

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”

Instituto de Química

Campus de Araraquara – SP

AMANDA NINA SARGI DO NASCIMENTO

UTILIZAÇÃO DE FIBRAS ÓPTICAS PLÁSTICAS E COLUNAS CAPILARES
COMO CONCENTRADORES SOLARES (CS) E CONCENTRADORES SOLARES
LUMINESCENTES (CSL)

ARARAQUARA – SP

2021

AMANDA NINA SARGI DO NASCIMENTO

UTILIZAÇÃO DE FIBRAS ÓPTICAS PLÁSTICAS E COLUNAS CAPILARES
COMO CONCENTRADORES SOLARES (CS) E CONCENTRADORES SOLARES
LUMINESCENTES (CSL)

Dissertação apresentada ao Instituto de
Química, Universidade Estadual Paulista, como
parte dos requisitos para obtenção do título de
Mestre em Química.

Orientador: Sidney José de Lima Ribeiro.

ARARAQUARA – SP

2021

FICHA CATALOGRÁFICA

N244u Nascimento, Amanda Nina Sargi do
Utilização de fibras ópticas plásticas e colunas capilares
como concentradores solares (CS) e concentradores solares
luminescentes (CSL) / Amanda Nina Sargi do Nascimento. –
Araraquara : [s.n.], 2021
42 f. : il.

Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual Paulista,
Instituto de Química
Orientador: Sidney José Lima Ribeiro

1. Coletores solares. 2. Sistemas de energia fotovoltaica.
3. Luminescência. 4. Fibras ópticas. 5. Energia solar.
I. Título.

Bibliotecária Responsável: Ana Carolina Gonçalves Bet - CRB8/8315

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: **Utilização de fibras ópticas plásticas e colunas capilares como concentradores solares (CS) e concentradores solares luminescentes (CSL)**

AUTORA: AMANDA NINA SARGI DO NASCIMENTO

ORIENTADOR: SIDNEY JOSE LIMA RIBEIRO

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Mestra em QUÍMICA, pela Comissão Examinadora:



Prof. Dr. SIDNEY JOSE LIMA RIBEIRO (Participação Virtual)
Departamento de Química Analítica, Físico-Química e Inorgânica / Instituto de Química - UNESP - Araraquara



Prof. Dr. JOSÉ MAURÍCIO ALMEIDA CAIUT (Participação Virtual)
Departamento de Química / Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras - USP - Ribeirão Preto



Prof. Dr. EDUARDO JOSÉ NASSAR (Participação Virtual)
Departamento de Química / Universidade de Franca-UNIFRAN

Araraquara, 18 de fevereiro de 2021

DADOS CURRICULARES

IDENTIFICAÇÃO

Nome: Amanda Nina Sargi do Nascimento

Nome em citações bibliográficas: Nascimento, A. N. S.

ENDEREÇO PROFISSIONAL

Instituto de Química – Universidade Estadual de São Paulo – UNESP

Araraquara-SP, 14801-970, Brazil

FORMAÇÃO ACADÊMICA/TITULAÇÃO:

Graduação em Química Tecnológica pela Universidade Federal de Mato Grosso do Sul (2013-2017);

PARTICIPAÇÃO EM EVENTOS CIENTÍFICOS

ICOOPMA 2018 – Apresentação de poster

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador pela confiança, paciência, dedicação e apoio nessa jornada.

Ao prof. Edison Pecoraro que muito me ensinou, apoiou e guiou.

Aos colegas de Laboratório pela convivência, amizade e colaboração.

À minha família pelo suporte, amor e carinho.

À CAPES pela bolsa concedida.

RESUMO

Concentradores Solares Cilíndricos se constituem em dispositivos que apresentam maior superfície de absorção de luz solar por volume quando comparados aos mais conhecidos concentradores solares planares. Os dispositivos propostos aqui utilizaram como meio ativo fibras ópticas e colunas capilares. A partir desta geometria cilíndrica foi utilizado fibra ótica de poli(metacrilato de metila) e também confeccionados Concentradores Solares e Concentradores Solares Luminescentes (CSL) utilizando poli(metacrilato de metila), além de preencher esses capilares com luminóforos ou água. Os luminóforos selecionados para a mistura de corantes – Rodamina 6G, B e 101, Acriflavina, Cumarina 153, DIDS, Solvent Green 7 – desse dispositivo de forma a converter a luz não utilizada eficientemente – na região do UV – pelas células fotovoltaicas de Si, em comprimentos de ondas mais compatíveis – na região do vermelho –, e, portanto, mais eficientes. Os resultados com o CS e os CSL demonstram a eficiência do protótipo em sensibilizar a célula solar e gerar energia, além de sugerir uma continuação do estudo com outros luminóforos e novas inovações e complementos.

Palavras-Chave: *luminescência, Energia solar, Fibras ópticas plásticas, Colunas capilares plásticas, coletores solares, sistema de energia fotovoltaica.*

ABSTRACT

Cylindrical Solar Concentrators are devices that have a larger surface area for absorbing sunlight by volume when compared to the most well-known planar solar concentrators. The devices proposed here used optical fibers and capillary columns as active medium. From this cylindrical geometry, optical fiber of poly (methyl methacrylate) was used and also Solar Concentrators and Luminescent Solar Concentrators (CSL) using poly (methyl methacrylate), in addition to filling these capillaries with luminophores or water. The luminophores selected for the dye mixture - Rhodamine 6G, B and 101, Acriflavin, Coumarin 153, DIDS, Solvent Green 7 - of this device in order to convert the light not used efficiently - in the UV region - by the photovoltaic cells of Si, at more compatible wavelengths - in the red region - and therefore more efficient. The results with the CS and the CSL demonstrate the efficiency of the prototype in sensitizing the solar cell and generating energy, in addition to suggesting a continuation of the study with other luminophores and new innovations and complements.

Keywords: luminescence, solar energy, Plastic optical fibers, Plastic capillary columns.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Adaptado de Correia, et al. 2014. Comparação da irradiância solar com o espectro de absorção de PFVs de silício cristalino, germânio e arseneto de galio. As áreas marcadas em verde e vermelho denotam as faixas do espectro “disponíveis” para <i>downconversion/down-shifting</i> e <i>upconversion</i> respectivamente.....	13
Figura 2 - Princípio de funcionamento de um Concentrador Solar Luminescente básico. Seta verde- luz solar de excitação do luminóforo. Seta vermelha- luz emitida pelo luminóforo que se propaga até a placa fotovoltaica.....	14
Figura 3 - Fotografia da Torre de Fabricação de Fibras Ópticas; (1) Aplicador de revestimento;(2) Sistema de puxamento de fibra, <i>capstan</i> ;(3) Sistema de alimentação do tubo;(4) forno.....	17
Figura 4. Protótipo de concentrador solar.....	18
Figura 5. Comportamento do Polimetaacrilato de metila no DSC.....	21
Figura 6. (A) Tubos de Polimetaacrilato de metila; (B) Carretel com duas colunas capilares poliméricas; C) Coluna capilar de Polimetaacrilato de metila.....	22
Figura 7. Espectros de Emissão das soluções aquosas para os luminóforos com as concentrações apresentadas na Tabela 2.....	24
Figura 8. Espectros da luz solar obtidos com os capilares e as fibras utilizados neste trabalho.....	27
Figura 9. A e C) Comparação de tensão e corrente elétrica entre as colunas capilares de PMMA e as fibras conduzindo luz até a célula solar no protótipo, com a cuba vazia; B e D) Comportamento da tensão elétrica gerada pela PFV durante o dia de coleta de dados.....	29
Figura 10. A,C e E) Comparação entre as colunas capilares de PMMA (com água Milli-Q e com a solução aquosa de corantes) e as fibras conduzindo luz até a célula solar no protótipo com a cuba preenchida com água Mili-Q;B, D e F....	30
Figura 11. Resultado obtidos para colunas capilares de PMMA e as fibras no protótipo com a cuba preenchida com a mistura de corantes.....	32
Figura 12. A) Coluna capilar polimérica preenchida com solução de corantes exposta a luz solar; B) Coluna capilar polimérica preenchida com solução de	

corantes exposta a luz artificial; C) Coluna capilar preenchida com solução de corantes após 7 horas de exposição a luz solar exposta a luz solar; D) Coluna capilar preenchida com solução de corantes após 7 horas de exposição a luz solar exposta a luz artificial.....34

LISTA DE TABELA

Tabela 1. Luminóforos orgânicos (adquiridos através da Sigma-Aldrich) e seus comprimentos de onda máxima de absorção e emissão.....	19
Tabela 2. Concentrações selecionadas e comprimentos de onda de máximo de excitação e emissão.....	23
Tabela 3. Condições climáticas em que os dados foram tomados.....	28

LISTA DE ABREVIações E SIGLAS

PFV	Placa Fotovoltaica
CFV	Célula Fotovoltaica
CSL	Concentradores Solares Luminescentes
UV	Radiação eletromagnética na faixa ultravioleta
PMMA	Poli(metacrilato de metila)
FOP	Fibras Óticas Poliméricas
SG7	Solvent Green 7
C153	Cumarina 153
R101	Rodamina 101
Acrf	Acriflavina
R6G	Rodamina 6G
RB	Rodamina B
CAEL	Centros Ativos de Emissão de Luz

SUMÁRIO

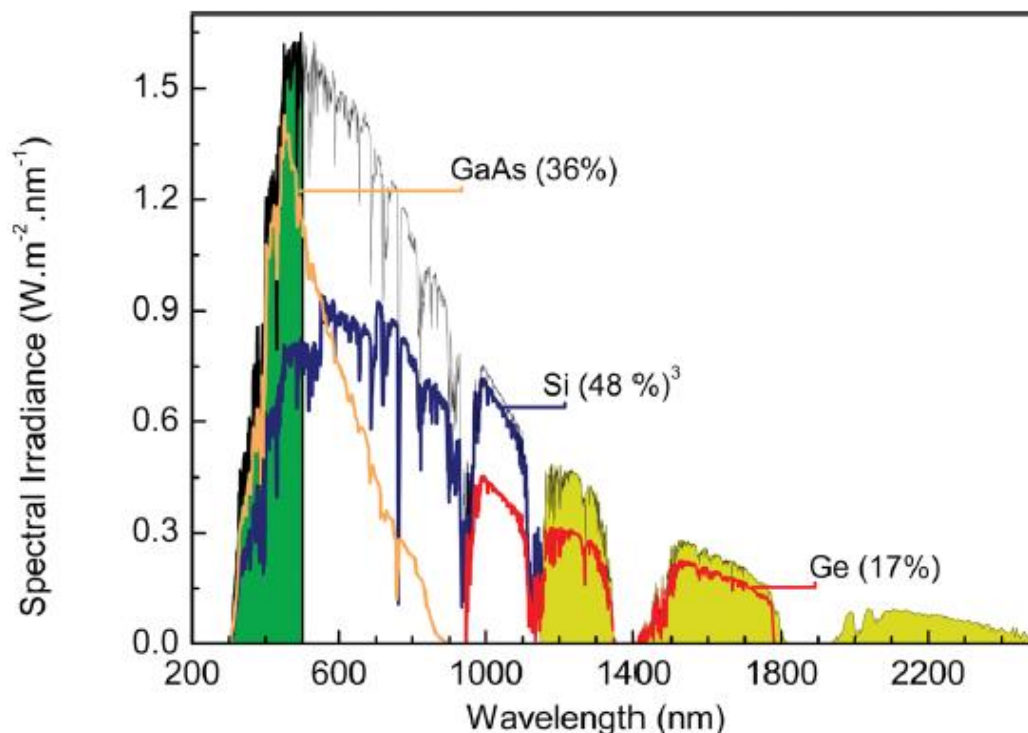
1 INTRODUÇÃO.....	12
2 OBJETIVOS.....	16
3 METODOLOGIA.....	16
3.1 Produção da Coluna Capilar de Poli(metil-metacrilato) (PMMA).....	16
3.2 Protótipo de Concentrador Solar.....	17
3.3 Luminóforos.....	19
3.4 Preenchimento das colunas capilares poliméricas com líquidos.....	20
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	21
4.1 Colunas Capilares.....	21
4.2 Luminóforos.....	22
4.3 Otimização da concentração.....	23
4.4 Teste Solar.....	25
5 CONCLUSÕES.....	35
6 Perspectivas Futuras.....	37
Referências Bibliográficas.....	39

1. INTRODUÇÃO

Com as políticas governamentais para a redução de emissão de gases de efeito estufa, o investimento em fontes renováveis de energia, como placas fotovoltaicas (PFVs), cresce exponencialmente. Contudo, o custo de PFVs ainda é considerado alto, especialmente para nações em desenvolvimento, sendo então a redução de custo o motivador principal do desenvolvimento tecnológico em energia solar. (Beck, Niack e Arlès 2019; Debije e Verbunt, 2012; Van Sark, 2013; Simpson e Clifton, 2016).

Um dos fatores que afeta diretamente a implantação do uso de energia solar como o principal gerador de energia é que mesmo com o crescimento e desenvolvimento da indústria e pesquisa ao redor das células fotovoltaicas (CFV), ainda há uma baixa taxa de conversão para energia – a CFV comercial que apresenta maior eficiência é de silício cristalino da marca *SunPower* com conversão de 22,2%, mas as células mais acessíveis economicamente estão ao redor de 15~17% – sendo um dos maiores problemas o fato de que as PFVs não são sensíveis a todo o espectro solar (Figura 1). (Clear Energy Reviews, 2018; Energy Sage, 2018; Huang, 2013).

Figura 1. Adaptado de Correia, et al. 2014. Comparação da irradiância solar com o espectro de absorção de PFVs de silício cristalino, germânio e arseneto de galio. As áreas marcadas em verde e vermelho denotam as faixas do espectro “disponíveis” para *downconversion/down-shifting* e *upconversion* respectivamente



De acordo com o relatório sobre PFVs do Instituto de Sistemas de Energia Solar Fraunhofer de setembro de 2020, cerca de 95% das placas fotovoltaicas produzidas em 2019 são baseadas em silício, sendo assim a maior parte das pesquisas sobre energia solar fazem uso desse material.

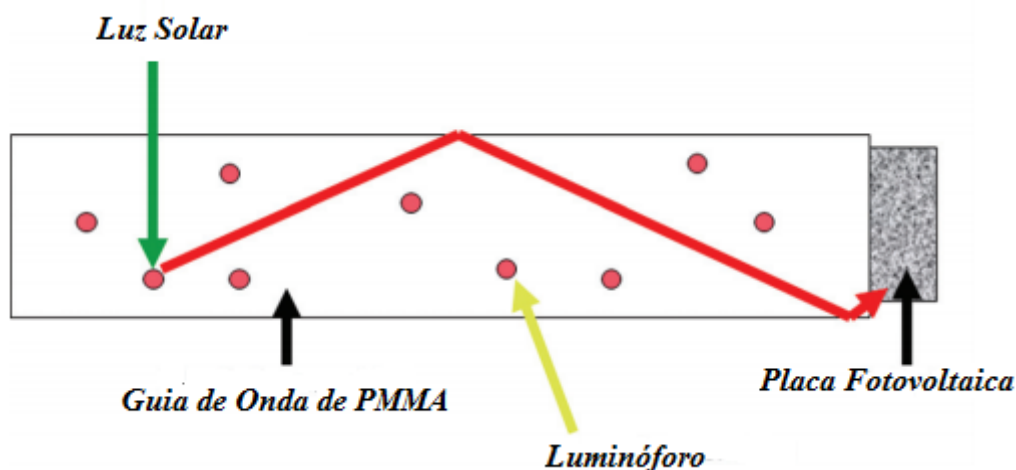
No artigo de revisão de Ferreira et al. (2020) descreve-se a situação atual dos dispositivos de conversão de luz usados para o aumento de eficiência de PFVs, sendo esse método um dos utilizados para redução de custo com o aumento da eficiência. Nesse artigo também se discute uma diversidade de formas em que essas tecnologias solares, como Concentradores Solares Luminescentes, podem ser aplicadas, por exemplo, em janelas de prédios ou em coberturas de estufas.

Concentradores Solares Luminescentes (CSL) são uma das propostas para contribuir na solução do problema do custo benefício e rendimento de PFVs. Sua utilização se baseia na absorção de parte da radiação solar que não é aproveitada pelas PFVs convencionais (ultravioleta - UV, por exemplo, como mostrado na Figura 1) e sua conversão com o uso de luminóforos, em uma faixa

de energia as PFVs operem. Visível para a-Si e IV para c-Si. (Batchelder *et al.*, 1979; 1981; Bailey *et al.*, 2007; Correia *et al.*, 2016).

Um CSL básico é apresentado na Figura 2. Ele é geralmente composto de uma placa de plástico transparente onde luminóforos estão dispersos – geralmente se utilizam corantes orgânicos ou complexos de lantanídeos. A luz solar entra no guia de onda, e excita o luminóforo que vai então emitir radiação de menor energia. Uma grande parcela dessa emissão é confinada na placa por reflexões internas, de acordo com a Lei de Snell, e se propaga até encontrar a placa fotovoltaica nas bordas da placa (Hermann, 1982; Debije e Verbunt, 2012; Van Sark, 2013).

Figura 2. Adaptado de (Debije e Verbunt, 2012). Princípio de funcionamento de um CSL básico. Seta verde- luz solar de excitação do luminóforo. Seta vermelha- luz emitida pelo luminóforo que se propaga até a placa fotovoltaica.



Pode-se otimizar o processo utilizando-se geometria cilíndrica para o CSL. Os fatores de concentração são maiores que aqueles para CSLs planares (Correia *et al.*, 2016), além de outras vantagens que podem ser citadas como sua flexibilidade, custo-efetividade e baixo peso (Correia *et al.*, 2016).

Para medir a efetividade de um CSL, o parâmetro utilizado é seu fator de concentração (F) como mostrado na **Equação 1** (Hermann, 1982):

$$F = \eta_{opt} \times G \quad \text{(Equação 1)}$$

Onde η_{opt} é o fator de conversão óptica calculado a partir da razão entre as potências de absorção (P_{input}) e emissão (P_{output}) do CSL, e G é o fator de ganho geométrico calculado a partir da razão entre a área de coleta de luz solar do CSL (A_{face}) e a área do CSL em contato com as PFVs ($A_{contato}$) (Hermann, 1982; Correia *et al.*, 2016).

Os concentradores solares luminescentes tradicionais apresentam pequena variação nos valores de G. Os diferentes métodos de produção de CSL são comparados utilizando seus η_{opt} , mas em escala comercial geralmente se usa o valor de F diretamente (Correia *et al.*, 2016).

Os valores de F obtidos utilizando-se como valor para P_{input} a irradiação total sobre a Terra, são muito menores ($F < 1$) que os valores esperados ($F \sim 100$), pelos cálculos termodinâmicos teóricos para CSL com corantes orgânicos e pontos quânticos (Giebink *et al.*, 2011; Correia *et al.*, 2016).

O uso de corantes orgânicos em CSLs como a Rodamina 6G, se deve a características como rendimento quântico de emissão elevado e a faixa extensa de comprimentos de ondas de absorção e emissão (Van Sark *et al.*, 2008).

Contudo os avanços no campo dos CSLs para produção em escala industrial/comercial se deparam com três grandes obstáculos: -a limitação da região de absorção dos luminóforos (que causa a redução da quantidade de energia que poderia ser convertida), -muitos dos materiais luminescentes fotodegradam rapidamente quando expostos ao sol (resultando em um tempo curto de utilização) e -perdas causadas pela reabsorção (Bailey *et al.*, 2007).

A utilização de misturas de cromóforos para cobrir uma maior faixa do espectro, a concepção de dispositivos que promovam a circulação de soluções destes cromóforos e o estudo detalhado dos efeitos de concentração e geometria do CSL podem ser considerados para a resolução dos problemas (Nazari *et al.*, 2017).

Assim neste trabalho propõe-se o desenvolvimento de um concentrador solar numa geometria tal que área de coleta da luz solar seja ampliada e concentradores solares luminescentes utilizando-se fibras e colunas capilares juntamente com soluções dos luminóforos diferentes.

2. OBJETIVOS

O objetivo central desta dissertação é o desenvolvimento de concentradores solares cilíndricos e concentradores solares cilíndricos luminescentes baseados em um dispositivo construído com fibras ópticas e/ou colunas capilares.

As colunas capilares de PMMA preenchidas com soluções de corantes orgânicos solúveis em água constituirão os concentradores solares luminescente.

Os objetivos intermediários podem ser descritos como:

- Desenvolvimento de um concentrador solar numa geometria tal que área de coleta da luz solar seja ampliada em relação à área da célula fotovoltaica;
- Estudo das propriedades de emissão de soluções de diferentes luminóforos;
- Testar os dispositivos construídos quando a eficiência de conversão de energia.

3. METODOLOGIA

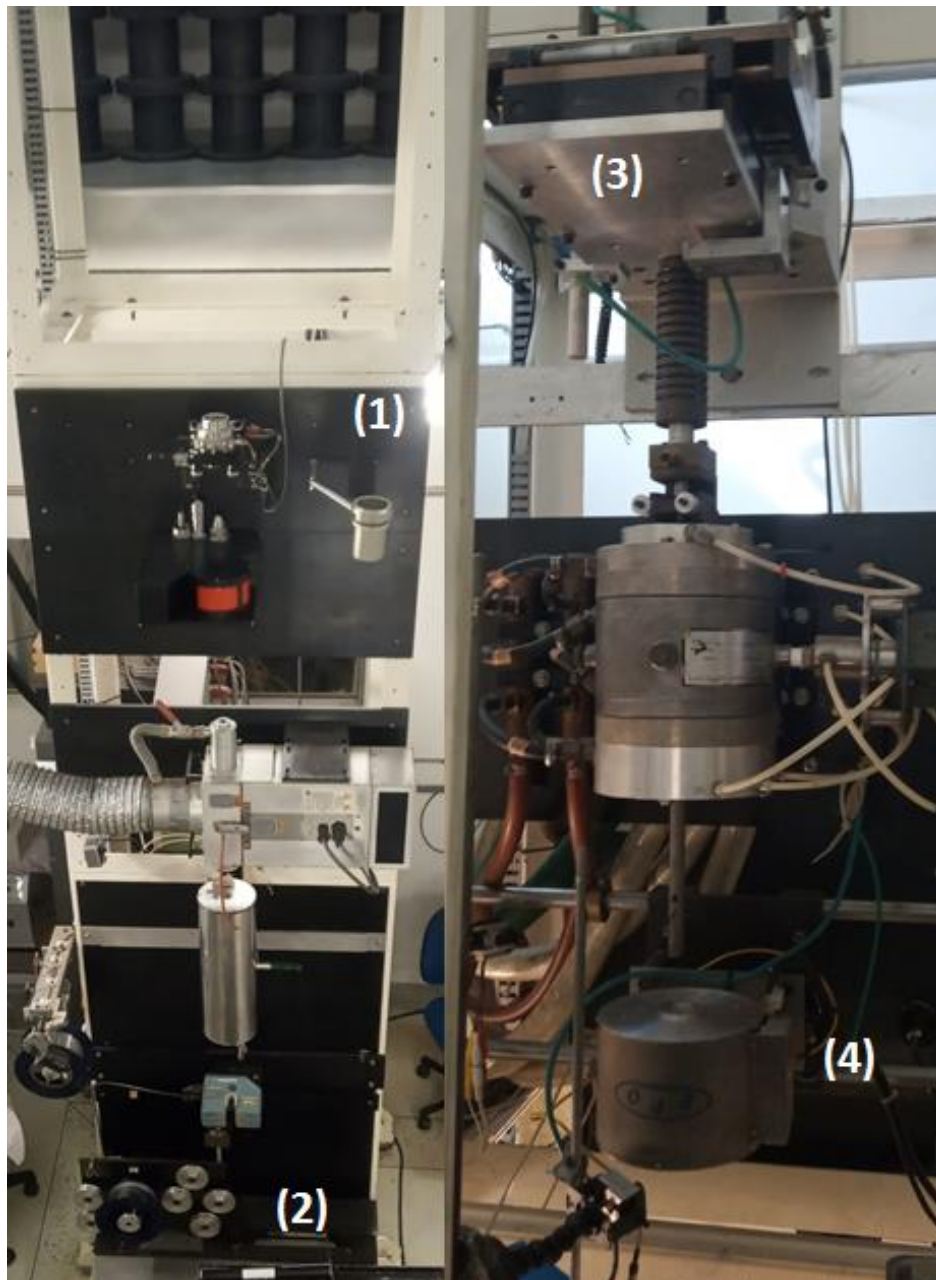
3.1 Produção da Coluna Capilar de Poli(metil-metacrilato) (PMMA):

A fabricação de colunas capilares com dimensões típicas de 1,00 mm de diâmetro externo ($\varnothing_{ext}$) e 0,80 mm de diâmetro interno ($\varnothing_{int}$), foi realizada utilizando uma torre de puxamento usada comumente para a fabricação de fibras ópticas. O puxamento foi realizado a partir de um tubo de PMMA com medidas de 1,00m de altura com 5,0mm de diâmetro externo e 3,00mm de diâmetro interno. O aquecimento foi realizado no forno aberto (EPO Equipamentos Ltda - Número de série 002) com temperatura programada de 183°C. A figura 3 mostra o equipamento utilizado.

Na abertura do forno foi utilizada uma peça de alumínio fabricada no próprio laboratório utilizada como uma lente térmica, ou seja, ela foca o calor gerado diretamente na pré-forma para reduzir qualquer variância de temperatura dentro do forno que possa afetar o processo de puxamento.

Os parâmetros de velocidade de alimentação e puxamento variam de acordo com o diâmetro e comprimento desejados. Os melhores resultados foram obtidos com velocidade de alimentação de 0,2 mm/s e velocidade de puxamento de 3,1 mm/s para comprimento próximo a 11,8 m e diâmetro externo de 1,0 mm.

Figura 3. Fotografia da Torre de Fabricação de Fibras Ópticas; (1) Aplicador de revestimento;(2) Sistema de puxamento de fibra, *capstan*;(3) Sistema de alimentação do tubo;(4) forno



Fonte: Própria Autora

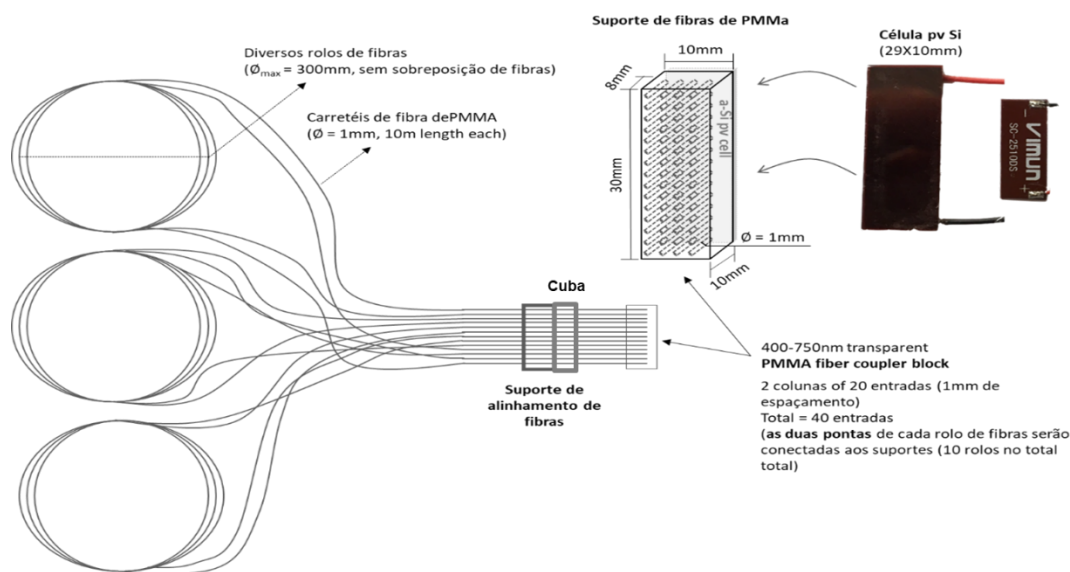
3.2 Protótipo de concentrador solar

Neste trabalho alguns protótipos de concentrador solar foram desenvolvidos.

Três placas de isopor de 1,2m x 50,0 cm x 2,5 cm foram utilizadas. Em duas se utilizaram 10 rolos de 10,0m de colunas capilares com 1,00mm de diâmetro externo e 0,80mm de diâmetro interno. Na terceira placa se utilizaram 10 rolos de 10,0 m de fibra óptica polimérica (comercial) com 1,00mm de diâmetro externo e 0,8-0,9mm de diâmetro interno (Figura 4).

As colunas capilares e as fibras foram posicionadas de maneira a guiar a luz para uma cubeta (CSL) atrás da qual se posiciona seguida a placa fotovoltaica (3,0 cm x 1,0 cm – 3 V) (Figura 4).

Figura 4. Protótipo de concentrador solar.



Fonte: Adaptado.

Obtiveram-se dados da potência solar sobre a placa (mW/cm^2) entre 250 – 900 nm em intervalos de 50 nm utilizando o *power meter* da marca Newport, modelo 2935 C, com o detector da marca Newport modelo 918D-UV-OD3R registrando irradiância solar máxima de $65 \text{ mW}/\text{cm}^2$ e média de $48 \text{ mW}/\text{cm}^2$. A “referência” utilizada nas medidas com os CSLs foram as colunas e a cuba vazias.

As medidas geradas pela PFV de tensão (V) e corrente elétrica (mA) foram tomadas durante dias claros por 7 horas, utilizando um multímetro digital da marca Hikari modelo HM-1100. A corrente foi medida utilizando resistência de 1000Ω .

Usando o mesmo equipamento foram feitas as medidas com a cuba preenchida com água, e então com a solução luminófora, e as colunas vazias, e então preenchidas com água, e após com a solução de corantes.

A placa de isopor com as Fibras Óticas Poliméricas (FOPs) comerciais foram medidas com a cuba vazia, preenchida com água e contendo a mistura das soluções dos luminóforos.

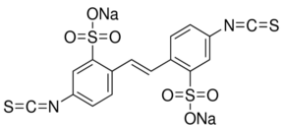
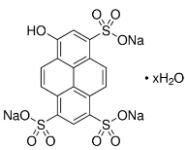
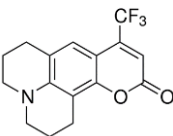
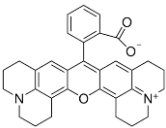
Além disso, esses capilares e fibras tiveram seu espectro medido utilizando o Ocean Optics (Modelo HR2000+ES) e como fonte de luz o próprio sol, ao alinhar uma das entradas do capilar (ou da fibra) com a luz solar direta e manter o restante do material e o equipamento em uma sala escura para medição.

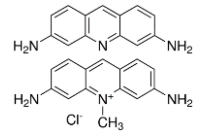
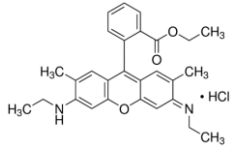
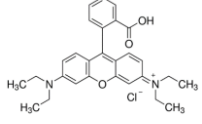
3.3 LUMINÓFOROS

Os luminóforos selecionados foram escolhidos com base nas suas características espectrais (espectros de emissão e de absorção), sua solubilidade em água e na massa disponível para compra, o que limitou consideravelmente as escolhas possíveis.

Os seguintes luminóforos foram então utilizados:

Tabela 1. Luminóforos orgânicos (adquiridos através Sigma-Aldrich) e seus comprimentos de onda máxima de absorção e emissão.

	Luminóforo	Abreviação	$\lambda_{\text{Excitação}}$ (nm)	$\lambda_{\text{Emissão}}$ (nm)	Fórmula estrutural
1	DIDS	DIDS	389	418	
2	Solvent Green 7	SG7	430	516	
3	Cumarina 153	C153	492	523/532	
4	Rodamina 101	R101	495	520	

5	Acriflavina	Acrf	453/487	515/524	
6	Rodamina 6G	R6G	344/526	556	
7	Rodamina B	RB	554	583	

Fonte: Merck Sigma Aldrich

As Rodaminas (B, 101 e 6G) tiveram sua luminescência em diferentes concentrações estudadas extensivamente em estudos prévios (KHUBIN e FLETCHER, 1982), assim como a combinação de acriflavina e rodamina. Utilizando as concentrações sugeridas nos estudos prévios como base os luminóforos 3 a 7 foram então preparados em soluções em água nas concentrações 5.10^{-3} mol/L (mmol/L), 5.10^{-4} mol/L, 5.10^{-5} mol/L e 5.10^{-6} mol/L (ARBELOA *et al*, 1982), (GOFTAR *et al*, 2014), (VERMA e PAL, 2014), (KRISTOFFERSEN *et al*, 2014), (YUZHAKOV. 1992), (ROSENBERG e HUMPHRIES, 1966), (FRANK *et al*, 1978), (MCHELOV-PETROSYAN e KHOLIN, 2004). Os luminóforos 1 e 2 que foram preparados em concentrações iguais.

Os espectros de emissão e excitação foram obtidos em espectrofluorímetro (Fluorolog-3 2-Triax, Horiba Scientific). Se utilizou também para o registro dos espectros de emissão um monocromador Ocean Optics (Modelo HR2000+ES) e excitação em 365 nm por uma lanterna da marca Nitecore.

3.4 PREENCHIMENTO DAS COLUNAS CAPILARES POLIMÉRICAS COM LÍQUIDOS.

Para o preenchimento das colunas capilares foi utilizada uma bomba de vácuo da marca BIOMEC modelo ECO740, para o preenchimento por sucção até a observação da formação de cavidades – bolhas de ar em meio a solução. Neste momento substituiu-se a sucção da bomba, por uma seringa de 20 mL até a coluna inteira estar preenchida e sem cavidades.

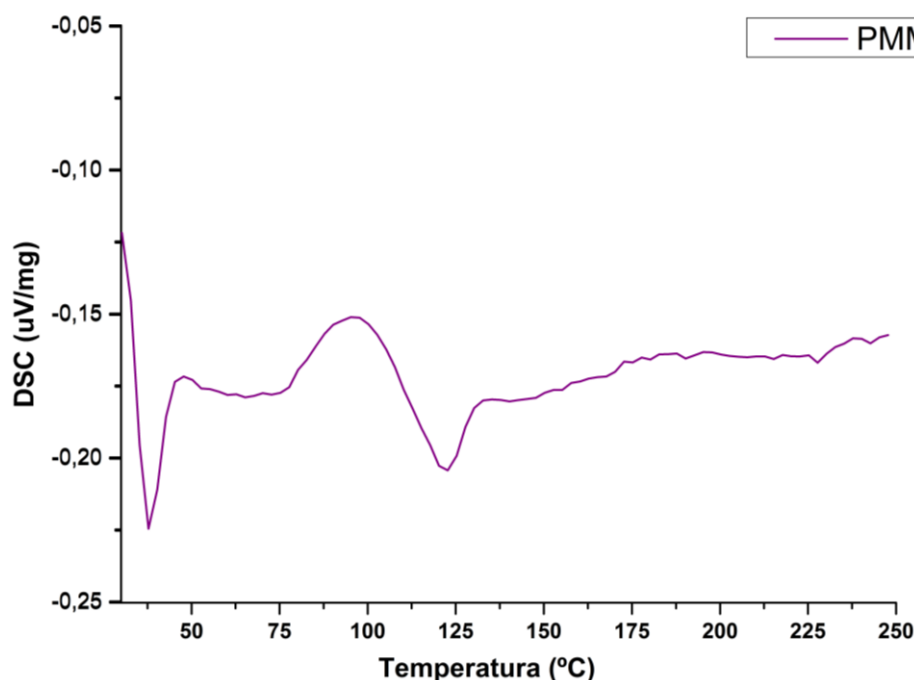
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO:

4.1 Colunas Capilares:

O material escolhido para as colunas capilares foi o poli(meta-acrilato de metila) (PMMA) (Figura 6), um polímero sintético termoplástico frequentemente utilizado como um substituinte para o vidro devido, entre outras a sua transparência, baixo peso e flexibilidade (ALI et al, 2015).

A temperatura de transição vítrea do PMMA se encontra na faixa de 100° a 130° C, segundo Ali, et al. (2015). Na medida de DSC (Figura 5) da amostra utilizada o valor 123° C foi determinado, dentro da faixa esperada.

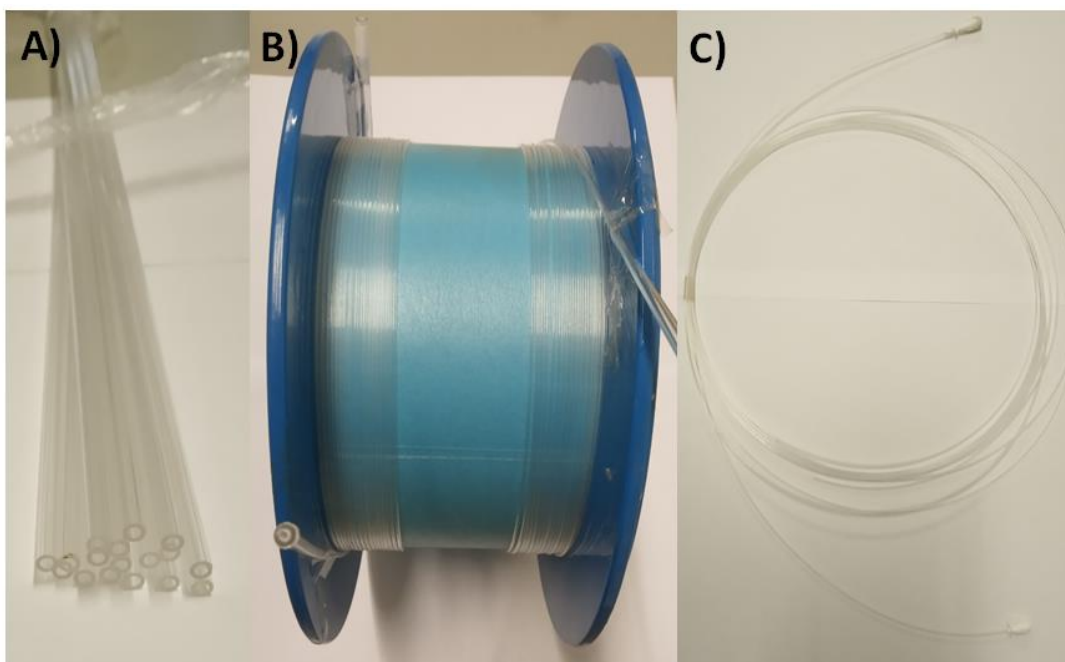
Figura 5. Comportamento do PMMA no DSC.



Fonte: Própria Autora.

O amolecimento do material foi observado a 183° C. Essa temperatura é consequência das variáveis existentes com o uso do forno aberto, por exemplo, dado a forma com que o forno opera, a convecção de calor dentro do forno, e/ou o posicionamento do termostato, entre outras possibilidades, que já haviam sido avaliadas e abordadas, e com o acréscimo de uma peça – uma lente térmica de alumínio – ao forno, houve uma redução do efeito dessas problemáticas, porém ainda é uma problemática relevante e outras alternativas devem ser testadas em futuros projetos.

Figura 6. (A) Tubos de PMMA; (B) Carretel com duas colunas capilares poliméricas; C) Coluna capilar de PMMA.



Fonte: Própria Autora

4.2 Luminóforos:

A utilização dos CAELs foi planejada para que sua combinação fosse sintonizável com o comprimento de onda e a intensidade do espectro de absorção do silício (principal componente de CFVs), de forma a que a emissão da Mistura de Corantes (MC) cobrisse, “como um *plateau*”, toda a área de absorção da CFV entre 500-600nm proposta para o aumento máximo de rendimento possível em cada banda de absorção da CFV.

4.3 Otimização da concentração

Os espectros de emissão (Figura 7) de todas amostras mostram aumento de intensidade com a concentração como esperado. Entretanto há um limite de concentração para este comportamento que depende do corante. Concentrações maiores levam a supressão da emissão possivelmente causada pela agregação das moléculas do corante e também pela autoabsorção que depende da sobreposição dos espectros de emissão e absorção.

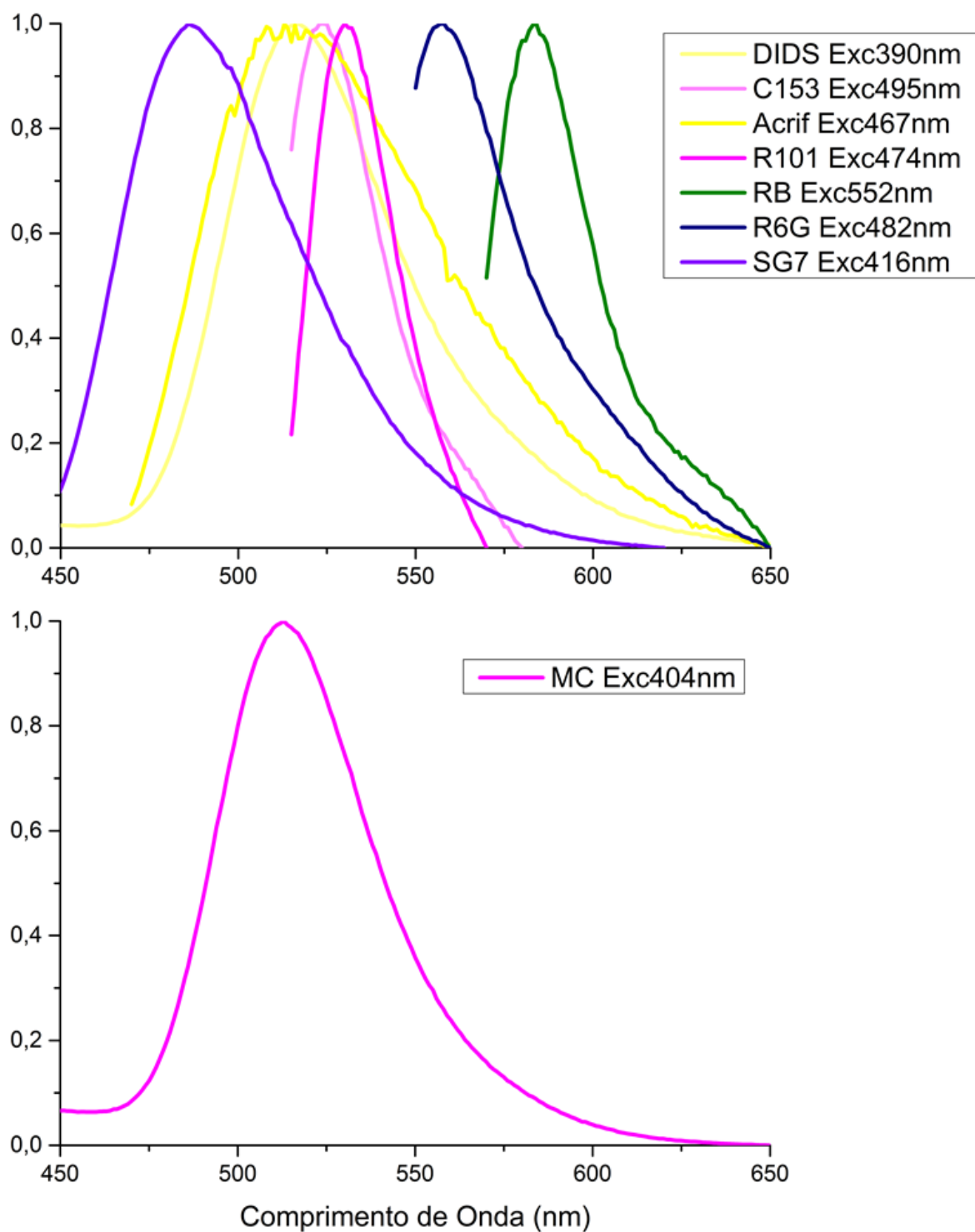
Uma seleção da concentração mais adequada para o objetivo desse projeto foi feita (Tabela 2) e seus espectros de emissão (Figura 7).

Tabela 2. Concentrações selecionadas e comprimentos de onda de máximo de excitação e emissão.

	Luminóforo	Concentração (mmol/L)	$\lambda_{\text{Excitação}}$ (nm)	$\lambda_{\text{Emissão}}$ (nm)
1	DIDS	0,5	390	418
2	Solvent Green 7	0,5	430	594
3	Cumarina 153	0,5	492	525
4	Rodamina 101	0,5	330	544
5	Acriflavina	0,005	467	555
6	Rodamina 6G	0,005	539	592
7	Rodamina B	0,005	567	586

Fonte: Própria Autora

Figura 7. Espectros de Emissão das soluções aquosas para os luminóforos com as concentrações apresentadas na Tabela 2, assim como o espectro de emissão da Mistura de Corantes (MC).



Fonte: Própria Autora

Observam-se bandas largas de emissão cobrindo a região do visível, como era esperado para os luminóforos individualmente, entre 480-600nm.

Em geral há uma redução na intensidade de luminescência quando se compara os espectros das soluções puras com o da mistura e como já mencionado este comportamento pode ser causado pela reabsorção da luz emitida pelos próprios luminóforos e também presença de agregados.

Estes agregados, comuns em soluções de corantes orgânicos são geralmente causados pelas interações intermoleculares dessas substâncias. Esse fenômeno ocorre mais frequentemente via interações do tipo $\pi\pi$ envolvendo grupos aromáticos que segundo Goftar *et al.* (2014) causam supressão de bandas e deslocamentos batocrômicos (para menor energia) ou hipsocrômicos (para maior energia) dependendo da classe de agregados em questão. Uma vez que este trabalho utiliza corantes de estrutura química similares, supõe-se que seja possível o efeito de agregação entre as moléculas (MORENOVILLOSLADA *et al.*, 2010).

De acordo com Banaei *et al.*, 2015 é esperado que ocorra a perda de uma fração da energia absorvida dada a combinação de dois efeitos: eficiência quântica luminescente dos corantes e o deslocamento de Stokes dos mesmos, mesmo com essa consideração é esperado que a geometria dos CSL utilizada nesse trabalho reduza essa perda como descrito por (CORREIA, 2017), o que foi testado durante os testes de eficiência sob o sol.

Apesar da literatura (SAHARE, 2008; KHUBIN e FLETCHER, 1982) apontar que rodaminas e a acriflavina são solúveis em água, em outros solventes as soluções resultantes são mais estáveis e apresentam luminescência mais intensa, como por exemplo em etanol. Alguns solventes devem ser evitados, uma vez que o PMMA é solúvel na maioria das cetonas, dos ésteres, dos hidrocarbonetos clorados e aromáticos, em misturas de água e etanol (MILES e BRISTORN, 1975; HOOGEBOOM *et al.*, 2010).

Neste trabalho observou-se o ataque do PMMA pelo etanol 98%, foi encontrado menção de fenômeno similar em etanol com concentração de 30% na literatura (ALI *et al.*, 2015), sendo assim a possibilidade do uso desse solvente com esse material foi eliminada, mesmo dado as vantagens que o etanol apresenta como solvente para luminóforos orgânicos.

4.4 Teste Solar

As medidas foram realizadas utilizando-se uma célula fotovoltaica de controle, exposta ao sol e gerando 3,0 V, em média. A CFV no protótipo estava exposta a luz solar transportada pelas fibras e colunas capilares, quantidade de luz significativamente menor que a controle.

Deve-se saber também que o PMMA apresenta índice de refração $n = 1,49$, enquanto o solvente (água) apresenta $n=1,33$. Desta forma, em nosso dispositivo a condução da luz ocorre pela coluna capilar (casca) em relação ao material utilizado para o preenchimento (núcleo).

A condução pela casca neste caso é interessante uma vez que os fenômenos de reabsorção da luz emitida pela solução do corante podem ser reduzidos.

Primeiramente deve se calcular a área exposta das fibras e colunas capilares, para se ter um valor comparativo com uma CFV exposta ao sol, contudo essa ficou saturada durante todo o experimento, mostrando-se como um controle inadequado.

$$A_{cilindro} = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot h$$

$$A_{cilindro} = 0,62m^2$$

Devido a forma que as fibras e capilares estão posicionados na placa de isopor pode-se estimar que apenas aproximadamente metade das colunas capilares estão expostas a entrada de luz solar devido ao ângulo de entrada.

$$A_{exposta\ do\ cilindro} = 0,31m^2$$

A área de coleta da CFV utilizada é de 3 cm², ou seja, o uso das colunas capilares aumentou a área de coleta em 1000 vezes.

A direção que a luz toma dentro da fibra ótica é irrelevante, pois ambas extremidades (“saída” da luz) estão conectadas a CFV, enquanto outras direções levam ao escape, ou seja, perda.

A porção da luz que entra na coluna capilar, e não é contida por Reflexão Interna Total (RIT), atravessa diretamente na direção do núcleo líquido, e será absorvida e a radiação convertida na emissão emitida dos CAELs da qual uma porcentagem será guiada até absorção pela CFV.

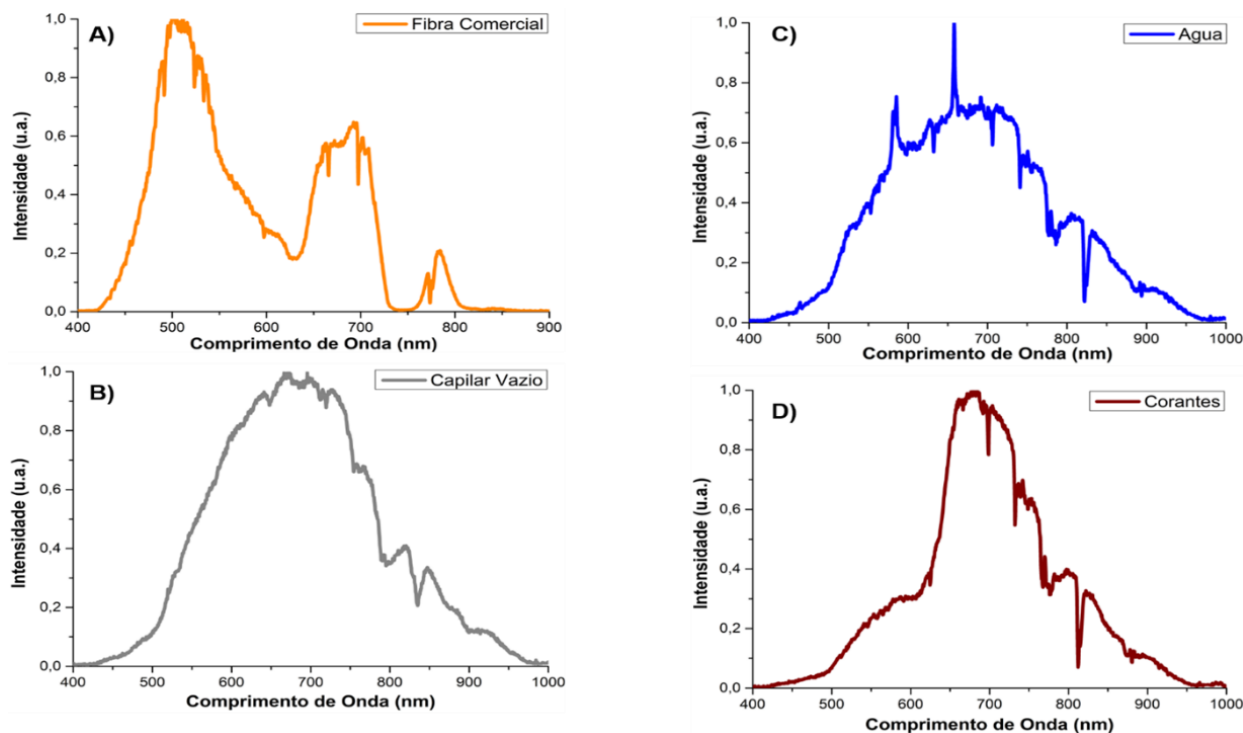
Utilizou-se como suporte do dispositivo uma placa de isopor que é branco e um isolante térmico, não interferindo na performance do CS e do CSL. Além disso é leve facilitando o transporte.

Uma vantagem da utilização de um núcleo líquido quando comparado com o núcleo de uma fibra convencional refere-se sua versatilidade. O núcleo líquido pode ter sua composição trocada conforme se é necessário, seja porque houve degradação dos Centros Ativos de Emissão de Luz (CAEL) ou para a troca

da composição visando o controle do comprimento de onda de emissão, em sintonia por exemplo com a absorção da célula fotovoltaica.

A figura 8 mostra o perfil da luz que é guiada pelos diferentes meios usados nesse trabalho. No espectro obtido para a fibra comercial (figura 8(a)) dois máximos são observados em 500nm e 650 nm. Para as colunas capilares vazias ou preenchidas com água (Figura 8(b) e (c)) os espectros são semelhantes. Percebe-se a menor intensidade de transmissão na região de comprimentos de onda menores que 550nm. A figura 8(d) mostra o resultado para a coluna capilar preenchida com a mistura de corantes MCC. Observa-se um perfil semelhante com uma atenuação importante na região de 500 a 650 nm e um aumento de intensidade na região de 650 a 750 nm em comparação com o capilar cheio de água o que mostra a contribuição da luminescência do corante.

Figura 8. Espectros da luz solar obtidos com os capilares e as fibras utilizados neste trabalho.



Fonte: Própria Autora

Na tabela 3 há as condições climáticas encontradas nas datas das medições dos experimentos, e como houve certa variação climática durante o processo, além do espaçamento entre os dias feitos, dado que para a realização desse procedimento é necessário um dia claro ou com poucas nuvens para maior exposição ao sol.

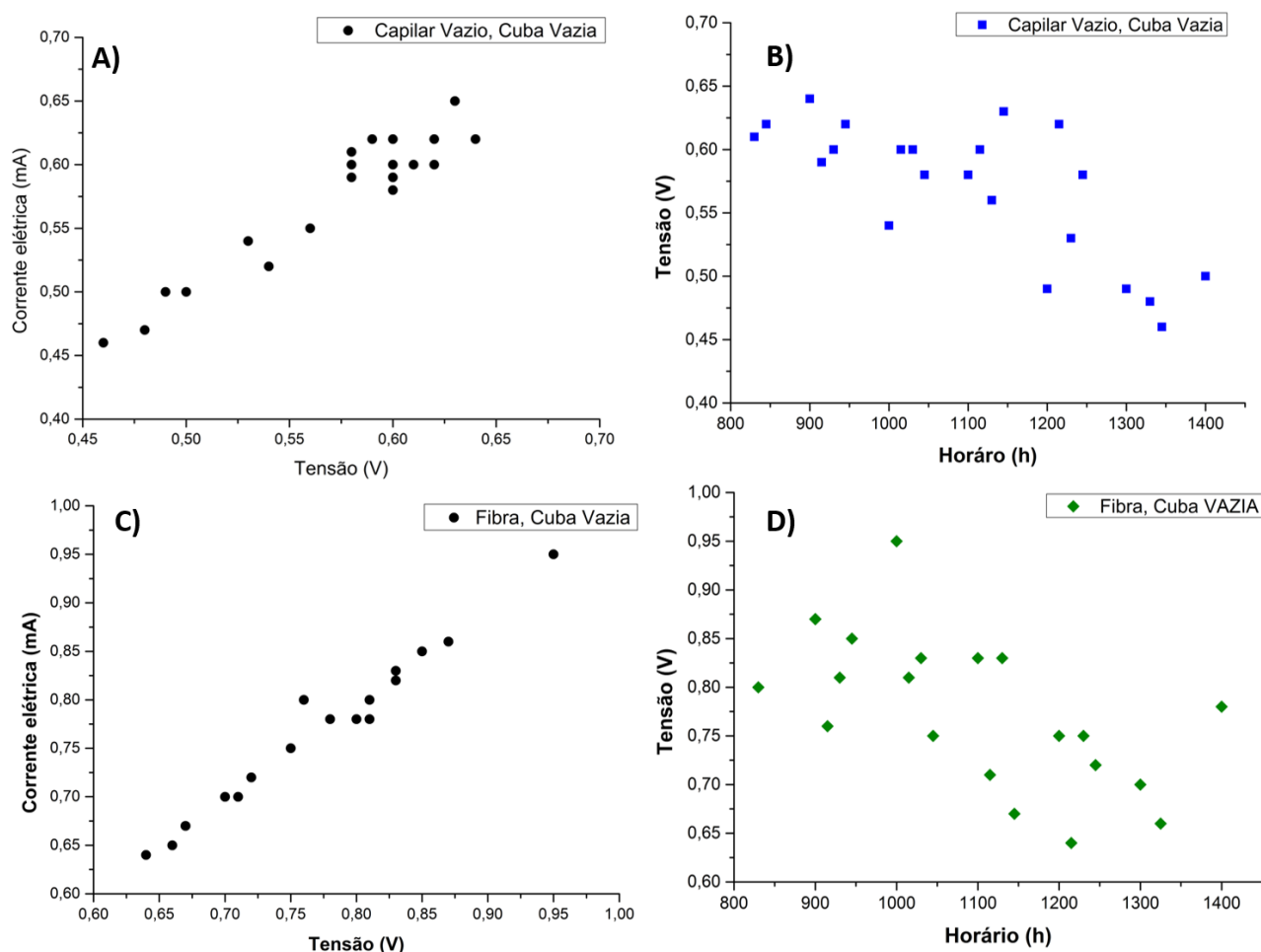
Tabela 3. Condições climáticas em que os dados foram tomados.

Data	Potência Máxima da Irradiância Solar (mW/cm²)	Condições climáticas	Local
25/03/19	116	Céu Claro com Poucas Nuvens	Araraquara, SP Brasil
26/03/19	137		
27/03/19	128		
28/03/19	126		
17/04/19	64,8		
18/04/19	62,0	Céu Claro	
23/04/19	52,7	Céu Claro com Poucas Nuvens	
24/04/19	51,9		
25/04/19	54,0	Céu Claro	
26/04/19	53,1	Céu Claro com Poucas Nuvens	
30/04/19	49,5		

Fonte: Própria Autora

A figura 9 mostra os resultados para valores de tensão, corrente elétrica e potência elétrica teórica para as colunas capilares e a cuba vazias.

Figura 9. A e C) Comparação de tensão e corrente elétrica entre as colunas capilares de PMMA e as fibras conduzindo luz até a célula solar no protótipo, com a cuba vazia; B e D) Comportamento da tensão elétrica gerada pela PFV durante o dia de coleta de dados.



Fonte: Própria Autora

A eficiência dos CSL foi avaliada tomando-se como referência a coluna capilar sem ser preenchida (Figura 9.A e 9.B). Nas condições utilizadas a coluna capilar gerou máximo de tensão de 0,64 V. Sob as mesmas condições a fibra comercial (Figura 9.C e 9.D) gerou 0,98 V, mostrando a capacidade dos capilares de sensibilizar a PFV e gerar energia.

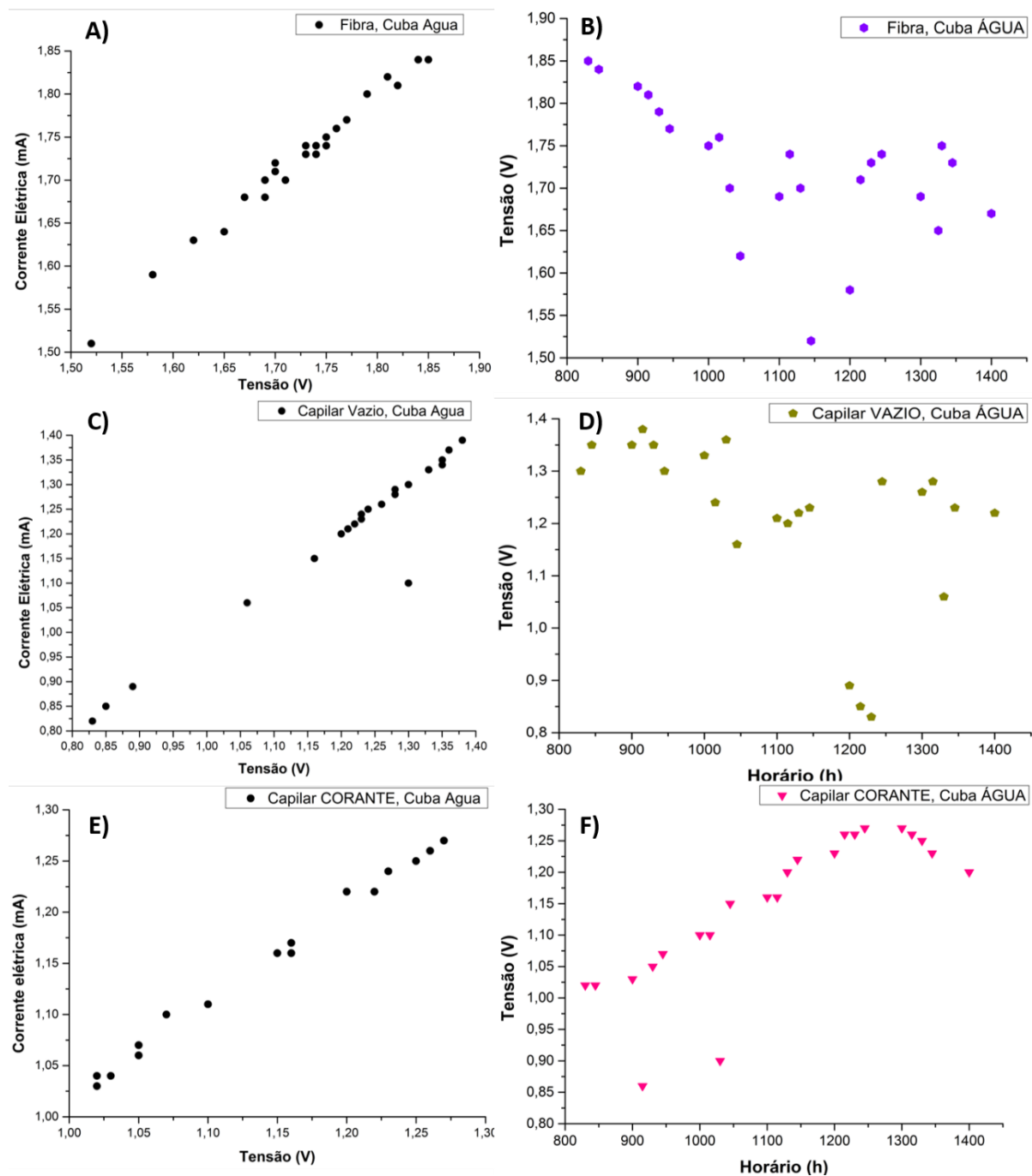
A maior eficiência observada para a fibra comercial era esperada, considerando que a otimização do método de fabricação da mesma e ao fato de que a mesma conduz luz no núcleo que significa um volume de 31,4 cm³. A coluna capilar, considerando a condução pela parede tem um volume total de 11,3 cm³, um terço do volume do núcleo da fibra comercial.

Como uma segunda referência foi medida a eficiência da coluna capilar preenchida com água Milli-Q, - já que a água (sem impurezas) possui a propriedade de espalhamento de luz distribuindo a radiação por toda a coluna e

aumentando a probabilidade da mesma de ser captada e conduzida pela casca por RTI (JONASZ e FOURNIER, 2007).

As colunas capilares foram então preenchidas com as soluções aquosas de corantes. A cuba do dispositivo também foi preenchida com água e as soluções de corantes.

Figura 10. A, C e E) Comparação entre as colunas capilares de PMMA (com água Milli-Q e com a solução aquosa de corantes) e as fibras conduzindo luz até a célula solar no protótipo com a cuba preenchida com água Mili-Q; B, D e F.



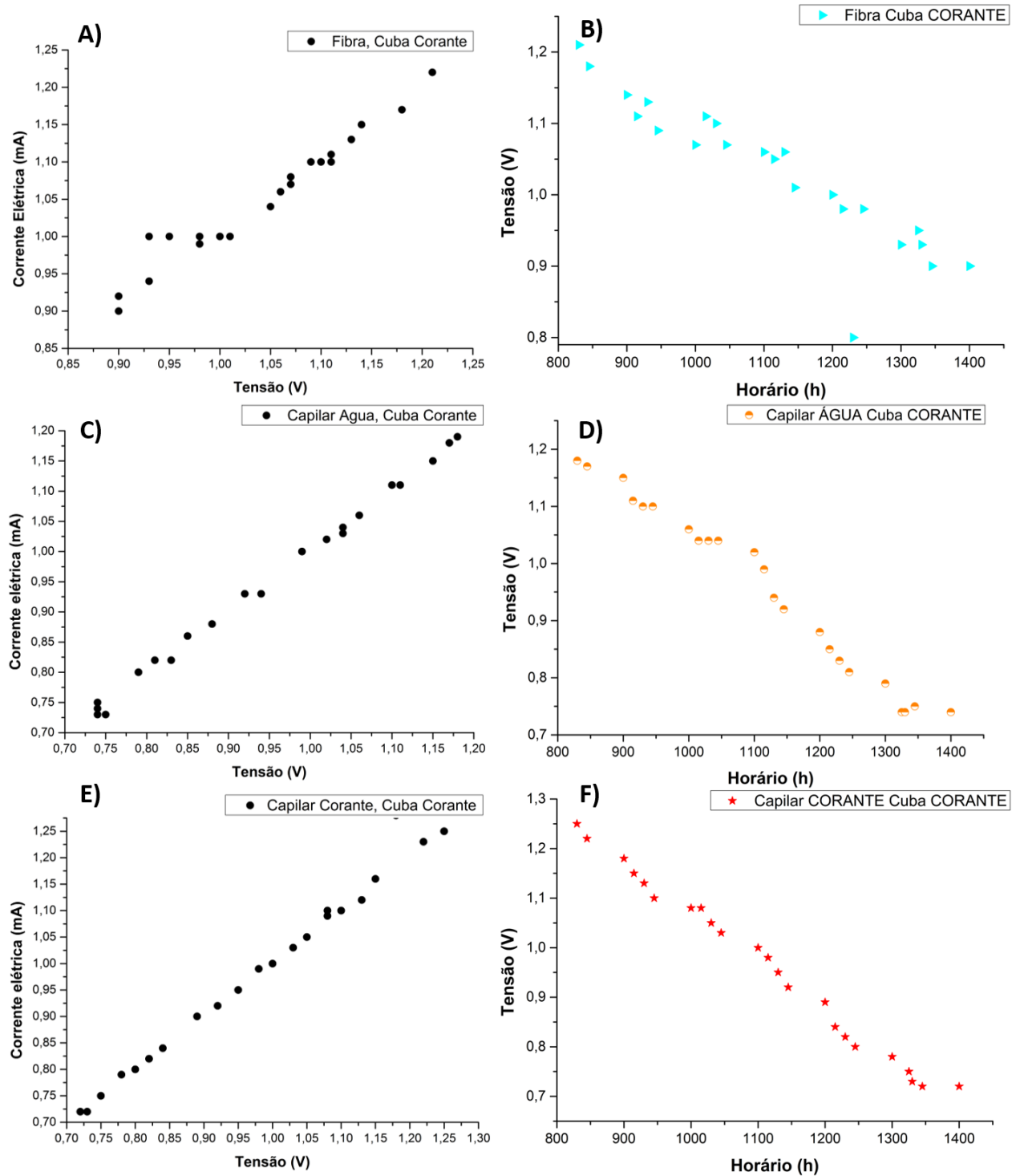
A figura 10 se refere aos dados da coluna capilar preenchida com água ($n = 1,33$). Nesta situação de acordo com a Lei de Snell a luz será guiada pela parede. Entretanto qualquer porção da luz que penetrar no capilar e não for contida por RTI ao alcançar o núcleo será, provavelmente, espalhada em diferentes direções e diferentes ângulos ao longo do capilar, possibilitando a reentrada da irradiância na parede do capilar.

Na situação da cuba preenchida com água, a luz proveniente dos vinte pontos (vinte fibras) é espalhada por toda a extensão da célula, aumentando a área de aproveitamento de irradiância, e, portanto, sua eficiência, comparando ao capilar e cuba vazios aos preenchidos com água, temos um aumento de eficiência máxima de 25% na geração de tensão elétrica e corrente.

A figura 10E se refere ao capilar preenchido com a solução de corantes e a cuba completa com água, com isso temos um pequeno aumento da eficiência mínima se comparada ao capilar e cuba preenchido com água, contudo essa diferença passa a ser irrelevante após algumas horas devido a fotodegradação dos CAELs utilizados, como mostra a figura 12.

Na figura 10.C é possível analisar de maneira consistente o efeito da cuba preenchida com água comparada com a mesma vazia usando a comparação com a performance das fibras comerciais. No segundo caso temos um valor máximo de tensão gerada de 0,95 V, ou seja, comparado com a CFV exposta temos uma performance de 31,67%, enquanto sob as mesmas condições temos que com a cuba com água a tensão gerada é de 1,85V, praticamente dobrando a eficiência da mesma, provando a relevância da presença da água.

Figura 11. Resultado obtidos para colunas capilares de PMMA e as fibras no protótipo com a cuba preenchida com a mistura de corantes.



Fonte: Própria Autora

As figuras 11A e 11B mostram a performance da célula com as fibras comerciais e a cuba preenchida. Comparando com os resultados apresentados na figura 11E observa-se um aumento de 10% do rendimento máximo devido a presença do corante na cuba. Contudo, quando se compara com os resultados da figura 11C, observa-se diminuição de rendimento máximo de 20%, certamente devido a reabsorção da luz emitida. Uma cuba maior poderia levar a resultados melhores.

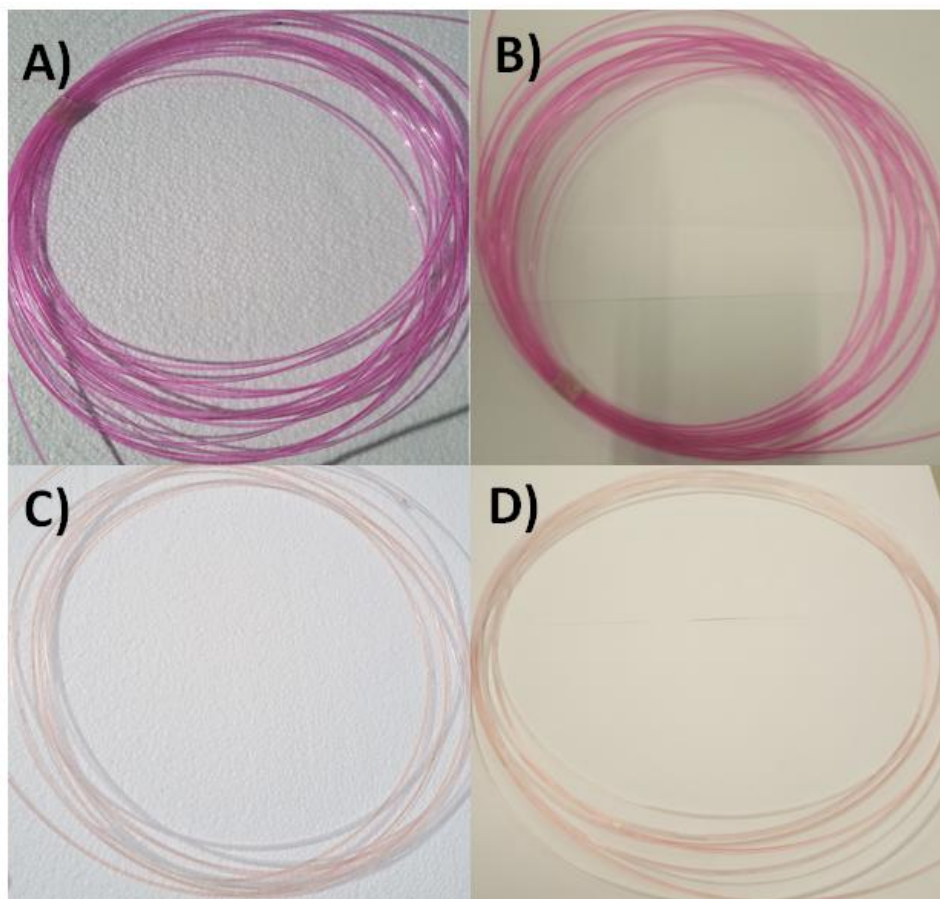
As figuras 11C e 11D mostram os resultados obtidos para tensão e corrente para a CFV conectada com o capilar preenchido com água e a cuba com corante. Observa-se uma queda de 8% na performance quando comparado com a coluna capilar e cuba com CAELs. A presença dos corantes na coluna capilar permitiu uma conversão maior de energia. A diferença entre os dois é, entretanto, irrelevante, possivelmente causada pela fotodegradação do material no capilar.

As figuras 11E e 11F mostram os resultados obtidos para os experimentos com capilares e cuba preenchidos com corantes. Observa-se que o maior valor de diferença de potencial é de 1,28 V, ou seja, 42,67% da performance da célula referência. Este valor é similar ao obtido quando a coluna capilar foi preenchida com corante e a cuba com água. A degradação das CAELs no capilar e fenômenos de reabsorção sejam os responsáveis pelas limitações observadas.

Considerando os valores de tensão apresentados e comparando com o potencial máximo da célula de referência temos que a eficiência máxima para a CFV nos dias em que foi feita a medida é de 42,67%. Deve-se notar que esses valores são obtidos quando a CFV está em contato apenas com as colunas capilares. Os corantes apresentaram degradação com o tempo (como apresentado na Figura 12 sugerindo novas estratégias para contornar esse fator.

As perdas da eficiência são geralmente causadas por reabsorção pelo próprio CAEL, espalhamentos por impurezas ou imperfeições no tubo de PMMA usado como pré-forma, variações nas dimensões do núcleo e imperfeições na interface núcleo/casca (Daum, 2002).

Figura 12. A) Coluna capilar polimérica preenchida com solução de corantes exposta a luz solar; B) Coluna capilar polimérica preenchida com solução de corantes sem exposição ao sol; C) Coluna capilar preenchida com solução de corantes após 7 horas de exposição a luz solar exposta a luz solar; D) Coluna capilar preenchida com solução de corantes após 7 horas de exposição a luz solar exposta a luz artificial.



Fonte: Própria Autora

Na figura 12 observa-se o fenômeno de fotodegradação nos capilares ao passar de 7 horas, contudo o mesmo ocorreu dentro das cubas preenchidas com a mistura de corantes como pode ser observado nos gráficos onde a mesma é utilizada, havendo uma clara queda de eficiência conforme ocorre a fotodegradação dos luminóforos, tornando o equipamento menos efetivo como CSL.

5 CONCLUSÕES:

Neste trabalho construiu-se um dispositivo original de concentração de luz solar utilizando fibras ópticas e colunas capilares. O fator geométrico estimado considera um aumento de 1000 vezes da área exposta ao sol para a sensibilização de uma célula de 3 cm²

Foram realizados ensaios preliminares para a avaliação do papel de soluções aquosas de luminóforos e os dispositivos como concentradores solares luminescentes. Os resultados indicam um aumento de irradiação das células solares na região de emissão dos corantes que pode ser utilizado como prova de conceito do objetivo original.

O dispositivo construído foi testado e permite a utilização como concentradores solares, tanto de fibras ópticas como colunas capilares. A utilização conjunta de meios ativos luminescentes permitiu a fabricação de concentradores solares luminescentes (CSL).

Diferentes configurações de concentradores solares luminescentes puderam ser testadas, envolvendo a utilização das fibras, colunas capilares e a cubeta com a solução do corantes luminescentes colocada entre o dispositivo e a célula fotovoltaica de silício.

As medidas experimentais mostraram a sensibilização da célula fotovoltaica em todas configurações. Elas precisam ser otimizadas com a utilização de uma referência que compense variações da iluminação solar ao longo do dia. Ressalte-se que foram utilizadas 20 fibras no dispositivo, número que não é suficiente para a cobertura da área ativa da célula. Ou seja, pode-se melhorar o dispositivo no sentido de recobrir 100% da área da célula.

A limitação apresentada pelo solvente escolhido também deve ser considerada para a continuação deste projeto. Poucos luminóforos apresentam solubilidade em água, e mesmo os que apresentam mostram uma intensidade maior em outros solventes, como o etanol. Porém o PMMA utilizado foi atacado pelo etanol.

Propôs-se a utilização de misturas de soluções de corantes luminescentes buscando cobrir todo o espectro visível com a luminescência. Entretanto devido, provavelmente, a fenômenos de auto-absorção e agregação em solução das moléculas dos corantes o espectro de emissão obtido cobriu apenas uma parte da região visível. Não se identificaram vantagens frente a utilização de corantes individualmente.

As razões pelas quais a cuba preenchida com corante ou as colunas capilares preenchidas com corantes foram menos eficientes que as com a cuba com água (com exceção da cuba vazia e das colunas vazias) são relacionadas a fotodegradação dos corantes – especialmente nos capilares - após horas

expostos ao sol, e a reabsorção da luz pelos próprios CAELs, contudo a luz emitida na região de luminescência do corante é maior do que quando se utiliza a água, sendo assim são necessárias estratégias para superar essas problemáticas.

A degradação dos luminóforos pode ser diminuída utilizando-se um dispositivo que permita a circulação da solução do corante na cuba.

Mesmo considerando-se a fotodegradação do líquido bombeado, a substituição eventual da solução de corantes pode ser facilmente realizada. Preserva-se desta maneira a célula fotovoltaica – que possui um custo maior - de danos do ambiente, e mesmo que a célula for exposta ainda há a vantagem de uma área de coleta maior e até mesmo a remoção da necessidade de equipamentos de rastreamento solar, que possuem altos custo, uma vez que a coleta de luz pelas fibras/capilares independe do ângulo de incidência da solar.

Utilizando a combinação cuba e fibras comerciais – vantajoso pelo fácil acesso e baixo preço das fibras poliméricas, a substituição da solução se torna ainda mais simples, mantendo a grande eficiência como guia de onda que as fibras comerciais apresentam.

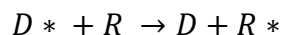
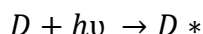
As aplicações dos dispositivos desenvolvidos envolvem telhados de edifícios – especialmente construções que não seriam ideais para placas solares de silício tradicionais (devido ao peso, rigidez, tamanho, etc.) – ou em janelas (que seriam adaptadas para receberem CFVs em suas bordas (internamente)). As fibras/colunas capilares estariam nas paredes exteriores ou na estrutura da janela expostas ao sol conduzindo a luz para as CFVs e gerando energia dessa forma, com isso poderia se cobrir uma maior área de coleta de energia solar sem a necessidade de investir em um grande número de células fotovoltaicas, as quais tem um custo considerável.

A tecnologia apresentada pode ser combinada com as formas de geração de energia já presentes, contribuindo assim para a redução do uso de combustíveis fósseis para suprimento de energia durante as horas de pico de rendimento das células fotovoltaicas e não como um substituinte para outras fontes de energia.

6 PERSPECTIVAS FUTURAS

A limitação da região de absorção dos luminóforos – que causa a redução da quantidade de energia que poderia ser convertida, pode ser contornada pelo uso de transferência de energia de excitação por ressonância fluorescente (FRET), o qual o processo é explicado abaixo. (Bailey *et al.*, 2007; Hussain, 2009).

Esquema 1. Transferência de Energia de Excitação por Ressonância Fluorescente (FRET), um mecanismo que descreve a transferência de energia por fluorescência, esse processo envolve um luminóforo doador (D) em estado excitado que possa transferir sua energia de excitação para uma molécula cromófora receptora (R) de forma não radioativa.



Fonte: Adaptado de Bailey *et al.*, 2007; Hussain, 2009

Há algumas condições que devem ser satisfeitas para que ocorra essa transferência de acordo com Hussain, 2009:

- (i) O espectro de emissão da molécula doadora deve coincidir com o espectro de absorção da molécula receptora;
- (ii) Os dois cromóforos devem estar fisicamente próximos (1 a 10nm de distância entre eles);
- (iii) O dipolo de transição das suas moléculas devem ser aproximadamente paralelos;
- (iv) E o tempo de vida da fluorescência do doador deve ser longo o suficiente para que ocorra a transferência.

Uma vez que esses pré-requisitos estejam presentes, esse sistema é uma ótima solução para os problemas apresentados pelo uso de corantes orgânicos em LSC (Hussain *et al.*, 2010).

Uma segunda sugestão para a continuidade desse trabalho seriam testes com diferentes centros ativos de emissão de luz, por exemplo, complexos de lantanídeos, quantum dots, diferentes corantes orgânicos – que por dificuldade na compra não puderam ser usados nesse trabalho.

É importante mencionar que um dos fatores limitantes desse trabalho foi a solubilidade dos CAELs no solvente escolhido, pois poucos luminóforos com alta intensidade de emissão são solúveis em água, com a troca de solvente abre-se a possibilidade de se utilizar diversos outros CAELs com grande intensidade de emissão e/ou com faixas de absorção e emissão mais apropriadas ao trabalho.

Para trabalhos futuros também se é sugerido testes com colunas capilares de outras matrizes para as colunas capilares, pois PMMA interage com o etanol e o uso desse como solvente para os luminóforos seria a melhor opção (um grande arsenal de CAELs solúveis no próprio, e preço acessível).

Outros acréscimos que podem ser feitos a esse projeto no futuro são testes com diferentes modelos de colunas capilares (por exemplo, com colunas capilares com dois núcleos ocos), adição de um reservatório de solução luminófora com um sistema de bombeamento pelas colunas, como uma forma de reduzir a exposição a fotodegradação do líquido e facilitação

Referências

ALI, U., KARIM, K. J. B. A., BUANG, N. A. A review of the properties and applications of poly (methyl methacrylate)(PMMA). **Polymer Reviews**, v.55, n.4, p. 678-705, 2015

ARBELOA, F. L. et al. Aggregate Formation of Rhodamine 6G in Aqueous Solution. **Journal of Chemical Society, Faraday Trans** v.2, n.78, p.989-994, 1982.

ASHBY, M. F. Materials Selections in Mechanical Design. Elsevier. 3rd Edition. P.519, 2005.

BANAEI, E. H., ABOURADDY, A. F. Design of a Polymer Optical Fiber Luminescent Solar Concentrator. **Progress in Photovoltaics: Research and Applications**. v. 23, p. 403-416, 2015.

BECK, L.; NOACK, R.; ARLÈS, Q.; European Parliament declares climate emergency amid momentum for a Green Deal. **Washington Post**. 28 de Novembro de 2019. Disponível em: <<https://www.washingtonpost.com/world/2019/11/28/european-parliament-declares-climate-emergency/>>. Acesso em 24 de fev. de 2021.

CLEAR ENERGY REVIEWS. **Highest quality and most efficient solar panels**. Disponível em: <<https://www.cleanenergyreviews.info/blog/best-quality-solar-panels-manufacturers>>. Acesso em 24 de fev. de 2021.

CHIRAP, A. & V., POPA & COCA, EUGEN & POTORAC, ALIN DAN. A study on light energy harvesting from indoor environment: The autonomous sensor nodes. **2014 International Conference on Development and Application Systems, DAS 2014 - Conference Proceedings**.

CORREIA, S. F. H. et al. Luminescent solar concentrators: challenges for lanthanide-based organic–inorganic hybrid materials. **Journal of Materials Chemistry A**, v. 2, n. 16, p. 5580-5596, 2014.

CORREIA, S. F. H. et al. Scale up the collection area of luminescent solar concentrators towards metre-length flexible waveguiding photovoltaics. **Progress in Photovoltaics**, v. 24, n. 9, p. 1178-1193, Setembro 2016.

CORREIA, S. F. H. **Organic-inorganic hybrid materials for green photonics: luminescent solar concentrators**. Tese (Doutorado em Física) – Departamento de Física da Universidade de Aveiro, Portugal, 2017.

DEBIJE, M. G.; VERBUNT, P. P. C. Thirty Years of Luminescent Solar Concentrator Research: Solar Energy for the Built Environment. **Advanced Energy Materials**, v. 2, n. 1, p. 12-35, 2012.

ENERGY SAGE. **The best solar panels to buy in 2019**. Disponível em: <<https://news.energysage.com/best-solar-panels-complete-ranking/>>. Acesso em 24 de fev. de 2021.

FERREIRA, R. A. S., CORREIA, S. F. H., MONGUZZI, A., *et al.* Spectral Converters for photovoltaics – What's ahead. **Materials Today**, v. 33, p.105-121, 2020.

FRANK, A. J.; OTVOS, J. W.; CALVIN, M. The Quenching of Rhodamine 101 Emission in Methanol and in Colloidal Suspensions of Latex Particles. **Journal of Physical Chemistry**. 1978

GOFTAR, M. K.; MORADI, K.; KOR, N. M. Spectroscopic studies on aggregation phenomena of dyes. **European Journal of Experimental Biology**. v. 4(2), p. 72-81.

HERMANN, A. M. Luminescent solar concentrators - a review. **Solar Energy**, v. 29, n. 4, p. 323-329, 1982.

HOOGENBOOM, R., BECER, C. R., GUERRERO-SANCHEZ, C., HOEPPENER, S., SCHUBERT, U. S. (2010). Solubility and thermoresponsiveness of PMMA in alcohol-water solvent mixtures. **Australian journal of chemistry**, v.63, n.8, p. 1173-1178, 2010.

HUANG, X. *et al.* Enhancing solar cell efficiency: the search for luminescent materials as spectral converters. **Chemical Society Reviews**, v. 42, n. 1, p. 173-201, 2013.

Instituto de Sistemas de Energia Solar Fraunhofer. Relatório Fotovoltaico de 16 de Setembro de 2020. Disponível em <<https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/Photovoltaics-Report.pdf>>. Acesso em 24 de fev. 2021

JONASZ, M.; FOURNIER, G. R.; Light Scattering by particle in Water: Theoretical and Experimental Foundations. **Academic Press**. 2007.

KHUBIN, R. F.; FLETCHER, A. N. Fluorescence Quantum Yields of Som Rhodamine Dyes. **Journal of Fluorescence**. v. 27, p. 455 – 462, 1982.

KRAUTER, S. C. W. Solar Electric Power Generation-Photovoltaic Energy Systems, 2006.

KRISTOFFERSEN, A. S.; ERGA, S. R.; HAMRE, B.; FRETTE, O. Testing Fluorescence Lifetime Standards using Two-Photon Excitation and Time-Domain Instrumentation: Rhodamine B, Coumarin 6 and Lucifer Yellow. **Journal of Fluorescence**. v. 24 (4), p. 1015-1024, 2014.

MCHELOV-PETROSYAN, N. O.; KHOLIN, V. Aggregation of Rhodamine B in Water. **Russian Journal of Applied Chemistry**. v. 77, n.3, p.414-422, 2004.

MILES, D. C.; BRISTORN, J. H. Tecnologia dos polímeros. São Paulo: Polígono S.A., 1975.

PANDEY, K. K.; PANT, T. C.; Migration modulated donor-acceptor energy transfer in PMMA. **Journal of Luminescence**, v. 47, p. 319-325.

RONDÃO, R. et al. High-performance near-infrared luminescent solar concentrators. **ACS applied materials & interfaces**, v. 9, n. 14, p. 12540-12546, 2017.

ROSENBERG, J. L.; HUMPHRIES, F. S. Oxygen Quenching of Acriflavine Phosphorescence. **The Journal of Physical Chemistry**. v.71, n.2, p. 330-338, 1967.

SLOOFF, Lenneke H., et al. A luminescent solar concentrator with 7.1% power conversion efficiency. **physica status solidi (RRL)–Rapid Research Letters**, v.2, n.6; p. 257-259, 2008.

VAN SARK, W. Luminescent solar concentrators - A low cost photovoltaics alternative. **Renewable Energy**, v. 49, p. 207-210, 2013.

VERMA, P.; PAL, H. Aggregation Studies of Dipolar Coumarin-153 dye in Polar Solvents: A Photophysical Study. **The Journal of Physical Chemistry A**, v. 118 (34), p. 6950-6964, 2014.

YUZHAKOV, V. I. Aggregation of dye molecules and its influence on the spectral luminescent properties of solutions. **Russian Chemical Reviews**. v. 61, n.6, p. 1114-1141.

ZIEMANN, O. et al. POF-polymer optical fibers for data communication. **Springer Science & Business Media**, 2002