L) > 10$. A diafonia é acumulada e pode prejudicar sistemas ópticos marinhos, por exemplo. O uso de amplificadores Raman em sistemas WDM são comuns, pois esta diafonia somente é presente em sistemas de banda extremadamente larga. Uma característica indesejável é que o ganho Raman é ligeiramente sensível à polarização, mas pode ser solucionado bombeando um amplificador com dois lasers polarizados ortogonalmente (AGRAWAL, 2002).

Porém, o limitado ganho dos amplificadores Raman não permite que possam ser utilizados de forma isolada em sistemas multi-span. Por isso, são geralmente adotados para auxiliar os EDFAs de forma que se requera um menor ganho.

4.1.3. Amplificadores Ópticos EDFA

Um dos principais tipos de amplificadores ópticos são os amplificadores ópticos dopados com elementos de terras raras, normalmente, dopados com érbio. Este amplificador é muito comum e muito utilizado em sistemas WDM devido a faixa de comprimentos de onda onde ele opera a 1550 nm. A propriedade dos dopantes na fibra é o que determina sua largura de banda, podendo ser dopados com elementos como érbio, holmio, neodímio entre outros (AGRAWAL, 2002).

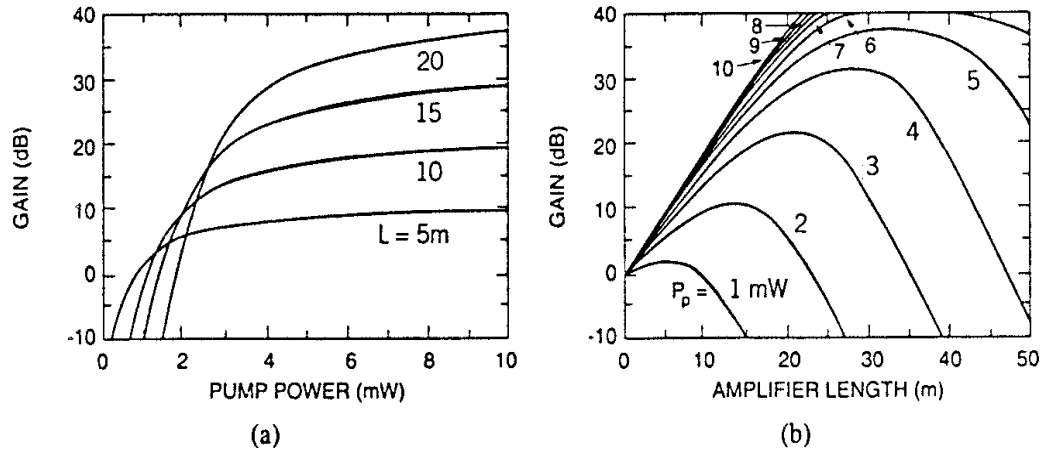
O espectro do ganho dependerá dos dopantes presentes no núcleo da fibra, característica amorfa da mesma, mesmo os dopantes apresentando níveis energéticos bem definidas, a matriz de vidro em que eles são difundidos faz com que a fibra dopada apresente uma estrutura de bandas similar a dos semicondutores. Algumas técnicas utilizadas foram lasers de íons de argônio, Nd: YAG embora não sejam eficientes e usuais, dando preferência para a utilização de lasers semicondutores (AGRAWAL, 2002).

A principal vantagem dos EDFAs é o fato de que o mesmo consegue alcançar altos níveis de ganho com pouco mW de potência de bombeio. Além disso, potência de bombeio pode ser reduzida utilizando outros tipos de dopantes no núcleo da fibra. Os EDFAs podem ser bombeados na faixa de 0,6 a 0,7 μm , mas são comumente utilizados lasers na faixa de 980nm e 1480 nm pois são muito utilizados comercialmente, chegando a potências totais de saída de 100 mW (AGRAWAL, 2002).

Os EDFAs podem ser utilizados de forma que o bombeio e os feixes possam propagar o sinal em direções distintas, sendo configurados de forma contrapropagante. Os mesmos possuem desempenho igual a configuração comum quando a potência do sinal é suficientemente pequena para fazer com que o amplificador esteja insaturado. Pode-se utilizar dois lasers semicondutores de modo que a configuração esteja bombeando em duas direções simultaneamente (AGRAWAL, 2002).

A figura 2 mostra o ganho de sinal pequeno em 1,55 μm em função da potência do bombeio e do comprimento do amplificador usando valores típicos destes parâmetros. O ganho do amplificador inicialmente é aumentado exponencialmente com a potência do bombeio, mas diminui quando excede um determinado valor. A partir de determinada potência de bombeio, o ganho do amplificador atinge um patamar máximo para um valor ótimo de comprimento L e decai após este valor. Isto ocorre devido a que a atenuação da fibra (causada principalmente pela absorção) supera o ganho pois a potência é reduzida. (AGRAWAL, 2002).

Figura 2: Ganho de pequeno sinal em função da (a) potência de bombeio e (b) comprimento do amplificador para um EDFA utilizando comprimento de onda a 1,48 μm . (AGRAWAL, 2002).



Geralmente, a potência de saturação de saída é inferior que a potência da bombeio de saída esperada na ausência de sinal, sendo relativamente variável pois está associada ao design do EDFA. Por isso, os níveis de potência de saída dos EDFAs possuem valores abaixo de 100 mW. Na prática, os EDFAs são bombeados usando lasers semicondutores de onda contínua (AGRAWAL, 2002).

4.1.4. Comparação entre os amplificadores EDFA, Raman e Semicondutores

Como explicado, existem diversos tipos de amplificadores ópticos, cada qual com sua particularidade e função, destacando-se os amplificadores semicondutores, Raman e EDFA. O EDFA é o mais comum de se encontrar em sistemas utilizando enlaces ópticos que serão explicitados nesta revisão.

Comparando as diferentes tecnologias envolvendo os amplificadores ópticos mais comumente usados, sabe-se que nos que se baseiam os amplificadores de semicondutor, mesmo utilizando de técnicas a fim de diminuir as refletividades, sempre haverá algum residual que interferirá em flutuações no ganho, fazendo com que o mesmo aumente de acordo com o aumento da refletividade (RODRIGUES, 2014). Deve-se considerar que o fator de ruído também será alto devido as perdas e refletividades residuais. Os SOAs também são sensíveis a PDL por ter um guia de onda retangular. Mesmo que SOAs possam ser utilizados em amplificação para diversos canais, os mesmos podem causar problemas como a diafonia intercanal que interfere na potência do mesmo.

Os amplificadores Raman por sua vez, são bombeados por meio óptico, com luz incidente e são limitados pelo espalhamento de Rayleigh que pode ser amplificado para distâncias elevadas. Seu ganho é relativamente moderado e sua banda é larga. Amplificadores

Raman possuem a vantagem da pequena sensibilidade a polarização mas são amplificadores que possuem alto custo comparado a outros. O espalhamento de Rayleigh pode modificar a performance deste amplificador devido ao surgimento da diafonia causada pela amplificação do ruído nos amplificadores Raman, o que causa uma diminuição na potência. Como é analisado por Rodrigues (2014), se o bombeio for realizado por meio de lasers semicondutores, podem surgir flutuações fazendo com que elas sejam amplificadas. Devido ao seu ganho moderado, normalmente são empregados em sistemas ópticos junto aos amplificadores EDFAs.

O terceiro tipo, os amplificadores EDFA são formados por fibra dopada com elementos de terras raras (geralmente érbio), são particularmente interessantes devido ao alto ganho, elevada potência de saturação e baixo ruído (AGRAWAL, 2002). Nos amplificadores EDFA, o ganho está controlado pela concentração de dopagem da fibra e o comprimento assim como a potência de bombeio do laser utilizado para atingir a inversão de portadores. Logo, a potência consumida nos amplificadores varia de acordo com o comprimento da fibra (AGRAWAL, 2002).

Os EDFAs podem ser usados em combinação a amplificadores Raman, pois utilizando-se de um Raman no início do enlace diminui-se o fator de ruído que idealmente é zero dB para o mesmo e assim, não é amplificado. Com um EDFA próximo ao receptor, pode-se aumentar o ganho que é uma vantagem do EDFA sem que haja grande penalidade em relação ao ruído. Os EDFAs possuem custo moderado devido a sua complexidade e seu fator de ruído é considerado baixo, embora ainda sim seja maior que Raman.

Normalmente as potências de bombeio dos EDFAs são altas (menor que Raman), ou seja, requerem muita potência mas ainda assim possuem vantagens que segundo Rodrigues (2014), é o que possui grande largura de banda e é capaz de amplificar um grande número de canais simultaneamente além de serem capazes de operar em faixas onde as perdas são significativamente menores. Os EDFA são amplamente utilizados em sistemas multispan.

Os amplificadores ópticos EDFA são muito utilizados em sistemas ópticos WDM muito comuns atualmente. A combinação de seu alto ganho e baixo ruído são atraentes e amplamente utilizados, tornando-se principal fator deste estudo. Por ser este tipo de amplificadores os mais comuns em sistemas de comunicações ópticas de média e longa distância, este trabalho foca-se na avaliação deste tipo de amplificadores. A tabela 1 apresenta comparações entre as três tecnologias de amplificadores ópticos.

Tabela 1: Comparações entre os tipos de amplificadores ópticos.

Fonte: Baseado em Rodrigues (2014).

<i>Amplificadores</i>	<i>EDFA</i>	<i>Raman</i>	<i>SOAs</i>
<i>Ganho</i>	Alto	Moderado	Baixo
<i>Ruído</i>	4-6 dB	0 dB	9 dB
<i>Banda de operação</i>	Depende do dopante	Depende do bombeio	Depende do bombeio
<i>Saturação</i>	Alta	Moderada	Baixa
<i>Polarização</i>	Não sensível	Não sensível	Sensível
<i>Custo</i>	Médio	Alto	Baixo
<i>Mecanismo de ruído</i>	ASE	Dispersão de Raman, Rayleigh	ASE

4.2. Gestão Ambiental

Atualmente, a preocupação com o meio ambiente e o impacto das atividades do ser humano moderno sobre ele tem sido pauta de discussões e pesquisas em diversos países do mundo. Com o modelo linear de produção industrial e da sociedade de consumo aliada ao crescimento da população nos últimos anos, a preocupação com o meio ambiente e a possível escassez de recursos utilizados tem sido reavaliado e modificado para um melhor aproveitamento destes bens. Este modelo tem sido questionado em países desenvolvidos quanto a sua aplicabilidade em longo prazo.

Segundo Lima (2007), em meados dos anos 70 surgiu a importância de se discutir sobre o futuro dos recursos naturais e o impacto que as atividades humanas tinham sobre o meio ambiente, uma vez que a produção industrial crescia de forma acelerada e a extração de matérias aumentava de maneira desenfreada. Então, em 1972, ocorreu a primeira reunião da Organização das Nações Unidas, a ONU, com o tema Meio Ambiente Humano com participação de cientistas e políticos na convenção de Estocolmo para evitar o esgotamento de tais recursos ambientais.

A partir da década de 70, o mundo começou a colocar em pauta as questões ambientais e de como poderiam se utilizar das matérias primas em relação à produção de forma que atendesse a demanda da população sem prejudicar o meio ambiente e, além disso, como as emissões industriais afetariam o ecossistema, visando diminuir os poluentes que prejudicavam água, ar, enfim, o meio ambiente. Para Andrade (1997), naquele momento não existiam mecanismos que planejassem e controlassem questões ambientais, que permitissem com que

indústrias incorporassem tal planejamento no estudo econômico de custos e benefícios nos investimentos de seus produtos.

A sociedade teve papel influente na pressão de governos e empresas para que as questões ambientais ganhassem cada vez mais importância dentro de empresas. Nos anos 90, Andrade (1997) chama de “globalização” da questão ambiental, uma vez que ambientalistas de Organizações Não-Governamentais e agentes econômicos associaram desenvolvimento ao meio ambiente. Em 1992, temos a chamada ECO-92 realizada no Rio de Janeiro, que foi a Segunda Conferência Mundial de Desenvolvimento e Meio Ambiente, que culminou em conferências mundiais e metas que os países participantes deveriam atingir num determinado período.

4.2.1. Avaliação do Ciclo de Vida

A fim de avaliar as interferências humanas no meio ambiente e a crescente preocupação da utilização de recursos para os meios de produção e a consequência das atividades do ser humano sobre o planeta, as indústrias utilizam-se de uma ferramenta de gestão ambiental chamada de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), ou seja, é uma técnica que avalia o impacto ambiental de um produto ou processo, desde a extração de matérias-primas até a disposição do produto. Na ACV, define-se todo o sistema que compõe o ciclo de vida de um produto, visando também o processo de produção (UNEP, 2007).

Segundo Santos (2011), na década de 1990 foram pautados pelo esforço internacional para normalizar os princípios e as técnicas da ACV e para desenvolver procedimentos de boa conduta. A normalização da ACV começou na *International Organization for Standardization* (ISO) e no *European Committee for Standardization* (CEN).

Em 1993, a ISO formou o TC 207 que é o comitê técnico que visa normalizar sistemas de gestão ambiental, ou seja, tem como objetivo a melhoria das práticas de gestão ambiental para que o desempenho das empresas em seus serviços e produtos também melhorem. As normas do ISO 14000 visam avaliar a empresa e o produto de modo a promover a melhoria contínua na produção que regulamenta quesitos no contexto de gestão ambiental. O Brasil é membro da ISO representada pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) (SANTOS, 2011).

A ACV pode ser utilizada para analisar não só o ciclo de vida completo do produto, como também avaliar as seguintes etapas:

- *cradle-to-grave analysis* (análise do berço à sepultura): engloba todo o ciclo de vida do produto, desde a extração da matéria prima até o descarte final;
- *gate-to-gate* (de porta a porta): engloba o início de um processo até o final do mesmo, ou seja, a acv é realizada apenas numa etapa do ciclo de vida do produto;
- *gate-to-grave* (de porta ao túmulo): é estudo o ciclo de vida à partir de um processo até o descarte final do produto;
- *grave-to-cradle* (túmulo ao berço): refere-se ao estudo do descarte final, o fim daquele determinado produto á transformação do mesmo para matéria prima novamente.

Portanto, a ACV é utilizada a fim de identificar qual parte do ciclo de vida é mais impactante ao meio ambiente e avalia o impacto destas alterações (UNEP, 2007). Segundo Lima (2007), as principais normas da ACV foram elaboradas pela ISO e possuem suas similares brasileiras publicadas pela ABNT, conforme apresentado na Tabela 2.

Tabela 2: Normas ISO relacionados à ACV.
Fonte: Norma ISO 14040 e ISO14044 (2009).

Norma	Definição
ISO 14040:2009	A norma ISO 14040 apresenta características e o funcionamento de uma ACV. Apresentam-se os termos utilizados e a metodologia, mas sem detalhamento da técnica do ACV (ISO 14040:2009).
ISO 14044:2009	A norma ISO 14044 apresenta-se como um guia para a execução e revisão crítica da ACV. Apresenta exemplos e temas tratados anteriormente em outras normas (ISO 14044:2009).

Conforme a norma 14040:2009 um estudo da ACV é composto por quatro fases:

- Definição do escopo e objetivo;
- Análise do inventário;
- Avaliação de impactos; e
- Interpretação de dados.

Primeiramente o escopo e os objetivos, isto é, que são delimitadas as condições de contorno e as limitações da análise, os processos envolvidos e o ciclo de vida do produto. Com isso, a ACV abrange a coleta de dados do sistema na qual envolve todo o processo de ciclo de

vida de um determinado produto. Esta etapa é chamada de inventário, na qual é identificado a completa carga ambiental associada ao produto.

No inventário do ciclo de vida são inseridos todos os dados coletados para a pesquisa, como as entradas dos processos analisados, matéria prima, fluxo de energia e também as saídas, como produtos, resíduos, etc que são quantificados e detalhados (ABNT, 2009). Segundo Junior (2016), o ICV é um dos principais processos de uma ACV, uma vez que convenientemente interpretado, servirão de base para serem transformadas em dados ambientais mais específicos, fornecendo importantes informações quantitativas e qualitativas.

Na fase de avaliação de impactos, estuda-se a normalização e caracterização, as entradas e saídas identificadas no inventário classificam-se de acordo com o consumo de recursos que contribuem para problemas ambientais ou a problemas de saúde humana. Por ultimo, comparam-se os perfis de produtos ou soluções que serão relevantes na decisão para a escolha final (SANTOS, 2011).

Na ACV, a avaliação do inventário do ciclo de vida é importante para elaboração da análise deste estudo, pois determinam-se os níveis de avaliação de impacto, bem como os métodos a serem utilizados disponíveis nos softwares, como Open LCA, GABI *Education* (2019), entre outros. Segundo MENDES *et.al.*, 2016, existem três diferentes níveis de avaliação de impacto dispostos da seguinte maneira:

- *Midpoint* – Utiliza-se de caracterização ao longo do mecanismo ambiental antes de chegar ao fim. Mecanismo ambiental é um conjunto de processos para uma categoria de impacto em conjunto com as informações da análise do inventário do ciclo de vida aos indicadores de categoria e aos pontos finais da categoria (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2009a). O ponto final da categoria é composto pelo aspecto do ambiente natural, saúde humana ou recursos;
- *Endpoint* – Considera-se todo o mecanismo ambiental desde seu início até o fim, ou seja, está relacionada a uma falha específica com a área mais ampla de proteção, e remete-se a saúde humana, ambiente natural ou recursos naturais;
- Combinado – Associação dos níveis de avaliação do impacto midpoint e endpoint.

Segundo o manual ILCD Joint Research Centre (2010), apresenta-se a seguir alguns dos métodos importantes para a avaliação dos impactos ambientais são:

- CML 2002: É um método midpoint de abrangência global desenvolvido na Holanda e é um material realizado a partir de minuciosa revisão de características de métodos existentes no mundo todo. Segundo MENDES et. al., 2016, são apresentadas as categorias de impacto: depleção de recursos abióticos, uso da terra, mudança climática, depleção de ozônio estratosférico, toxicidade humana, ecotoxicidade aquática de água doce, ecotoxicidade aquática marinha, ecotoxicidade terrestre, formação de foto-oxidantes, acidificação e eutrofização. A principal característica relevante deste método é que as categorias de impacto estão presentes em diversos artigos científicos;
- Eco-Indicator 99: Método endpoint também desenvolvido na Holanda, fez parte da Política Integrada de Produto do ministério holandês de Moradia, Planejamento Espacial e Ambiental (VROM), segundo MENDES et.al., 2016. É um método de interpretação de dados da ACV bem pontuais, utilizando-se de eco-indicadores. O Eco-indicator 99 surgiu após os métodos EPS 2000 e Eco-indicator 95 e foi utilizado para o desenvolvimento dos métodos LIME e Impact 2002 (Joint Research Centre, 2010);
- ReCiPe: O método ReCiPe integra os métodos Eco-indicador 99 e CML 2000 de forma mais clara sobre as abordagens *midpoint* e *endpoint* segundo MENDES et. al., 2016. As categorias de impacto abordadas são: mudança climática, depleção de ozônio, acidificação terrestre, eutrofização aquática de água doce, eutrofização aquática marinha, toxicidade humana, formação de oxidantes fotoquímicos, formação de matéria particulada, ecotoxicidade terrestre, ecotoxicidade aquática de água doce, ecotoxicidade aquática marinha, radiação ionizante, uso do solo agrícola, uso do solo urbano, transformação de terra natural, esgotamento de recursos fósseis, esgotamento de recursos minerais e esgotamento de recursos de água doce (Joint Research Centre, 2010, MENDES et. al., 2016).
- TRACI: TRACI (*Tool for the Reduction and Assessment of Chemical and other environmental Impacts*) ferramenta para a redução e avaliação de impactos ambientais, químicos e outros é um método de avaliação de impacto que foi criado nos Estados Unidos, apresenta um método *midpoint* que contempla a

situação ambiental do país por inteiro ou separado estado a estado dos Estados Unidos, como um todo ou por estados. O método abrange forma de aplicação global para depleção de ozônio e aquecimento global e aplicação válida para a América do Norte para acidificação, eutrofização e formação de fumaça (Joint Research Centre, 2010, MENDES, et. al., 2016).

- EDIP: É um método midpoint desenvolvido na Dinamarca e sua versão EDIP 2003 apresenta resultados como aquecimento global, depleção de ozônio, acidificação, eutrofização terrestre, eutrofização aquática, formação de ozônio fotoquímico, toxicidade humana, ecotoxicidade e barulho. Apresenta escopo de aplicação global para aquecimento global e depleção de ozônio, sendo direcionado para a Europa para as demais categorias (Joint Research Centre, 2010).

No âmbito das telecomunicações, o ACV também se faz presente uma vez que há um processo de evolução neste meio na qual cada vez mais substituí-se os serviços físicos com o intuito de reduzir o impacto humano no meio ambiente. Porém, tais mudanças acarretam também o aumento do consumo de eletricidade, mais especificamente no processo de fabricação desses materiais além de sua fase de uso (SCHINELLA, et.al., 2013).

5. METODOLOGIA

De acordo com a norma 14040:2009 a natureza relativa da ACV deve-se a fase da metodologia que é aberta a novas descobertas científicas e também não há existência de um só método, as empresas possuem flexibilidade para implementar de acordo à aplicação pretendida. A ACV modela o ciclo de vida de um produto de acordo com o sistema do produto.

Para realizar a ACV de um EDFA durante sua fase de uso, em primeiro lugar, foi realizado um levantamento de distintas fichas de dados (*datasheets*) de amplificadores EDFA disponibilizados publicamente pelos fabricantes presentes no mercado a fim de comparar seus respectivos ganhos e as potências de saída máximas. No total foram utilizados 38 fichas de dados de amplificadores. Por meio destes dados, realizou-se a ACV da fase de uso destes amplificadores no *software GABI Education* (2019), visando identificar e analisar os impactos ambientais relacionados ao consumo energético dos EDFA assumindo a matriz energética brasileira. Segundo a norma ISO:14040 (2009), a unidade funcional é o desempenho

quantificado das saídas do produto, ou seja, uma unidade de referência.

Para valores elevados de ganho, a potência agregada pode ser aproximada pela potência de saída, mantendo a forma exata. Assim, valores de potência consumida em W são informados nas fichas de dados mas valores como ganho às vezes não são encontrados diretamente, de forma que seja necessário calculá-los utilizando os valores de potência de entrada e potência de saída. Esta relação é dada por:

$$G[dB] = P_{saída} - P_{entrada} \quad (1)$$

A equação (1) permite encontrar o valor do ganho a partir das relações de potências de entrada e de saída dos dispositivos. Para a realização da ACV, introduziu-se os valores de potência consumida que são dados em Watt [W] como entradas e utilizou-se dos valores de potência de saída máxima que é expresso em dBm como saída nos processos.

Foi necessário realizar algumas conversões para realizar a ACV. Consideraram-se que os amplificadores estivessem num regime de funcionamento de 24 horas para realizar a conversão de W para kWh que era a unidade apresentada pelo programa. A equação (2) expressa a relação calculada:

$$P_{cons} [kWh] = \frac{E \cdot 1000}{\Delta t} \quad (2)$$

onde P_{cons} é a potência consumida, E é a energia (consumo) e Δt o tempo de consumo. Para a potência de saída máxima que é expressa em dBm, também foi necessária a conversão para W e posteriormente, utilizou-se da equação (2) para que fossem colocadas as mesmas unidades no GABI uma vez que o mesmo não apresenta valores de potência em dBm. A equação (3) mostra como converter potências em dBm para W:

$$P[W] = \frac{1 [W] 10^{\left(\frac{P_{dBm}}{10}\right)}}{1000} \quad (3)$$

onde P_{dBm} são valores referentes a potência de saída máxima expressos em dBm. Um parâmetro importante para a análise do funcionamento de amplificadores é a eficiência energética, dada por:

$$E_{eff} = \frac{P_{saída} - \frac{P_{saída}}{G}}{P_{cons}} \quad (4)$$

Em que a relação entre $\frac{P_{saída}}{G}$ é a potência de entrada $P_{entrada}$, valor que foi calculado quando não fornecido pelas fichas de dados.

Neste trabalho propõe-se usar como unidade funcional a potência agregada (P_{agg}). É importante ressaltar que a potência agregada é dada pela subtração da potência de saída e potência de entrada em linear e foi utilizada como saídas no processo de fase de uso elaborado no GABI *Education* (2019). Como não havia um método que possibilitasse a realização da ACV nos amplificadores, levantou-se hipóteses para encontrar a métrica adequada.

Primeiramente, analisou-se a relação da potência consumida com o ganho, no qual não havia correlação nenhuma. Posteriormente, analisou-se a relação da potência consumida com a potência de saída dos 38 amplificadores ópticos que apresentou grande convergência. Como a potência agregada é aproximadamente a potência de saída (uma vez que a potência de entrada é uma fração mínima contabilizada), a unidade funcional utilizada foi a potência agregada. Esta análise é melhor detalhada na seção de Resultados e Discussão. A equação (5) mostra esta relação:

$$P_{agg} = P_{saída} - \frac{P_{saída}}{G} \quad (5)$$

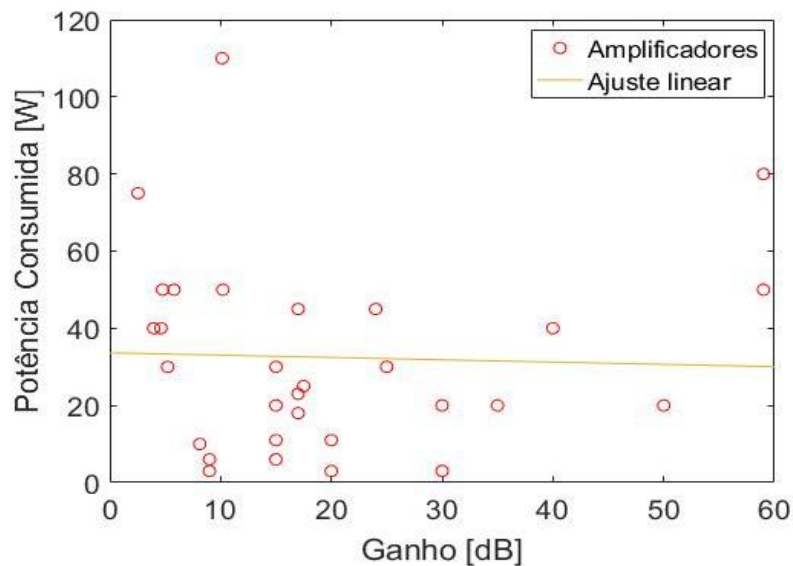
Realizadas as conversões, são introduzidas em um único processo suas respectivas entradas e saídas. Realizou-se a ACV para quatro amplificadores, dois que apresentaram maiores valores de potência consumida, outro com valor médio entre todos que foram pesquisados e um com menor valor pois muito deles se repetiam entre os 38 amplificadores e assim, foram analisados os respectivos impactos para a fase de uso destes.

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção, utiliza-se de exemplos ilustrativos para avaliar a eficiência energética dos amplificadores estudados, assim como os impactos ambientais gerados pela fase de uso destes. As Figuras 3 e 4 apresentam relações a potência consumida em termos do ganho e da potência de saída respectivamente, obtidos a partir de fichas de especificações disponíveis na Internet.

A Figura 3 apresenta a potência consumida de cada amplificador pelo seu respectivo ganho (marcadores em vermelho). A fim de auxiliar na compreensão dos dados, foi necessário traçar uma linha de tendência linear. Note que alguns pontos estão fora e portanto acima da linha de tendência traçada. Porém, observando a Figura e, em particular a linha de tendência, pode-se deduzir que o ganho não apresenta uma correlação significativa com a potência consumida.

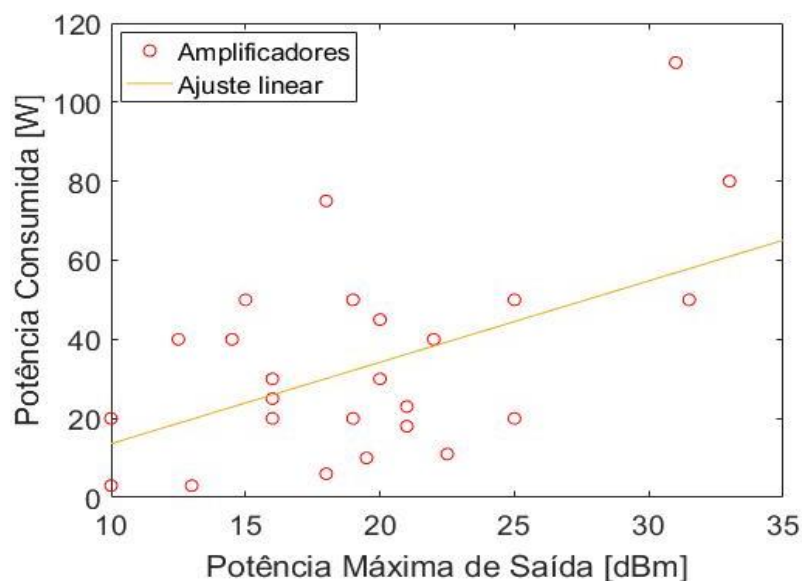
Figura 3: Relação de potência consumida pelo ganho de um amplificador EDFA.



A figura 4 apresenta a potência consumida em termos da potência máxima de saída para cada amplificador. Tal como na figura 3, foi necessário utilizar uma regressão linear para quantificar a correlação entre as duas variáveis e gerar uma linha de tendência linear para auxiliar na compreensão dos dados gerados. Note a diferença do caso anterior, é que a linha traçada é crescente, de forma que seja possível perceber que quanto maior a potência de saída maior a potência consumida dos amplificadores estudados. Na região entre 15 W e 40 W de potência consumida percebe-se maior concentração de pontos. De fato, a potência de saída está relacionada ao ganho, pois quanto maior o ganho maior a potência de saída para mesma potência de entrada, conforme observado nas fichas de dados.

Comparando as figuras 3 e 4 pode-se notar que a potência consumida tem uma maior correlação com a potência de saída do que com o ganho e, por tanto, esta última será considerada como unidade funcional. Observa-se que para se obter um valor de eficiência energética considerável, vide (4), seria necessário que quanto maior a potência agregada (que é aproximadamente a potência de saída), menor deveria ser o valor para potência consumida, o que não é observado na figura 3.

Figura 4: Relação de potência consumida por potência máxima de saída de um amplificador EDFA.



Os métodos de Avaliação de Impactos Ambientais utilizados foram: CML 2001, Environmental Footprint 2.0, ReCiPe 2016 v1.1 Midpoint e TRACI 2.1. O aspecto ambiental identificado e analisado nesta pesquisa limitou-se ao consumo energético dos amplificadores EDFAs durante a sua fase de uso. Desta forma, os impactos ambientais decorrentes desta análise são provenientes da produção e geração de energia elétrica, considerando-se a matriz energética brasileira de hidroeletricidade de reservatório.

Foram obtidos impactos ambientais de quatro amplificadores que apresentaram potências de consumo de 110 W, 80 W, 50 W e 3 W a fim de realizar comparações. Para a escolha destes dados de potências de consumo, utilizou-se um amplificador que apresentou maior potência de consumo (110 W), um de menor potência de consumo (3 W) e outros dois que eram mais comuns dentre os datasheets encontrados (80 e 50 W). Observou-se grande convergência e homogeneidade entre as categorias de impactos ambientais identificadas e analisadas pelos quatro métodos de AICV. Assim, foram apresentadas figuras que apresentam os potenciais de impactos para cada método e ao final, as categorias foram discutidas. A figura 5 apresenta os potenciais de impactos ambientais calculados segundo o método CML 2001. A figura 6 sintetiza os principais impactos segundo o método Environmental Footprint 2.0. Por sua vez, a figura 7 sumariza os impactos ambientais segundo o método ReCiPe 2016. E a figura 8 resume os impactos ambientais identificados e calculados pelo método TRACI.

Figura 5: Potenciais de Impacto segundo CML 2001.

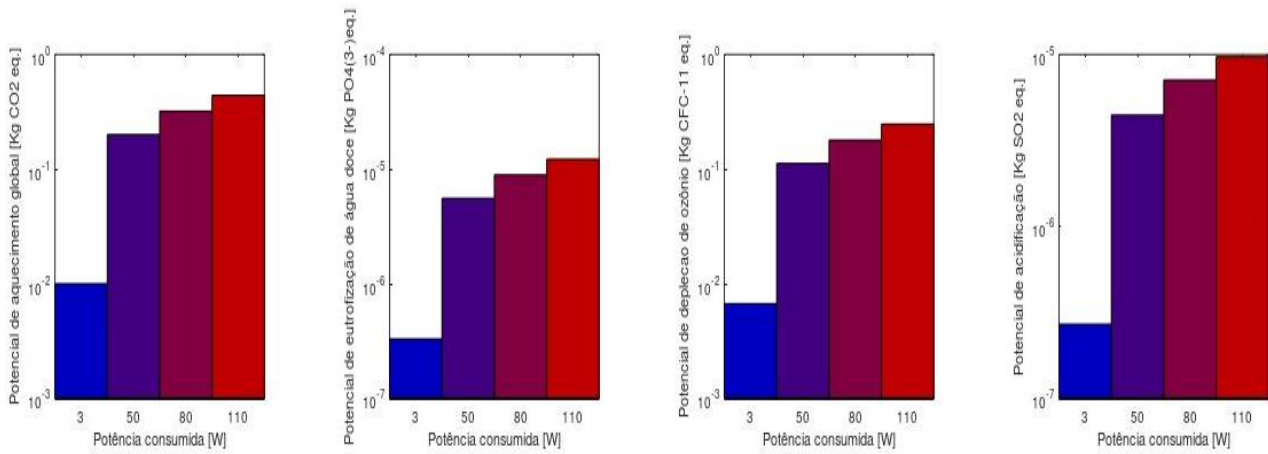


Figura 6: Potenciais de Impacto segundo Environmental Footprint 2.0.

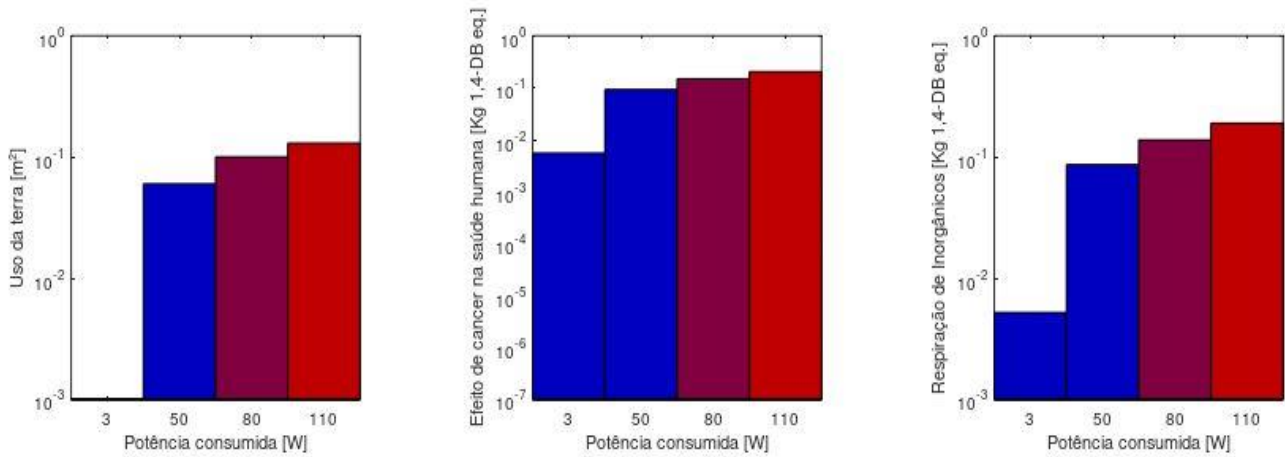


Figura 7: Potenciais de Impacto segundo ReCipe 2016.

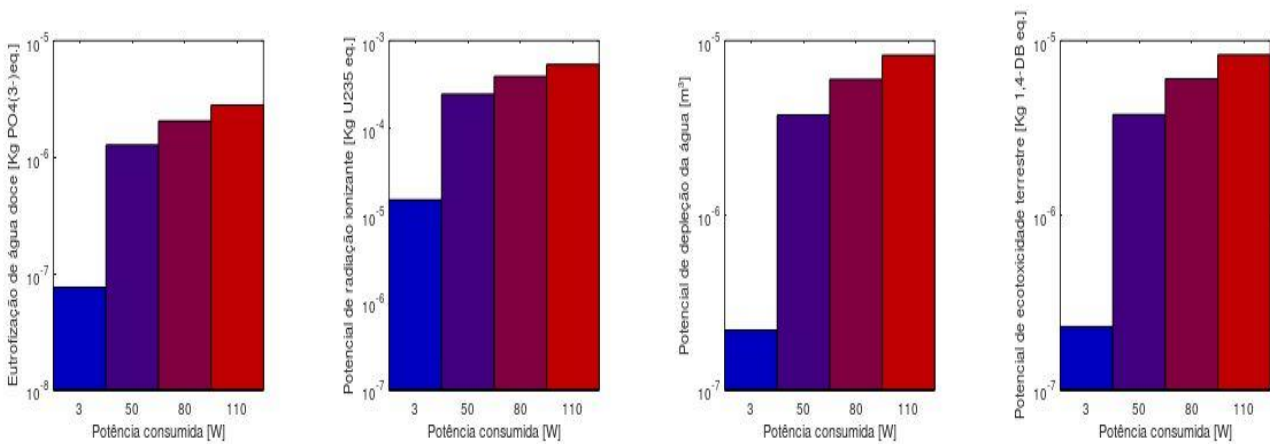
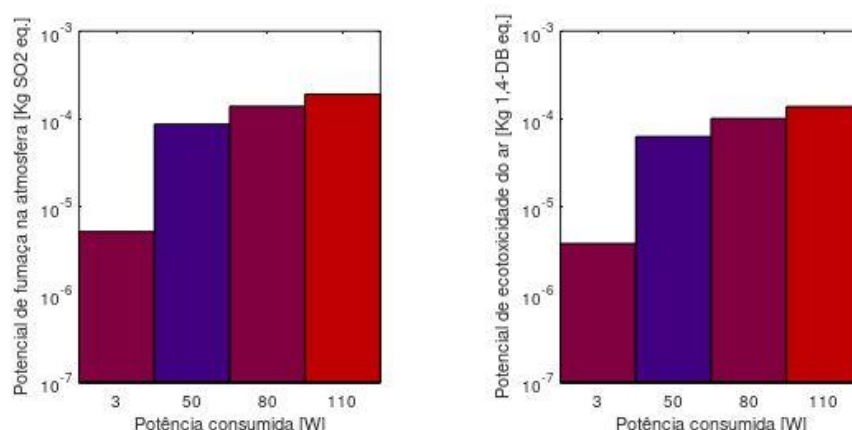


Figura 8: Potenciais de Impacto segundo TRACI.



Com base no guia LCIA Methods (2015), foram realizadas as interpretações dos impactos ambientais encontrados. O potencial de aquecimento global (mudança climática) é caracterizado pela mudança na temperatura global não natural, ou seja, causada pelo efeito estufa proveniente da ação humana. É previsto que o aumento da temperatura global cause distúrbios climáticos, desertificação, aumento do nível do mar e disseminação de doenças. O potencial de aquecimento global é estimado em anos, mais comum 100 anos (GWP100), com unidade de referência, quilograma CO_2 equivalente. Os valores dos impactos ambientais na figura 5 de potencial de aquecimento global para amplificadores EDFAs com potência consumida de 3, 50, 80 e 110 W são 0.01, 0.2, 0.32 e 0.44, respectivamente.

A eutrofização se caracteriza pela alta concentração de nutrientes químicos em um ecossistema levando a produtividade anormal. Este distúrbio gera grande aumento na população de plantas como algas, que como consequência prejudica a qualidade da água e nas espécies de animais. As emissões de amônia, nitratos, óxidos de nitrogênio e fósforo para o ar ou a água têm um impacto na eutrofização. A usando a unidade de referência, quilograma PO_4^{3-} equivalentes. Os valores dos impactos ambientais na figura 5 de eutrofização de água doce para amplificadores com potência de 3, 50, 80 e 110 W são, 3.3×10^{-7} , 5.56×10^{-6} , 8.9×10^{-6} e 1.22×10^{-5} , respectivamente.

Potencial de depleção de ozônio refere-se aos gases que destroem o ozônio danificando o que é conhecido como “camada de ozônio”. CFCs (clorofluorcarbonetos), halons e HCFCs (hidroclorofluorcarbonetos) são os principais destruidores da camada de ozônio, no qual reduzem sua capacidade de impedir que a luz ultravioleta (UV) entre na atmosfera terrestre, aumentando a quantidade de luz UVB cancerígena que atinge a terra. Os valores dos impactos ambientais na figura 5 de depleção de ozônio para amplificadores com potência de 3, 50, 80 e

110 W são $6.7 * 10^{-3}$, $1.12 * 10^{-1}$, $1.79 * 10^{-1}$ e $2.47 * 10^{-1}$, respectivamente.

Potencial de acidificação tem como base a reação de gases ácidos como o dióxido de enxofre (SO_2) com a água presente na atmosfera, fazendo com que se forme a “chuva ácida”. A ocorrência desse fenômeno compromete ecossistemas em vários níveis dependendo das características do solo em que cai. A deposição de ácido no solo são provenientes de gases como amônia (NH_3), óxidos de nitrogênio (NO_x) e óxidos de enxofre (SO_x). O potencial de acidificação é expresso usando a unidade de referência, quilograma SO_2 equivalente. Os valores dos impactos ambientais na figura 5 de potencial de acidificação para amplificadores com potência de 3, 50, 80 e 110 W são $2.7 * 10^{-7}$, $4.44 * 10^{-6}$, $7.1 * 10^{-6}$ e $9.7 * 10^{-6}$, respectivamente.

Na figura 6, para o uso da terra, é utilizado a métrica de fração de espécies potencialmente desaparecidas (PDF) por m^2 ou m_a^2 (metro quadrado de terra por ano). Na ACV, esses fatores são multiplicados e resultando no impacto de ocupação do solo. Os valores dos impactos ambientais na figura 6 do uso da terra para amplificadores EDFAs com potência consumida de 3, 50, 80 e 110 W são $0,6 * 10^{-2}$, $1 * 10^{-1}$ e $1.30 * 10^{-1}$, respectivamente. O efeito de cancer na saúde humana caracteriza-se por exposição e parâmetros de efeito para toxicidade e ecotoxicidade humanas provenientes de alguns metais em excesso presentes no corpo humano. Os impactos ambientais na figura 6 sobre o efeito de cancer na saúde humana para amplificadores com potência de 3, 50, 80 e 110 W são $5.50 * 10^{-3}$, $9.24 * 10^{-2}$, $1.48 * 10^{-1}$ e $2.03 * 10^{-1}$, respectivamente. A respiração de inorgânicos utiliza-se de mesma métrica anterior e apresenta valores de impactos ambientais $5.20 * 10^{-3}$, $8.64 * 10^{-2}$, $1.38 * 10^{-1}$ e $1.90 * 10^{-1}$, respectivamente.

Para a figura 7, os valores de impactos ambientais provenientes de eutrofização de água doce para amplificadores com potência de 3, 50, 80 e 110 W são $57.60 * 10^{-8}$, $1.27 * 10^{-6}$, $2.04 * 10^{-6}$ e $2.80 * 10^{-6}$, respectivamente. O potencial de radiação ionizante é relacionada aos danos à saúde humana e aos ecossistemas que está ligada às emissões de radionuclídeos ao longo do ciclo de vida de um produto. Os valores de impactos ambientais na figura 7 para radiação ionizante são $1.50 * 10^{-5}$, $2.436 * 10^{-4}$, $3.89 * 10^{-4}$ e $5.340 * 10^{-4}$. O potencial de depleção na água refere-se de forma geral, ao consumo de água, no qual, caracteriza-se por uma medida da escassez da mesma dependendo da quantidade existente e do índice de extração. É medido pelo consumo de água (em m^3). Os valores de impactos ambientais na figura 7 para depleção de água são $2.20 * 10^{-7}$, $3.75 * 10^{-6}$, $6 * 10^{-6}$ e $8.25 * 10^{-6}$. Por fim, o potencial

de ecotoxicidade terrestre apresenta emissão de algumas substâncias, como metais pesados, impactando o ecossistema. A avaliação da toxicidade baseia-se na acumulação tolerável na água destes metais pesados nos ecossistemas com unidade de quilograma 1,4-diclorobenzeno equivalente (1,4-DB). Os valores de impacto apresentados na figura 7 são 2.30×10^{-7} , 3.77×10^{-6} , 6.04×10^{-6} e 8.30×10^{-6} .

O potencial de fumaça na atmosfera é caracterizada pela mistura de fumaça e névoa no ar. A poluição atmosférica é resultante da queima de carvão excessiva por meio da mistura de fumaça e dióxido de enxofre. Os valores dos impactos ambientais na figura 8 de potencial de fumaça na atmosfera para amplificadores EDFAs com potência consumida de 3, 50, 80 e 110 W são 5.20×10^{-6} , 8.70×10^{-5} , 1.39×10^{-4} e 1.91×10^{-4} , respectivamente. E para ecotoxicidade do ar, são apresentados valores de impactos ambientais de 3.80×10^{-6} , 6.28×10^{-5} , 1.01×10^{-4} e 1.380×10^{-4} .

Como era esperado, os potenciais de impactos segundo CML 2001 convergiram para a geração de energia elétrica que fornece a energia para a etapa de uso dos Amplificadores Ópticos, decorrentes do aspecto consumo energético. O represamento e os alagamentos decorrentes da construção de reservatórios de pressão acarretam em alterações nos regimes pluviais, que fomentados pelo desmatamento e suas consequentes alterações atmosféricas ocasionam impactos de ponto médio (*midpoint*), cabendo destacar nesta pesquisa o Aquecimento Global (GWP), a Depleção da Camada de Ozônio (ODP), bem como impactos de ponto final (*endpoint*), dentre eles a contribuição para o câncer humano, toxicidade humana e problemas respiratórios causados por partículas sólidas suspensas no ar.

Embora a aplicação da ACV na etapa de uso delimite os impactos ambientais causados pelo consumo energético, estes resultados sugerem a necessidade de proposições de melhorias tanto no projeto do produto, por meio de Ecodesign, ou mesmo nas operações de redes de Telecomunicações, visando o aumento da eficiência energética destes, bem como no uso integrados de fontes de outras energias renováveis, como solar e eólica, por exemplo.

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho, foram avaliadas as características energéticas de 38 amplificadores ópticos EDFA tendo como base suas potências de saída e potências consumidas. Com base nas curvas obtidas, foi possível concluir que quanto maior a potência de saída do amplificador, maior sua potência consumida, tornando essa relação uma métrica importante para encontrar os

impactos ambientais dos EDFAs avaliados. Para a realização deste trabalho desenvolveu-se este método, no qual utilizou-se da relação entre a potência de saída e a potência consumida de cada amplificador como unidade funcional para analisar os impactos ambientais provenientes da fase de consumo do EDFA por meio da matriz energética brasileira com um regime de funcionamento de 24 horas.

Como conclusão importante dos resultados obtidos, destaca-se o aquecimento global como principal impacto ambiental dos amplificadores avaliados. Em trabalhos futuros, propõe-se analisar os potenciais de impactos de EDFAs em sua fase de uso para diferentes matrizes energéticas no mundo todo e assim, compará-los. Poderão ser utilizados também a potência agregada por canal como métrica para resultados mais precisos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR ISO14040 - Gestão Ambiental - Avaliação do Ciclo de vida - Princípios e estruturas. Rio de Janeiro, 2009.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR ISO14044 - Gestão Ambiental – Avaliação do Ciclo de Vida - Requisitos e orientações. Rio de Janeiro, 2009.
- AGRAWAL, G. P.; Fiber-Optic Communication Systems – John Wiley & Sons, Inc. 3ª edição, 2002.
- ANDRADE, J. C. S.; Desenvolvimento sustentado e competitividade: tipos de estratégias ambientais empresariais. Tecbahia Revista Baiana de Tecnologia, v.12, n. 2, p. 71 – 86, 1997.
- GaBi Education Software. Disponível em <http://www.gabi-software.com> (2019).
- European Commission - Joint Research Centre - Institute for Environment and Sustainability: International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook - General guide for Life Cycle Assessment - Detailed guidance. First edition March 2010. Traduzido por Luiz Marcos.
- JUNIOR, E. M. Avaliação de ciclo de vida em processo de fabricação de rolamento. Trabalho de Conclusão de Curso (Mestrado)- Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Bauru-SP, 2016.
- LCIA Methodos, 2015. Disponível em: <http://www.openlca.org/downloads>. Acesso: 02 de fevereiro às 16:32 horas.
- LIMA, A. M. F. Avaliação do Ciclo de Vida no Brasil: inserção e perspectivas. Trabalho de Conclusão de Curso (Mestrado)- Universidade Federal da Bahia. Escola Politécnica, Salvador, 2007.
- MENDES, N. C.; BUENO, C.; OMETTO, A. R. Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida: revisão dos principais métodos. Production, 26(1), 160-175, jan./mar. 2016
- OLIVEIRA, J. A. P. Instrumentos econômicos para gestão ambiental: lições das experiências nacional e internacional. Centro de Recursos Ambientais (CRA): NEAMA, 2003.
- PEREIRA, A. B.; Avaliação do Ciclo de Vida e Produção mais Limpa em processos de manufatura: uma revisão bibliográfica sistemática no setor de telecomunicações. In: GCV – Congresso Brasileiro de Gestão do Ciclo de Vida, 6., 2018, Brasília – DF. *Anais...* Brasília: Instituto Brasileiro de Informação em Ciência e Tecnologia – Ibict, 2018. P. 878-883.
- RODRIGUES, A. M. C.; Análise Comparativa do Desempenho de Amplificadores Ópticos com Bombeamento e Injeção. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores) – Técnico Lisboa, Lisboa.

- SANTOS, L. M. M. Avaliação ambiental de processos industriais. 4ª ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2011.
- SANTOS, M. F. N.; BATTISTELLE, R. A. G.; HORI, C. Y.; JULIOTI, P. S. Importância da avaliação do ciclo de vida na análise de produtos: possíveis aplicações na construção civil, GEPROS. Gestão da Produção, Operações e Sistemas, v. 6, n. 2, p. 57-73, 2011.
- SCHINELLA, S.; MARQUET, D.; TANAKA, T.; CHAVANNE, X.; FRANGI, J. P. Research on ict service energy impact assessment method: how much energy to manufacture a chip, ITU Kaleidoscope: Building Sustainable Communities (K-2013), 2013 Proceedings. IEEE. Kyoto, Japan.
- SOO, V. K.; DOOLAN, M. Recycling Mobile Phone Impact on Life Cycle Assessment. Procedia CIRP, v. 15, p. 263-271, 2014.
- TAN, K. C. N. Life Cycle Assessment of a Mobile Phone. Dissertação (Mestrado) em Engenharia. University of Southern Queensland. Faculty of Engineering and Surveying, 2005.
- UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME. Life Cycle Management: A Business Guide to Sustainability. 2007.