

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS – UFSCar
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA – CCET
DEPARTAMENTO DE QUÍMICA – DQ
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

ANDERSON JUN TIYODA

TRANSFERÊNCIA DE ELÉTRONS EM COMPLEXOS DE
RUTÊNIO (II) PERILENO DIIMIDA

SÃO CARLOS

2024

ANDERSON JUN TIYODA

TRANSFERÊNCIA DE ELÉTRONS EM COMPLEXOS DE
RUTÊNIO(II) PERILENO DIIMIDA

Trabalho de conclusão de curso apresentada ao
Departamento de Química da Universidade Federal de São
Carlos, para obtenção do título de Bacharel em Química
Orientadora: Profa. Dra. Rose Maria Carlos

SÃO CARLOS

2024

**FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS****DEPARTAMENTO DE QUÍMICA - DQ/CCET**

Rod. Washington Luís km 235 - SP-310, s/n - Bairro Monjolinho, São Carlos/SP, CEP 13565-905

Telefone: (16) 33518206 - <http://www.ufscar.br>

DP-TCC-FA nº 19/2024/DQ/CCET

Graduação: Defesa Pública de Trabalho de Conclusão de Curso**Folha Aprovação (GDP-TCC-FA)****FOLHA DE APROVAÇÃO****ANDERSON JUN TIYODA****TRANSFERÊNCIA DE ELÉTRONS EM COMPLEXOS DE RUTÊNIO (II) PERILENO DIIMIDA****Trabalho de Conclusão de Curso****Universidade Federal de São Carlos – Campus São Carlos**

São Carlos, 26 de julho de 2024

ASSINATURAS E CIÊNCIAS

Cargo/Função	Nome Completo
Orientador	Profa. Dra. Rose Maria Carlos
Membro da Banca 1	MSc Lorena Maria Borges Pereira
Membro da Banca 2	Dr. Gabriel Henrique Ribeiro



Documento assinado eletronicamente por **Ricardo Samuel Schwab, Professor(a)**, em 26/07/2024, às 11:00, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site <https://sei.ufscar.br/autenticacao>, informando o código verificador **1523878** e o código CRC **1DAC5183**.

Referência: Caso responda a este documento, indicar expressamente o Processo nº 23112.001933/2024-38

SEI nº 1523878

Modelo de Documento: Grad: Defesa TCC: Folha Aprovação, versão de 02/Agosto/2019

Agradecimentos

Inicialmente gostaria de agradecer meus pais, Matsue e Nilson por sempre buscar o bem estar dos filhos, em prol do bem estar próprio, muito obrigado pela disciplina e educação que obtive de vocês. Agradeço minha irmã Marize e meu cunhado Guilherme pelas viagens, conversas, entre outros rolês quando volto para casa, todos vocês deixavam o ambiente mais confortável possível.

À profa. Dra. Rose Maria Carlos por me aceitar como aluno no laboratório, dedicar o seu tempo para a qualquer solucionar minhas dúvidas hora, conversas e entre outros aconselhamentos.

Aos meus amigos do LaFIB, Rafaella Silva, Pedro, Bárbara, Rafaela Paixão, pelas conversas, brincadeiras, festas de confraternização, por tornarem o ambiente muito divertido e leve, e sempre estarem dispostos a me ensinar sobre novas técnicas ou tirar minhas dúvidas. Um agradecimento especial a Lorena e Ana pelas conversas, pausas para um “lanche da tarde” e pelos incentivos para fazer as tarefas dentro do prazo.

Aos meus colegas e amigos que eu fiz, ao longo da minha graduação cada um de vocês me ensinaram novas coisas, e deixaram o ambiente da universidade, com certeza mais leve. Em especial para Anderson, Letícia Satiko e Guilherme, pelos papos, disciplinas que cursamos juntos, sinucas quase todas às quinta-feira e rolês, obrigado pelo tempo que compartilhamos juntos.

A todos os funcionários da UFSCar na qual tive algum contato pela forma e dedicação que vocês têm com a universidade.

Resumo

Os complexos polipiridínicos rutênio(II) estão entre os complexos metálicos mais estudados, com diversos artigos e capítulos de livros devidos a aplicação em diferentes frentes de pesquisa incluindo as áreas de tecnologia e médicas, como fotocatalisadores, e fotossensibilizadores para ativação do oxigênio singleto entre outras.

A fotoquímica é um dos processos mais importante para a sobrevivência dos seres vivos devido a fotossíntese, partindo de moléculas simples nas plantas e a luz solar conseguem produzir glicose para as plantas e gás oxigênio, sendo o último essencial para os seres vivos aeróbicos.

Os complexos polipiridínicos de Ru(II) com ligantes do tipo perileno diimidazóis (PDI) apresentam características interessantes para os estudos de transferência de elétrons e carga como, o tempo de vida do estado tripleto longos, na escala de nanosegundos. E devido este tempo elevado os complexos podem ser aplicados em terapia fotodinâmica para a produção de oxigênio singleto.

PALAVRAS-CHAVES: Complexos polipiridínicos de rutênio(II); transferência de elétrons; perileno diimidazóis

Abstract

Ruthenium(II) polypyridyl complexes are among the most studied metal complexes, with numerous articles and book chapters dedicated to them due to their properties being used in technological and medical fields, such as applications in photocatalysis and dynamic phototherapy, among others.

Photochemistry is one of the most important processes for living beings due to photosynthesis, which starts from simple molecules and sunlight to efficiently produce a complex carbohydrate and oxygen gas, the last being essential for aerobic living beings.

Ru(II) complexes with perylene diimide (PDI) ligands exhibit interesting characteristics for studies of electron and charge transfer, such as long triplet state lifetimes in the nanosecond range. Due to this long lifetime, the complexes can be applied in the production of singlet oxygen and for photodynamic therapy.

KEY-WORDS: Ruthenium(II) polypyridyl complexes, electron-transfer; perylene diimide

Lista de Figuras

Figura 1: Representação dos orbitais d do centro metálico livre e os orbitais d em um complexo octaédrico.	12
Figura 2: Estruturas dos orbitais d.....	13
Figura 3: Estruturas de BINAPS.....	13
Figura 4: Diferentes gerações de catalisadores de Grubbs.	14
Figura 5: Diagramas de energia dos orbitais moleculares do oxigênio molecular (a) e oxigênio singleto (b).	16
Figura 6: Diagrama de orbital molecular de um complexo metálico octaédrico e as possíveis transições eletrônicas.....	17
Figura 7: Diagrama de Jablonsky simplificado.	18
Figura 8: Diagrama de Jablonski simplificado com elétrons.....	19
Figura 9: Representação da transferência de energia por dois mecanismos.....	20
Figura 10: Mecanismo ressonante.	20
Figura 11: Mecanismo de troca.	21
Figura 12: Diagrama de Jablonski do complexo $[\text{Ru}(\text{phen})_2(\text{PDI})]^{2+}$	22
Figura 13: Diagrama de Jablonski do complexo $[\text{Ru}(\text{phen})_2(\text{PDI})]^{2+}$ com os orbitais moleculares	23

Lista de Esquema

Esquema 1: Hidrogenação de um composto orgânico com uso do catalisador Ru(II)-BINAP	14
---	----

Lista de Siglas e Abreviações

Rutênio - Ru

Piridina – py

Oxigênio molecular – O₂

Oxigênio singleto – ¹O₂

2,2' – bipyridina – bpy

1,10 – Fenantrolina – phen

MC – Centrado no metal

LC – Centrado no ligante

LMCT – Transferência de carga do ligante para o metal

MLCT – Transferência de carga do metal para o ligante

Å – Angstrom (10⁻¹⁰ m)

HOMO – Orbital molecular preenchido de maior energia

LUMO – Orbital molecular desocupado de menor energia

PDI – Perileno diimida

³MLCT – Estado Excitado Tripleto transferência de carga do metal para o ligante

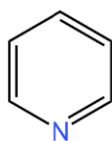
ISC – Cruzamento intersistema

pPDIp – Perileno diimina funcionalizado com fenantrolina nas posições imida

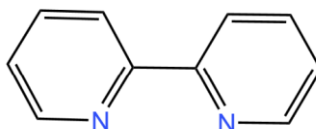
ERO – Espécie Reativa de Oxigênio

Lista de Fórmula e Estruturas de Compostos

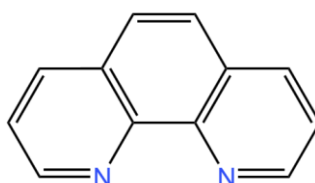
Piridina



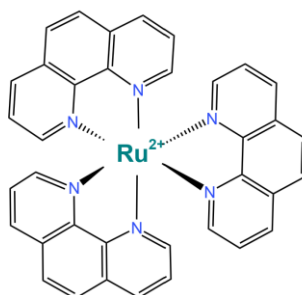
2,2' – bipyridina



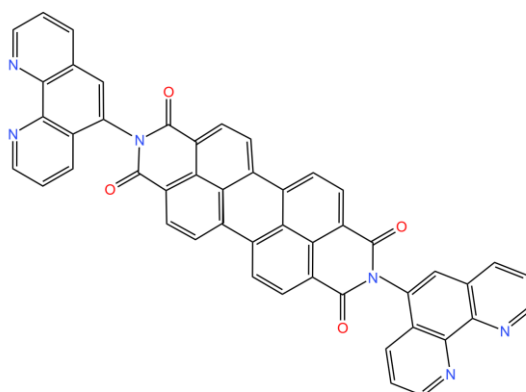
1,10 – fenantrolina

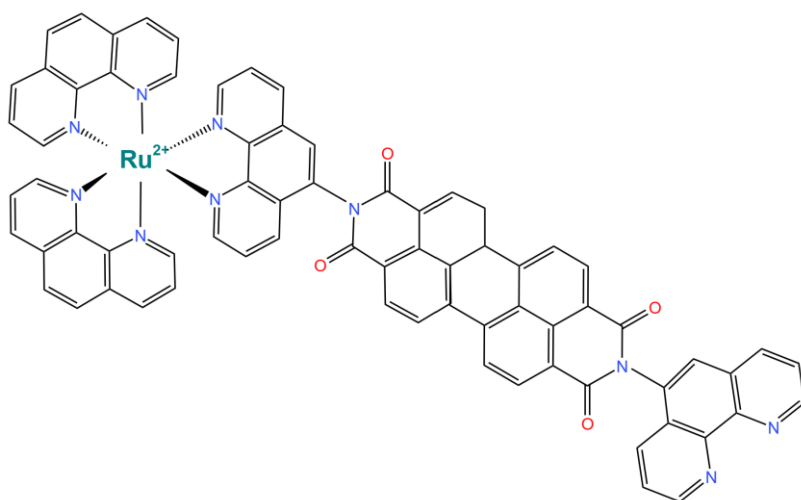
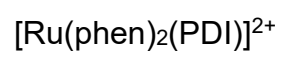


[Ru(phen)₃]²⁺



pPDIp





Sumário

1. Introdução	12
1.1. Rutênio	12
1.2. Complexos de Rutênio (II) polipiridínicos	14
2. Revisão da Literatura	16
2.1. Processos fotoquímicos	16
2.1.1. Processos fotoquímicos para complexos de metal de transição octaédrico	17
2.2. Transferência de energia	19
2.2.1. Mecanismo Ressonante	20
2.2.2. Mecanismo de Troca	21
2.3. Transferência de energia em complexos de rutênio (II) polipiridínicos	21
2.3.1. Complexos de rutênio (II) – perileno diimidazóis	21
3. Considerações Finais	24
4. Referências Bibliográficas	25

1. Introdução

1.1. Rutênio

O rutênio é um metal de transição, e se encontra no mesmo grupo do elemento ferro, e possui a seguinte distribuição eletrônica: $[\text{Kr}] 4d^7 5s^1$, sendo o símbolo químico Kr, Kriptônio.¹

Os complexos de rutênio mais estudados são os que apresentam o centro metálico Ru(II), no qual apresentam propriedades diamagnética, ou seja, não é atraído por um campo magnético externo. Possuem como característica o sistema d^6 e baixo spin, sem grandes exceções a geometria dos complexos de rutênio conhecidas são octaédricas.²

A Figura 1 mostra a alteração do orbital atômico d do íon metálico de rutênio(II) sem ligante para o orbital molecular d de um complexo octaédrico de rutênio(II).

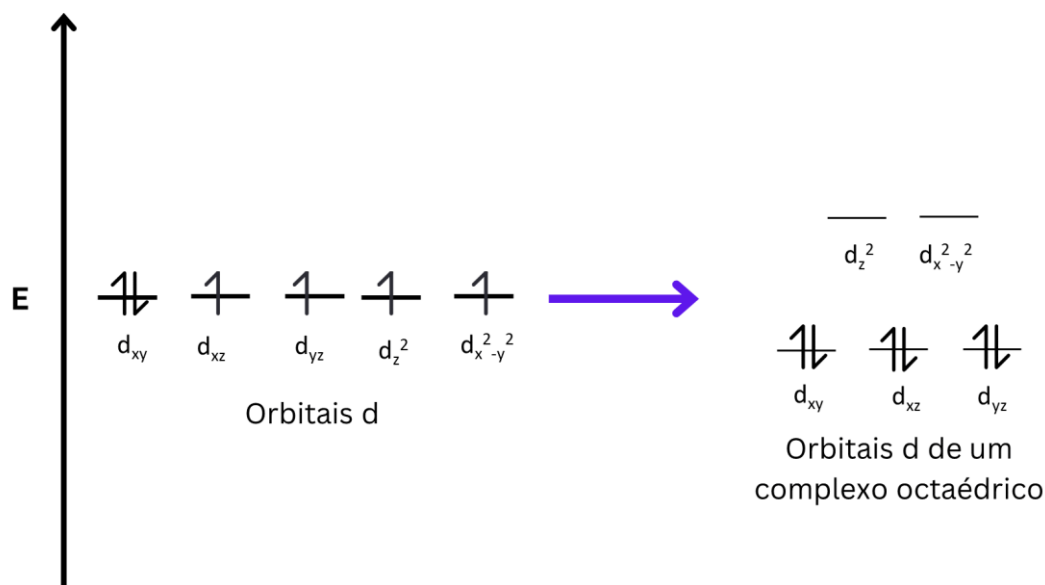


Figura 1: Representação dos orbitais d do centro metálico livre e os orbitais d em um complexo octaédrico. (Fonte: CALI, Mariana, 2023)

Ao analisar a figura 1, os orbitais d do íon metálico são degenerados, ou seja, possuem a mesma energia, porém em um complexo de geometria octaédrica, a degenerescência é perdida devido a repulsão eletrônica dos elétrons do íon metálico e do par de elétrons não ligante dos ligantes em um campo octaédrico. Isto ocorre porque os orbitais d_{xy} , d_{xz} e d_{yz} estão localizados entre os eixos cartesianos onde os

seis ligantes estão localizados. Por outro lado, os orbitais d_{z^2} e $d_{x^2-y^2}$ que estão direcionados entre os três eixos cartesianos sentindo maior repulsão dos pares de elétrons dos ligantes e devido a isto se tornam mais instáveis e ficam localizados acima dos orbitais d_{xy} , d_{xz} e d_{yz} . Como representado pela estruturas dos orbitais d, na figura 2:

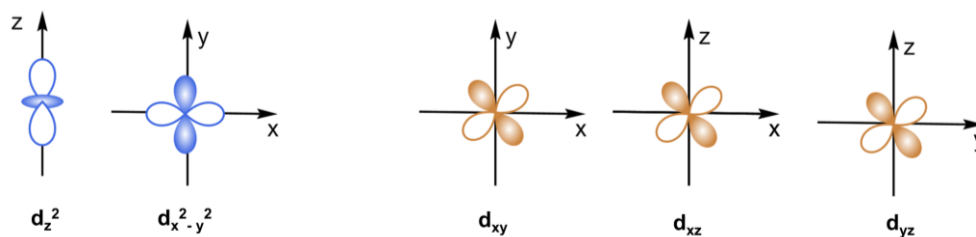


Figura 2: Estruturas dos orbitais d. (Fonte: Libretexts)

Os complexos de polipiridínicos de Ru(II) foram motivos de dois prêmios Nobel, o primeiro em 2001, para o japonês Ryoji Noyori, juntamente com Karl Barry Sharpless e William Standish Knowles, pelas suas contribuições nas pesquisas em hidrogenação enantiosseletiva em síntese orgânica, utilizando catalisadores de Ru(II)-BINAP. O ligante BINAP está representado na figura 3, e um esquema de hidrogenação utilizando um catalisador Ru(II)-BINAP está representado no esquema 1.³

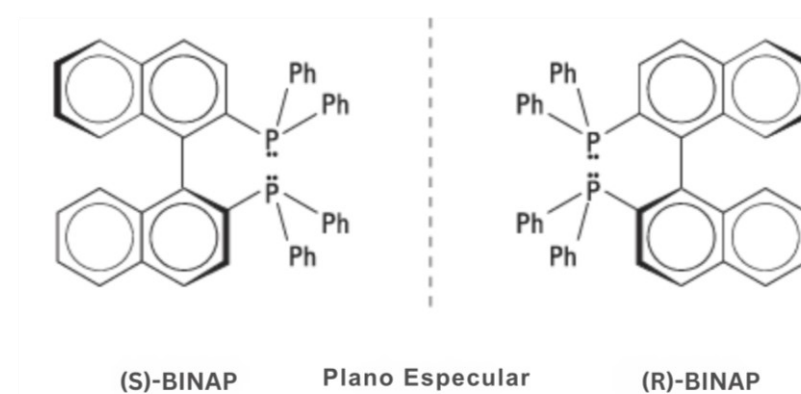
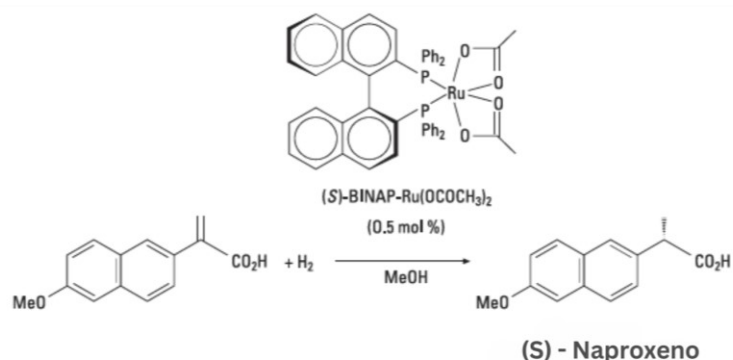


Figura 3: Estruturas de BINAPS. (Fonte: Modificado de Nobel Prize, The Nobel Prize In Chemistry 2001)



Esquema 1: Hidrogenação de um composto orgânico com uso do catalisador Ru(II)-BINAP. (Fonte: Modificado de Nobel Prize, The Nobel Prize in Chemistry 2001)

O outro Prêmio Nobel de Química, em que complexos de Ru estão envolvidos é o Prêmio Nobel de Química de 2005, em que o trio Yves Chauvin, Robert H. Grubbs e Richard R. Schrock dividiram o prêmio “pelo desenvolvimento de método metálico na síntese orgânica”, a metátese é definida como uma reação de duplas ligações no qual ocorre troca em si. Grubbs e seus colaboradores conseguiram sintetizar os catalisadores de Ru, com os melhores rendimentos de síntese, conhecidos como catalisadores de Grubbs, como representados na figura 4.^{4,5}

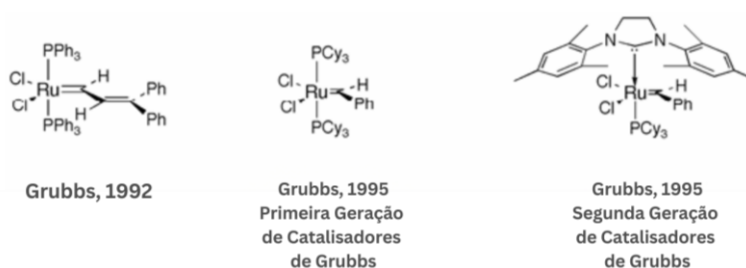


Figura 4: Diferentes gerações de catalisadores de Grubbs. (Fonte: Modificado de Nobel Prize, The Nobel Prize in Chemistry 2005)

1.2. Complexos de Rutênio (II) polipiridínicos

Os complexos de Ru(II) com os ligantes polipiridínicos são abundantemente estudados devido as suas diversas propriedades, como luminescência, reações fotocatalíticas, entre outros.⁶ Os ligantes polipiridínicos mais comuns são a 2,2' – bipyridina (bpy) e a 1,10 – fenantrolina (phen).⁷

Os complexos Ru(II) polipiridínicos podem atuar como fotossensibilizadores em processos químicos e/ou físicos. Este processo ocorre inicialmente pela absorção de luz que por um processo não radiativo alcança os estados excitados de multiplicidade de spin tripleto que retorna ao estado fundamental pela liberação do excesso de energia de absorção na forma de luz (emissão). A característica fotossensibilizadora deste complexos considerando o oxigênio molecular como supressor ocorre pela transferência de energia de emissão para o oxigênio molecular para a formação de oxigênio singleto ou por um processo de transferência de elétrons para o oxigênio molecular produzindo as espécies reativas do oxigênio ($O_2^{\bullet-}$, $\bullet-OH$, H_2O_2).⁸ Para a determinação da multiplicidade do spin é utilizada a equação 1:

$$2S + 1 \qquad \qquad \qquad \text{(equação 1)}$$

Onde, S é o momento angular total do spin, que é a quantidade de elétrons desemparelhados em um átomo ou molécula, no caso do oxigênio molecular (O_2) sua multiplicidade é tripleto, pois pelo seu diagrama de energia possui dois elétrons desemparelhados, ou seja, um par de elétrons desemparelhados. Já no caso do oxigênio singleto (1O_2), como seu próprio nome confirma que é singleto, pois como a molécula não tem pares de elétrons desemparelhados, assim o valor de S é zero, e o resultado da equação 1 é um, denominado singleto. A representação dos diagramas de energia do O_2 e do 1O_2 estão representados na figura 5.

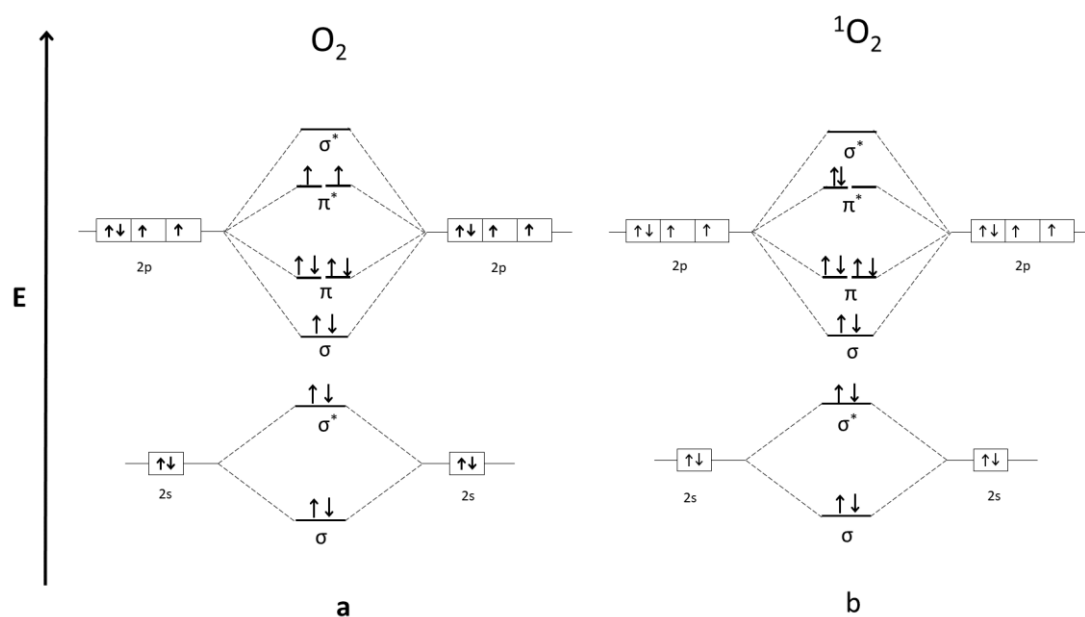
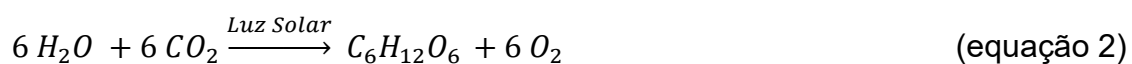


Figura 5: Diagramas de energia dos orbitais moleculares do oxigênio molecular (a) e oxigênio singlete (b). (Fonte: Adaptado De JASEK, Krzysztof et al, 2022)

2. Revisão da Literatura

2.1. Processos fotoquímicos

Um processo fotoquímico é definido como a interação da luz com a matéria, desencadeando reações importantes para as áreas química, física e biológica.⁹ Na natureza a fotoquímica está correlacionada com a vida, pois é requisitada para a fotossíntese, a reação ocorre em diversas etapas, mas a equação global está representada na equação 2:



Assim, pela equação 2, uma planta a partir de água, gás carbônico e luz solar produz glicose – um monossacarídeo importante para fornecer energia para a planta, e outros animais – e gerar oxigênio molecular que é essencial para os seres vivos.¹⁰

2.1.1. Processos fotoquímicos para complexos de metal de transição octaédrico

No caso de complexos de metais de transição octaédricos, os orbitais moleculares do complexo são constituídos pela contribuição do centro metálico e do ligante na figura 6.

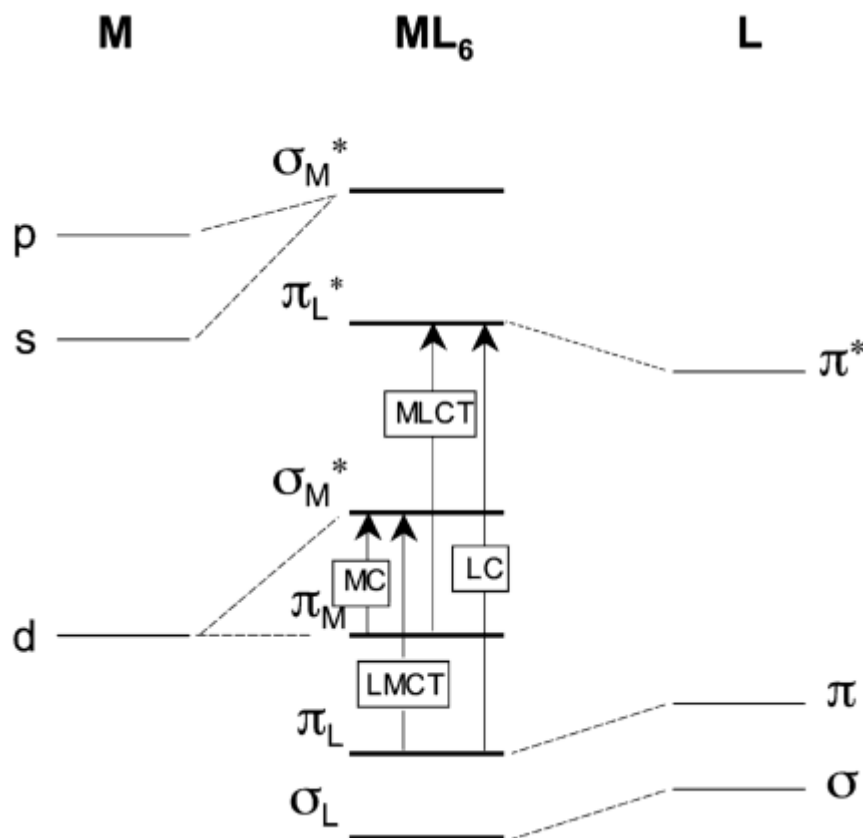


Figura 6: Diagrama de orbital molecular de um complexo metálico octaédrico e as possíveis transições eletrônicas. (fonte: BALZANI, Vincenzo et al, 2007)

Os tipos de transições eletrônicas que podem ocorrer em um complexo metálico são: centrada no metal (MC) que é uma transição que ocorre entre os orbitais $\pi_M \rightarrow \sigma_M^*$ do metal, centrada no ligante (LC) é uma transição que ocorre entre os orbitais $\pi_L \rightarrow \pi_L^*$ do ligante, transferência de carga do ligante para o metal (LMCT) é uma transição do orbital ligante π_L para o orbital σ_M^* do metal ($\pi_L \rightarrow \sigma_M^*$) e transferência de carga do *metal para ligante* (MLCT) é uma transição do orbital do metal π_M para o orbital do ligante π_L^* ($\pi_M \rightarrow \pi_L^*$).⁹ Absorção de luz e o decaimento do estado excitado

Para analisar a absorção e os diferentes tipos de decaimento podemos usar o diagrama de Jablonski, como representado na figura 7.

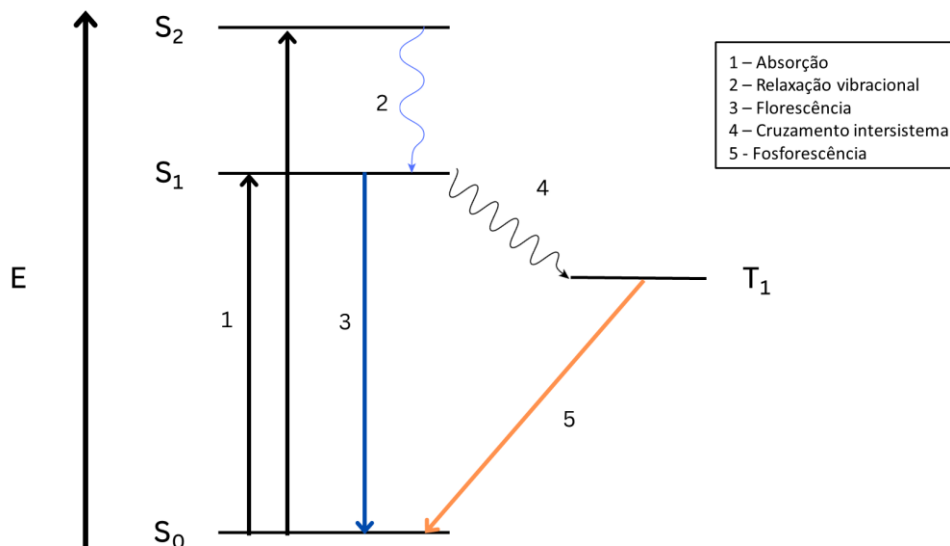


Figura 7: Diagrama de Jablonsky simplificado. (Fonte: Adaptado de BALZANI, Vincenzo et al, 2007)

A figura 7 indica o estado S₀ que é o estado fundamental, o estado S₁ e S₂ são os estados no qual um elétron ao absorver um fóton proveniente de uma fonte luminosa poderá alcançar, este processo é denominado absorção (1). Quando um elétron atinge o nível S₂ ele pode regressar para o nível S₁, bem como para S₀ por um processo de relaxação vibracional (2) que é uma forma de decaimento de energia não radiativa, pois a molécula dissipa a energia através dos modos vibracionais. Quando os elétrons retornam ao estado fundamental sem ocorrer a inversão de spin e emitindo um fóton, o processo é denominado fluorescência (3). Outra emissão não radiativa ocorre quando os elétrons estão no nível S₁ e parte para T₁, ocorrendo a inversão do spin, o processo ocorre por um cruzamento intersistema (4). Por fim quando ocorre uma emissão do nível T₁ para o S₀, é necessário a inversão do spin para regressar ao estado fundamental, o processo se denomina fosforescência (5).^{9,11}

A figura 8 representa um diagrama de Jablonski, considerando o deslocamento dos elétrons no processo fotofísico descrito na Figura 7 a partir dos estados excitados S_1 .

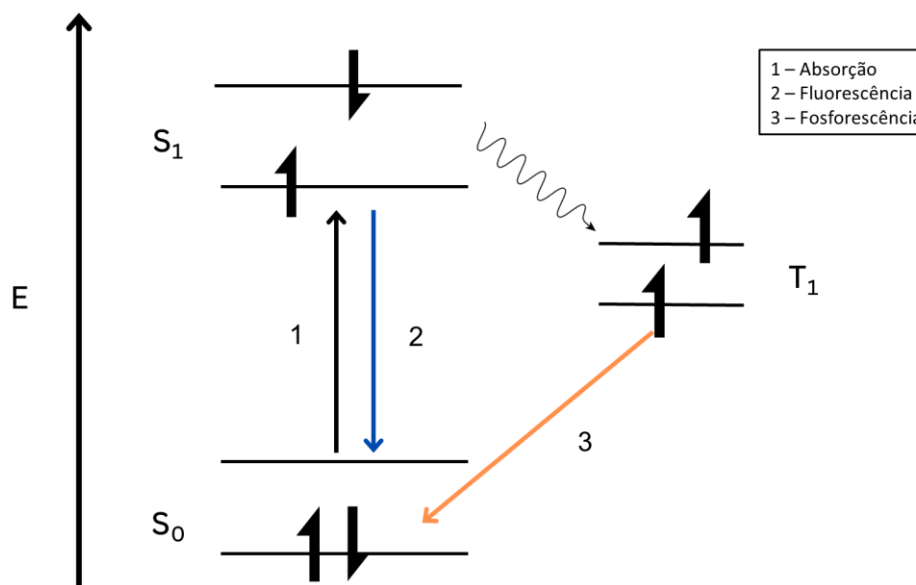


Figura 8: Diagrama de Jablonski simplificado com elétrons. (Fonte: Adaptado de BALZANI, Vincenzo et al, 2007)

2.2. Transferência de energia

O processo de transferência de energia de um fotossensibilizador (Doador) para uma molécula receptora de energia (Receptor) entre duas moléculas pode ocorrer por dois mecanismos diferentes: ressonante e troca, o produto é o mesmo para os dois mecanismos, no entanto o caminho percorrido se difere entre si. A figura 8 é uma representação dos dois tipos de mecanismo.

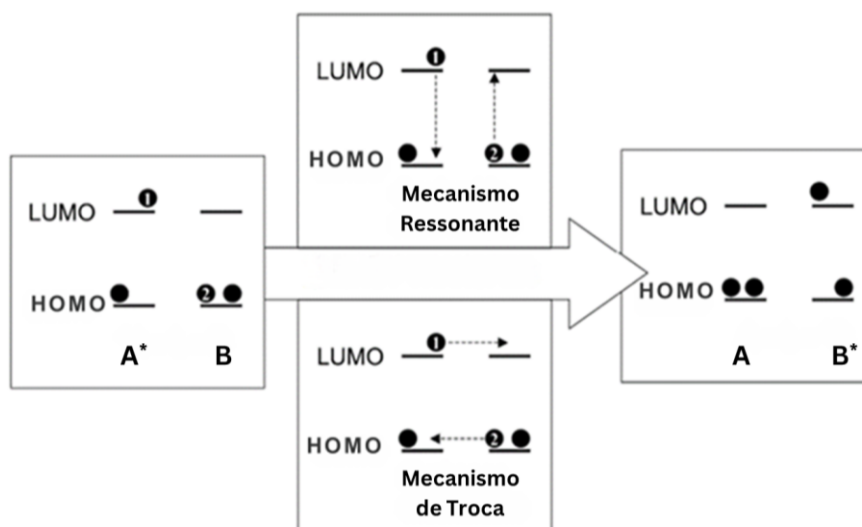


Figura 9: Representação da transferência de energia por dois mecanismos. (Fonte: Modificado de BALZANI, Vincenzo et al, 2007)

2.2.1. Mecanismo Ressonante

O mecanismo ressonante também é conhecido “Antena” ou como mecanismo Coulômbico ou tipo *Förster* é um mecanismo que não depende do contato entre o D e o R por isso é descrito como sendo de “longo alcance”, mas requer pelo menos a sobreposição parcial do espectro de absorção do receptor de energia como espectro de emissão do doador.^{9,12} A figura 9 representa este tipo de mecanismo.

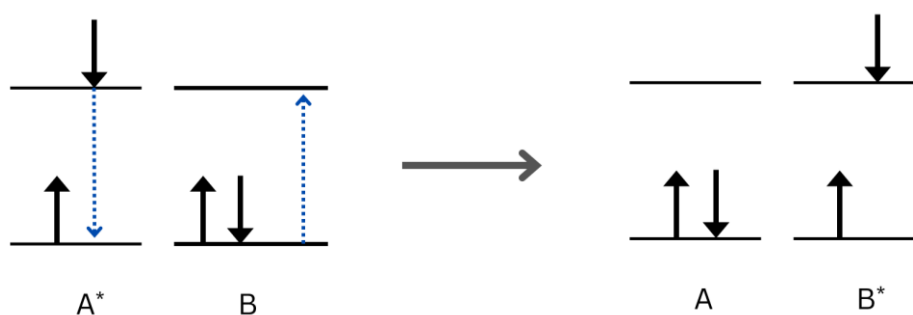


Figura 10: Mecanismo ressonante. (Fonte: Adaptado de FUJIMOTO, Kazuhiro J., 2021)

Este mecanismo é conhecido como dipolo-dipolo, inicialmente a espécie doadora (A*) já sofreu um processo de absorção em seguida o elétron excitado retorna ao estado fundamental e um elétron da espécie receptora (B) será excitado para um

maior nível de energia. Um exemplo típico deste mecanismo é a transferência de energia do tipo singleto-singleto entre moléculas aromáticas grandes.⁹

2.2.2. Mecanismo de Troca

O outro mecanismo de transferência de energia é o Mecanismo Difusional” que é um mecanismo de troca ou tipo *Dexter* que é um mecanismo de “curto-alcance” em distâncias menores que 3,9 Å. Neste mecanismo ocorre a transferência de um elétron do orbital molecular vazio de menor energia (LUMO) do doador para o LUMO do receptor, e outro elétron do Orbital Molecular de Maior energia preenchido (HOMO) do receptor é transferida para o HOMO do doador.⁹ A figura 10 esquematiza o mecanismo troca

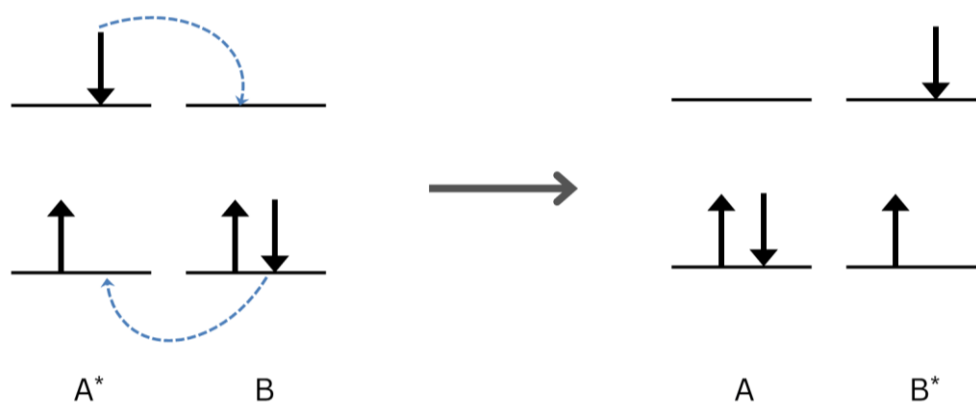


Figura 11: Mecanismo de troca. (Fonte: Adaptado de FUJIMOTO, Kazuhiro J., 2021)

2.3. Transferência de energia em complexos de rutênio (II) polipiridínicos

Os complexos de rutênio (II) polipiridínicos são muito estudados devido as suas características nas áreas de eletroquímica e fotoquímica. Por apresentarem um tempo de vida longo do decaimento do estado excitado tripleto MLCT (³MLCT) para o estado fundamental (S_0) pode ocorrer de transferência de elétrons para uma outra molécula. Um complexo muito estudado é o $[Ru(bpy)_3]^{2+}$ e apresenta a absorção em 450 nm é uma transição do tipo MLCT.¹³

2.3.1. Complexos de rutênio (II) – perileno diimidazóis

A classe de perileno diimidazóis (PDI) são reconhecidos por apresentarem estabilidade térmica e fotoquímica, e alta absorção na região visível do espectro eletrônico. Os PDI são ótimos receptores de carga devido a geometria planar e anéis

aromáticos na sua composição, e estudos indicam que quando o PDI está acoplado com um átomo pesado, como um metal da segunda série de transição, ocorre o favorecimento do cruzamento intersistema (ISC) gera o estado excitado tripleto do PDI ($^3^*\text{PDI}$) que tem tempo de vida longo na escala de microssegundos (μs) em relação a fluorescência que está na escala de nanossegundos.^{14,15}

Por serem ótimos receptores de carga, os PDI podem sofrer um processo de transferência de carga de um fotossensibilizador (Doador de energia de emissão) para o PDI(receptor de energia)..¹⁶

O complexo $[\text{Ru}(\text{phen})_2(\text{pPDIp})]^{2+}$, onde pPDIp é o perileno diimida funcionalizado com fenantrolina nas posições imida, apresenta potencial para reações de transferência de energia, como a formação de $^1\text{O}_2$, como representado na figura 11.¹⁶

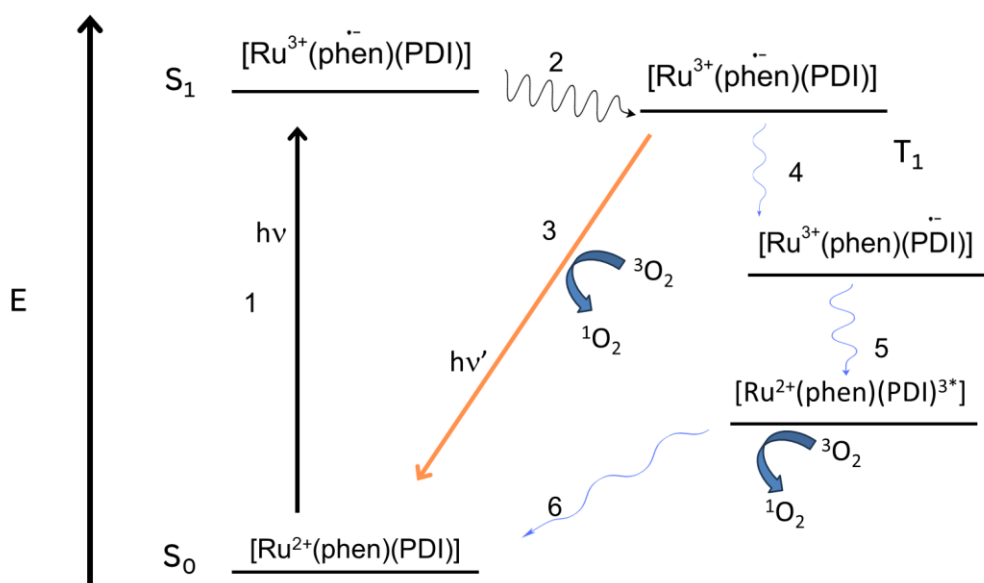


Figura 12: Diagrama de Jablonski do complexo $[\text{Ru}(\text{phen})_2(\text{PDI})]^{2+}$, onde (1) é uma transição MLCT, (2) cruzamento intersistema, (3) fosforescência, (4) Estado de separação de carga, (5) Recombinação de carga para a formação do tripleto do PDI, (6) Recombinação de carga para o estado fundamental

O oxigênio singlete havia sido mencionado anteriormente, e tem seu diagrama de orbital molecular encontrado na figura 4, e desencadeia funções importantes para diversas áreas como fotocatalise, degradação de poluentes orgânicos e terapia fotodinâmica para o tratamento de câncer.¹⁶ O $^1\text{O}_2$ pertence a uma classe chamada Espécie Reativa de Oxigênio (EROs) que possuem alto potencial de oxidação.

O $^1\text{O}_2$ é reativo, pois tem um orbital π^* vazio fazendo reagir com outras moléculas que tenham densidade eletrônica elevada para poderem ocupar o orbital vazio. A figura 12 descreve o diagrama de Jablonski de um complexo $[\text{Ru}(\text{phen})_2(\text{PDI})]^{2+}$, no entanto com os orbitais e elétrons das espécies:

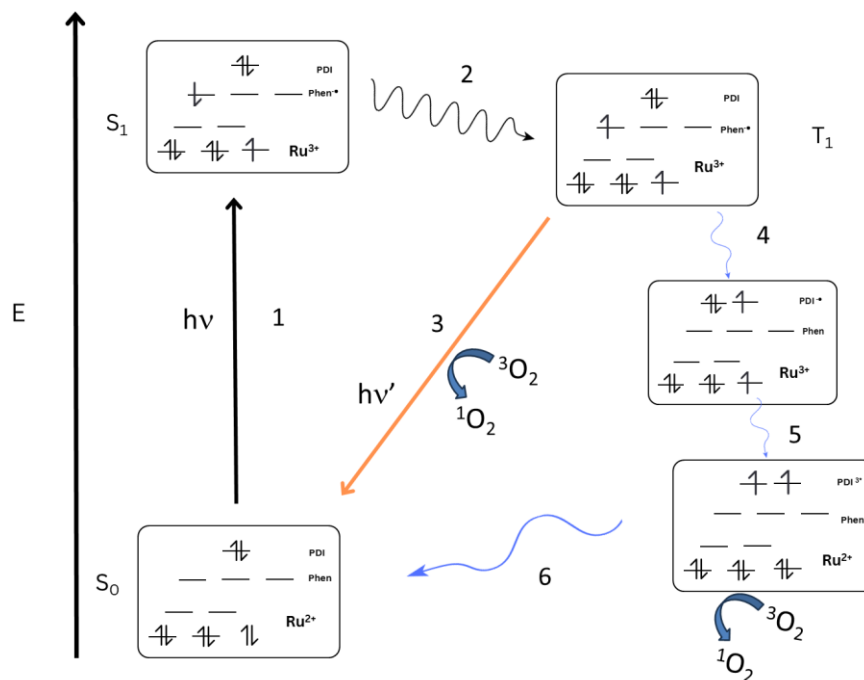


Figura 13: Diagrama de Jablonski do complexo $[\text{Ru}(\text{phen})_2(\text{PDI})]^{2+}$ com os orbitais moleculares, onde (1) é uma transição MLCT, (2) cruzamento intersistema, (3) fosforescência, (4) Estado de separação de carga, (5) Recombinação de carga para a formação do tripleto do PDI, (6) Recombinação de carga para o estado fundamental

3. Considerações Finais

Os complexos de Ru (II) polipiridínicos possuem orbital d^6 e são de baixo spin, por apresentarem essas características, os complexos são estáveis a degradação térmicas e fotoquímicas. O complexo como $[\text{Ru}(\text{bpy})_3]^{2+}$ se absorverem um fóton na região de 450 nm poderá apresentar propriedades interessante como a transferência de energia.

Um exemplo de transferência de energia na natureza é a fotossíntese, que partindo de moléculas simples e energia na forma de luz solar, pode produzir uma macromolécula complexa, como a glicose. Uma ideia similar é utilizada para armazenamento de energia, e o uso da mesma através de diversos processos de transferência de elétrons e transferência de carga do complexo.

A classe de complexos de Ru (II) com PDI apresenta o comprimento de onda de absorção próximo a região do Infravermelho (IR), e apresentam longo tempo de vida no estado tripleto, assim são estudados para a formação de oxigênio singleto e para a terapia fotodinâmica.

4. Referências Bibliográficas

- 1- Royal Society of Chemistry, Ruthenium. Disponível em <<https://www.rsc.org/periodic-table/element/44/ruthenium>>. Acesso em 10/07/2024;
- 2- HOUSECROFT, C. E.; SHARPE, A. G. Inorganic chemistry, 4 ed, Pearson, 2012;
- 3- Press release. Nobel Prize Outreach AB 2024. Disponível em <<https://www.nobelprize.org/prizes/chemistry/2001/press-release/>>. Acesso em 10/07/2024;
- 4- Advanced information. Nobel Prize Outreach AB 2024. Disponível em <<https://www.nobelprize.org/prizes/chemistry/2005/advanced-information/>>. Acesso 11/07/2024
- 5- Revista FAPESP. Os vencedores do Nobel 2005. Disponível em <<https://revistapesquisa.fapesp.br/os-vencedores-do-nobel-2005/>>. Acesso em 11/07/2024
- 6- COTTON, F. A. et al, Advanced Inorganic Chemistry, 6 th, Wiley, 1999.
- 7- BALZANI, Vincenzo; JURIS, Alberto. Photochemistry and photophysics of Ru (II)-polypyridine complexes in the Bologna group. From early studies to recent developments. **Coordination Chemistry Reviews**, v. 211, n. 1, p. 97-115, 2001.
- 8- Aquino Junior, A. E. de; et al. Simplificando a Terapia Fotodinâmica para profissionais de saúde. São Carlos, IFSC/USP, 2023. Disponível em https://repositorio.usp.br/directbitstream/8c9aef3f-70ca-46ac-a387-917d918218d5/PROD035253_3172784.pdf. Acesso em 11/07/2024;
- 9- BALZANI, Vincenzo et al. **Photochemistry and photophysics of coordination compounds: overview and general concepts**. Springer Berlin Heidelberg, 2007.
- 10- ABRAHAMSSON, Maria. **Tuning of the Excited State Properties of Ruthenium(II)-Polypyridyl Complexes**. 2006. Tese. Faculty of Science and Technology, Uppsala University, 2006;
- 11- MCGHEE, Kirsty et at. Ossila: The Jablonski Diagram. Disponível em <https://www.ossila.com/pages/jablonski-diagrams>. Acesso em 12/07/2024;
- 12- FUJIMOTO, Kazuhiro J. Electronic couplings and electrostatic interactions behind the light absorption of retinal proteins. **Frontiers in Molecular Biosciences**, v. 8, p. 752700, 2021.
- 13- MISHRA, Ajay Kumar; MISHRA, Lallan (Ed.). **Ruthenium chemistry**. CRC Press, 2018.
- 14- SANTOS, Edjane R. dos et al. Photoinduced energy and electron-transfer reactions by polypyridine ruthenium (II) complexes containing a derivatized perylene diimide. **The Journal of Physical Chemistry C**, v. 120, n. 40, p. 22831-22843, 2016.
- 15- DECKERS, Jasper et al. Heavy-Atom-Free Bay-Substituted Perylene Diimide Donor-Acceptor Photosensitizers. **ChemPhysChem**, v. 22, n. 14, p. 1488-1496, 2021.
- 16- CAMPOS, Isabele Aparecida Soares de. Complexos de Ru(II)-perileno diimida para ativação do oxigênio singleto: terapia fotodinâmica e imagem celular no tratamento de câncer melanoma. 2023. [280 f]. Tese (Doutorado em Química Inorgânica) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos.