



Universidade Federal  
do Rio de Janeiro  

---

Escola Politécnica

## **PROJETO DE UM SISTEMA DE MÚLTIPLOS MICRORREATORES EM PARALELO PARA SÍNTESE DE BODIESEL POR PROCESSO CONTÍNUO**

Gabriel Rocha de Farias

Projeto de Graduação apresentado ao Curso de Engenharia Mecânica da Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Engenheiro.

Orientador: Carolina Palma Naveira Cotta

Rio de Janeiro

Dezembro de 2014

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO**

Departamento de Engenharia Mecânica

DEM/POLI/UFRJ

**Projeto de um Sistema de Múltiplos Microrreatores em Paralelo para Síntese de Biodiesel por Processo Contínuo**

GABRIEL ROCHA DE FARIAS

PROJETO FINAL SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA DA ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO MECÂNICO.

Aprovado por:

---

Prof. Carolina Palma Naveira Cotta, D.Sc.

---

Prof. Renato Machado Cotta, PhD

---

Prof. Marcelo José Colaço, D.Sc.

---

Prof. Carlos Antônio Cabral dos Santos, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

DEZEMBRO DE 2014

Farias, Gabriel Rocha de

Projeto de um Sistema de Múltiplos Microrreatores em Paralelo para Síntese de Biodiesel por Processo Contínuo/Gabriel Rocha de Farias. – Rio de Janeiro: UFRJ / Escola Politécnica, 2008.

XIII, 104p.: il. ; 29,7cm.

Orientador: Carolina Palma Naveira Cotta

Projeto de Graduação –UFRJ/Escola Politécnica/Curso de Engenharia Mecânica, 2014.

Referências Bibliográficas: p. 100-102

1.Dispositivo. 2.Biodiesel. 3.Microreatores. I.Cotta, Carolina Palma Naveira. II Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica, Departamento de Engenharia Mecânica. III. Título

*"E o meu medo maior é o espelho se quebrar"*

João Nogueira. "Espelho"

## AGRADECIMENTOS

Por todo amor e confiança que minha mãe, meu pai e meus irmãos sempre me deram.

À Professora Carolina Palma Naveira Cotta por me orientar e confiar em mim durante este projeto, sempre exigindo meu melhor.

À Laura, por tornar momentos difíceis mais fáceis, mesmo quando não se dava conta disso.

Aos participantes da equipe Minerva Aerodesign de 2012, que me fizeram perceber o quanto eu queria ser um engenheiro mecânico.

## **AGRADECIMENTOS À ANP**

Este projeto foi desenvolvido com apoio do Programa de Recursos Humanos da ANP , que visa contribuir para a produção acadêmica e formação de profissionais especializados na indústria dos biocombustíveis, petróleo e gás natural

A supervisão e metodologia de acompanhamento do aluno bolsista, exigida pela ANP, o auxilia ao longo do desenvolvimento do projeto e no processo de pesquisa, facilitando em diversos pontos a organização e o planejamento do trabalho.

Agradeço à ANP, particularmente ao PRH-37, por incentivar a pesquisa no ramo dos biocombustíveis e pelo apoio na conclusão deste projeto de graduação.

Resumo do Projeto de Graduação apresentado à Escola Politécnica/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro Mecânico.

## Projeto de um Sistema de Múltiplos Microrreatores em Paralelo para Síntese de Biodiesel por Processo Contínuo

Gabriel Rocha de Farias

Dezembro/2014

Orientador: Prof. Carolina Palma Naveira Cotta

Curso: Engenharia Mecânica

O biodiesel tem sofrido crescentes participação e importância no cenário brasileiro devido à determinação de sua utilização em um percentual cada vez maior da mistura do diesel fóssil, que tem sua principal aplicação no setor de transportes. Esse aumento traz consigo uma demanda energética que intensifica a necessidade de processos mais eficientes e mais rápidos na geração do biocombustível. Este projeto desenvolveu um dispositivo capaz de aprimorar o processo de geração deste biocombustível através de reações em microescala e suas vantagens.

O dispositivo para síntese de biodiesel através da paralelização de microreatores aqui projetado terá chips de aço inoxidável com duas diferentes funcionalidades: na face superior ocorrerá a transesterificação e na face inferior haverá escoamento de água aquecida, que através da troca de calor, permitirá que a reação ocorra a uma temperatura otimizada.

Foram consideradas condições de geração contínua através da mistura de óleo de soja, etanol anidro e catalisador químico heterogêneo (NaOH), além de dispôr os elementos do dispositivo de maneira compacta e tentando atingir um alto grau de portabilidade. Todos os componentes necessários para o funcionamento do gerador foram dimensionados, apesar de, quando possível, permitir flexibilidade àquele que tentar reproduzir a fabricação do microreator. A máquina de síntese contínua aqui desenvolvida é capaz de produzir 15L de biodiesel diariamente e suprir a demanda energética de uma residência.

Palavras-chave: Microreatores, Paralelização, Biodiesel, Transesterificação.

Abstract of Undergraduate Project presented to POLI/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Mechanical Engineer.

## Project of Multiple parallelized Microreactors For Continuous Biodiesel Synthesis

Gabriel Rocha de Farias

December/2014

Advisor: Carolina Palma Naveira Cotta

Course: Mechanical Engineering

Biodiesel has become more important in Brazilian cenarium since it was determined to be mixed into the moisture of fossil diesel, most used in the transports sector. This determination causes an increasing demand for this biofuel production and makes improvement in it synthesis more urgent. This work has developed a mechanism that generates biodiesel in microscale conditions and uses its advantages to benefit the biodiesel generation industry.

This mechanism will be fundamentally made from parallelization of microchips in what the biofuel generation will happen. These microchips are going to be made of stainless steel and will have two main functions: biodiesel synthesis in its upper face and hot water flow in its lower face, which has the purpose of warming up the reactants and maintains the reaction at high temperatures through heat transfer.

It was considered a non-stopping generation as working condition, soybean oil and anhydrous ethanol as reactants, NaOH as catalyst, besides locating all the components in the most compact way and trying to reach a high portability level.

All the components of the device were designed, despite a different configuration could be chosen, whenever it was possible, so it could become more flexible to reproduce the construction method written in this work.

The device of continuous synthesis designed can generate more than 15L of biodiesel per day, what can supply the energy consumption of a small house.

Key words: Microreactors, Parallelisation, Biodiesel, Transesterification.

## Sumário

1	Introdução .....	1
1.1	Motivação .....	1
1.2	Objetivos .....	6
1.3	Organização do Trabalho .....	7
2	Revisão Bibliográfica .....	9
2.1	- Escoamentos reativos em microdispositivos .....	9
2.2	- Síntese de biodiesel em microrreatores .....	9
2.3	- Aplicações de múltiplos microrreatores em paralelo .....	10
2.4	Patentes .....	12
2.5	Parâmetros da transesterificação .....	13
2.6	Desenvolvimento e Fabricação .....	14
3.	Configuração do Dispositivo .....	17
3.1	Microchips .....	20
3.1.1	Face da transesterificação .....	26
3.1.2	Face com escoamento de água aquecida .....	27
3.2	Selagem .....	28
3.2.1	Selagem unitária .....	28
3.2.2	Selagem de Módulos .....	29
4.	REAPROVEITAMENTO ENERGÉTICO .....	30
4.1	Troca calorífica do Óleo .....	31
4.2	Troca Calorífica do Álcool .....	36
5.	Dimensionamento de Microchips paralelizados .....	41
5.1	Produção de microchip unitário .....	41

5.2 Análise de Demanda Energética .....	42
5.2.1 Simulador de consumo caseiro .....	43
5.2.2 Geração energética .....	44
5.2.3 Análise comparativa Biodiesel x Diesel em grupo gerador .....	44
5.3 Divisão de Módulos e Macromódulos .....	45
6. Tubulação de Abastecimento.....	49
6.1 Tubulação principal de seção variável.....	50
6.2 Tubulação de abastecimento dos módulos.....	64
6.3 Utilização de uma bomba por fluido .....	64
6.4 Válvulas .....	71
7 Perda de Carga.....	74
7.1 Perda de carga devido ao escoamento de água .....	76
7.2 Nas tubulações de Álcool, Óleo e Biodiesel .....	81
7.3 Perda de carga por acidentes.....	90
7.4 Bombas .....	92
8 Conclusão e SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS .....	97
8.1 Sugestões de trabalhos futuros.....	97
8.1.1 Catalisador Enzimáticos .....	98
8.1.2 Sensores de Vazão .....	99
8.1.3 Chapas Finas.....	100
8.1.4 Otimização da face do trocador de calor .....	100
Referências Bibliográficas.....	102

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1: USINA DE BIODIESEL POR BATELAMENTO DA METHES ENERGY	2
FIGURA 2: REATOR DE BIODIESEL A PARTIR DE MICRORREADORES ( <i>BILLO ET AL. , 2014</i> )	3
FIGURA 3: ILUSTRAÇÃO DE MICROREATOR E SEUS MICROCANAIS ( ADAPTADO DE <i>AL-DHUDABIAN,2005</i> )	3
FIGURA 4: EXEMPLO DE UM MÓDULO DE 30 CELULAS FOTOVOLTAICAS DE ALTA CONCENTRAÇÃO DO FABRICANTE SAUNFLOWER;	4
FIGURA 5: DESENHO ESQUEMATICO QUE ILUSTRA A CONCENTRAÇÃO SOLAR PELA LENTE DE FRESNEL.	5
FIGURA 6: CONCEPÇÃO DO SISTEMA COMBINADO HPCV COM RECUPERAÇÃO TÉRMICA PARA SINTESE DE BIODIESEL.	5
FIGURA 7: ILUSTRA A POSSIBILIDADE DE PARALELIZAÇÃO DO MICRORREADORES E CONSEQUENTEMENTE DA PRODUÇÃO DE BIODIESEL	6
FIGURA 8: DESENHO ESQUEMÁTICO DE MICRORREATOR	7
FIGURA 9: REAÇÃO DE TRANSESTERIFICAÇÃO DE UM TRIGLICERÍDEO (GARCIA APUD CHEN , 2012)	10
FIGURA 10: SISTEMA DE SELAGEM DOS MICROREADORES E DIFERENTES GEOMETRIAS (ADPTADO DE A.SALIC E B.ZELIC,2011)	12
FIGURA 11: MICROREADORES LINEARIZADOS. DENNIS(2013)	13
FIGURA 12: VOLUME ÚNICO COM RODAS PARA MANUSEIO. DENNIS(2013)	13
FIGURA 13: MÓDULO COM 50 MICROCHIPS. BILLO ET AL.( 2014)	15
FIGURA 14: DISPOSITIVO COM 9 PARAFUSOS DE SELAGEM, CANAIS DE INJEÇÃO E 2 PINOS GUIA(ADAPTADO DE BILLO ET AL.(2014) )	15
FIGURA 15: INDICAÇÃO DO MICROCHIP NA MONTAGEM COMPLETA	17
FIGURA 16: DESENHO ESQUEMÁTICO DO MICRORREATOR COM MICROCANAL DE TRANSESTERIFICAÇÃO E MICROCANAIS DE TROCA DE CALOR	18
FIGURA 17: MODELO DE MICROCHIPS E LÂMINAS DE VEDAÇÃO PARALELIZADOS	19
FIGURA 18: CHIPS PARALELIZADOS SELADOS ATRAVÉS DE PARAFUSOS ( ADAPTADO DE <i>BILLO ET AL.,2014</i> )	19
FIGURA 19: DEMONSTRAÇÃO DE TUBULAÇÃO FORMADA POR FURAÇÕES SOBREPOSTAS E ESCOAMENTO ENTRANDO NOS MICROCHIPS	20
FIGURA 20: FACE DO MICROCHIP EM QUE OCORRE A TRANSESTERIFICAÇÃO	22
FIGURA 21: FACE DO TROCADOR DO CALOR DO MICROCHIP	23
FIGURA 22: MODELO DE TUBULAÇÃO ANTERIOR AOS MÓDULOS COM DERIVAÇÃO OCORRENDO IMEDIATAMENTE ACIMA DOS MÓDULOS .	23
FIGURA 23: VISTA LATERAL DOS MÓDULOS, MOSTRANDO AS TUBULAÇÕES QUE OS ABASTECEM	24
FIGURA 24: IMAGEM ILUSTRATIVA DA DIFERENÇA ENTRE A TUBULAÇÃO IMEDIATAMENTE ACIMA E À LATERAL DOS MÓDULOS	25
FIGURA 25: A -DIMENSÃO DA ALTURA DO MICROCANAL. B-DIMENSÃO DA LARGURA DO MICROCANAL	26

FIGURA 26: POSIÇÃO DOS MICROCANAIS DE ÁGUA EM RELAÇÃO AOS MICROCANAIS DE ÓLEO (REGIÃO DE ENTRADA)	27
FIGURA 27: ABERTURA INERENTE AO PROCESSO DE USINAGEM DE MICROCANAIS EM UM MICROCHIP	28
FIGURA 28: MICROCANAIS SELADOS	28
FIGURA 29: DIFERENTES VISTAS DA MONTAGEM DO MICROCHIP COM TAMPA DE SELAGEM	29
FIGURA 30: DIMENSÕES DA VISTA LATERAL DE UM MICRORREATOR E UMA CHPA DE VEDAÇÃO	29
FIGURA 31: MODELO REPRESENTATIVO DA TROCA DE CALOR QUE OCORRE EM FLUXOS CONCORRENTES	30
FIGURA 32: VARIAÇÃO DA CONDUTIVIDADE TÉRMICA DO ÓLEO DE SOJA E ALGODÃO EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA	31
FIGURA 33: ALTURA DOS MICROCANAIS E DISTÂNCIA ENTRE ELES	32
FIGURA 34: INDICAÇÃO DA LARGURA DE QUALQUER MICROCANAL DO MICRORREATOR.	32
FIGURA 35: INÍCIO E FINAL DA TROCA DE CALOR COM REAGENTES	33
FIGURA 36: INÍCIO E FIM DA REGIÃO DO TROCADOR DE CALOR ENTRE ÁLCOOL E ÁGUA	36
FIGURA 37: PODER CALORÍFICO DE ALGUNS ÓLEOS VEGETAIS ( AALBORG INDUSTRIES)	39
FIGURA 38 : DENSIDADE ÓLEOS VEGETAIS . BROCK ET AL.(2008)	39
FIGURA 39: CONDUTIVIDADE TÉRMICA ÓLEOS VEGETAIS . BORCK ET AL.(2008)	40
FIGURA 40: GRUPO GERADOR ( <a href="http://www.brasutil.com/produto/gerador+de+energia+diesel++10hp+6,5kva+trif%C3%A1sico+220v+painel+autom%C3%A1tico+ats+-+toyama/1275/TD7000CX3EDATS">HTTP://WWW.BRASUTIL.COM/PRODUTO/GERADOR+DE+ENERGIA+DIESEL++10HP+6,5KVA+TRIF%C3%A1SICO+220V+PAINEL+AUTOM%C3%A1TICO+ATS+-+TOYAMA/1275/TD7000CX3EDATS</a> )	44
FIGURA 41: REPRESENTAÇÃO DE 1 MÓDULO COM 50 MICROCHIPS SELADOS	46
FIGURA 42: REPRESENTAÇÃO DO SISTEMA COM 700 MICROCHIPS	47
FIGURA 43: REPRESENTAÇÃO DE 1 MACROMÓDULO	48
FIGURA 44: MODELO DOS DIFERENTES TRECHOS DE TUBULAÇÃO DO DISPOSITIVO	49
FIGURA 45: MODELO DE TUBULAÇÃO PRINCIPAL E DERIVAÇÕES	51
FIGURA 46: DESENHO ESQUEMÁTICO DA VARIAÇÃO DA SEÇÃO TRANSVERSAL COMPENSANDO A VARIAÇÃO DE VAZÃO E MANTENDO A VELOCIDADE NA TUBULAÇÃO PRINCIPAL CONSTANTE	52
FIGURA 47: REPRESENTAÇÃO DE TUBULAÇÃO ANÁLOGA À GERADA PELA FURAÇÃO DE DIFERENTES DIÂMETROS	55
FIGURA 48: REPRESENTAÇÃO DOS DIFERENTES DIÂMETROS DA TUBULAÇÃO PRINCIPAL	56
FIGURA 49: DIÂMETROS DAS SEÇÕES TRANSVERSAIS DA TUBULAÇÃO PRINCIPAL A CADA MICROCHIP	63
FIGURA 50: TUBULAÇÃO DE ABASTECIMENTO DOS MÓDULOS	64
FIGURA 51: DIÂMETRO DA SEÇÃO TRANSVERSAL DO DUTO ANTERIOR AOS MÓDULOS APÓS A PASSAGEM POR CADA MÓDULO	68
FIGURA 52: DESENHO DA TUBULAÇÃO EXTERNA- DESDE A BOMBA ATÉ OS MACROMÓDULOS - VISTA SUPERIOR	69
FIGURA 53: DESENHO DA TUBULAÇÃO EXTERNA -DESDE A BOMBA ATÉ OS MACROMÓDULOS - VISTA LATERAL	70
FIGURA 54: REPRESENTAÇÃO DE VÁLVULAS NO TRECHO 2 DA TUBULAÇÃO	73
FIGURA 55: TRECHOS 1, DESTACADO COM AS LINHAS EM VERDE, E 2 , COM AS LINHAS EM PRETO	74

FIGURA 56: MODELO DE MICROBOMBA ( <i>DATASHEET BIERI INTERNATIONAL</i> )	95
FIGURA 57: INFORMAÇÕES TÉCNICAS DA BOMBA ( <i>DATASHEET BIERI INTERNATIONAL</i> )	95
FIGURA 58: DESENHO TÉCNICO MICROBOMBA ( <i>DATASHEET BIERI INTERNATIONAL</i> )	95

## Lista de Tabelas

TABELA 1: COMPARAÇÃO ENTRE TROCADORES DE CALOR DE DIFERENTES ESCALAS( ADAPTADO DE A.SALIC E B.ZELIC,2011)	11
TABELA 2: TABELA DE CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO. <i>BILLO ET AL.(2014)</i>	16
TABELA 3: TEMPERATURAS ÁGUA X ÓLEO DE SOJA	33
TABELA 4: VAZÕES DE INJEÇÃO	33
TABELA 5: PROPRIEDADES DOS FLUIDOS (ADAPTADO DE <i>OSIZIK, 1985; BROCK ET AL.,2008</i> )	34
TABELA 6: NUSSELT ( $T = CTE$ NA PAREDE, SEÇÃO QUADRADA) OZISIK(1985)	34
TABELA 7 :CONSTANTES TÉRMICAS DE TROCA POR CONVECÇÃO	34
TABELA 8: TEMPERATURAS ÁGUA X ETANOL	37
TABELA 9: VAZÕES DE INJEÇÃO	37
TABELA 10: PROPRIEDADES DOS FLUIDOS	37
TABELA 11: CONSTANTES TÉRMICAS	38
TABELA 12 PROPRIEDADES ÁGUA . OZISIK (1985)	39
TABELA 13: PARÂMETROS DE REAÇÃO	42
TABELA 14: VOLUME PRODUZIDO POR 1 MICROCHIP	42
TABELA 15: DIMENSIONAMENTO DA TUBULAÇÃO PRINCIPAL DE ÓLEO	58
TABELA 16: DIMENSIONAMENTO DA TUBULAÇÃO PRINCIPAL DE ÁLCOOL	59
TABELA 17: DIMENSIONAMENTO DA TUBULAÇÃO PRINCIPAL DE ÁGUA	61
TABELA 18: DIMENSIONAMENTO DA TUBULAÇÃO QUE ANTECEDE OS MÓDULOS (ESCOAMENTO DE ÓLEO)	66
TABELA 19: DIMENSIONAMENTO DA TUBULAÇÃO QUE ANTECEDE OS MÓDULOS (ESCOAMENTO DE ETANOL)	66
TABELA 20: DIMENSIONAMENTO DA TUBULAÇÃO QUE ANTECEDE OS MÓDULOS (ESCOAMENTO DE ÁGUA)	67
TABELA 21: CÁLCULO DA PERDA DE CARGA NO TRECHO 2 (ESCOAMENTO DE ÁGUA)	78
TABELA 22: CÁLCULO DA PERDA DE CARGA NO TRECHO 3(ESCOAMENTO DE ÁGUA)	79
TABELA 23: RE E F , NO TRECHO 2 DO ESCOAMENTO DE ÁLCOOL	82
TABELA 24: PERDA DE CARGA NO ESCOAMENTO DE ÁLCOOL (TRECHO 2)	82
TABELA 25: PERDA DE CARGA POR SEÇÃO , NO TRECHO 3 DO ESCOAMENTO DE ÁLCOOL	83
TABELA 26: RE E F NO TRECHO 2 DO ESCOAMENTO DE ÓLEO DE SOJA	85
TABELA 27: PERDA DE CARGA NO TRECHO2 DO ESCOAMENTO DE ÓLEO DE SOJA	85
TABELA 28: PERDA DE CARGA NO TRECHO 3 DO ESCOAMENTO DE ÓLEO DE SOJA	85
TABELA 29: PERDA DE CARGA DEVIDO AS FASES DE ÁLCOOL E ÓLEO DE SOJA COEXISTINDO	88
TABELA 31: PERDA DE CARGA NO TRECHO3 DO ESCOAMENTO DE BIODIESEL	89
TABELA 32: PERDA DE CARGA, REYNOLDS E FATOR DE ATRITO EM CADA SEÇÃO DO TRECHO2, NO ESCOAMENTO DE BIODIESEL	90

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Motivação

O crescente interesse mundial no desenvolvimento de tecnologias que viabilizem a exploração de energias renováveis vem se tornando mais concreto e urgente. A utilização de combustíveis fósseis vem sendo cada vez alvo de críticas devido a sua ligação direta com o aquecimento global. Devido a essa realidade, é uma tendência global reduzir o consumo de combustíveis não renováveis e substituí-los gradualmente por fontes sustentáveis. Inúmeros países já vêm se mobilizando há anos para incentivar a pesquisa no âmbito de energias não agressivas ao meio ambiente.

No Brasil, desde a década de 70, há foco no crescimento do conhecimento sobre os processos, as propriedades e as tecnologias acerca da geração de biocombustíveis à partir de óleos vegetais. Devido à abundância de recursos naturais, a produção de óleos combustíveis oriundos de fontes naturais é viável e traz grandes vantagens em relação a emissão de gases estufa e à sustentabilidade da cadeia de produção. Hoje, o Brasil é terceiro maior produtor de biodiesel do Mundo - com 2,9 Bilhões de litros produzidos em 2013-( ficando atrás apenas dos Estados Unidos), sendo a matriz de geração composta, em cerca de 80%, pelo óleo de soja e quase 20% de gordura bovina.

O biodiesel vem tendo uma participação e importância crescente no cenário brasileiro devido a determinação de sua utilização em um percentual da mistura do diesel fóssil, que tem sua maior aplicação no setor de transportes. Hoje, esse percentual é de 7%, denominado Diesel B7. Esse aumento traz consigo uma demanda energética que intensifica a necessidade de processos mais eficientes e mais rápidos na geração desse biocombustível.

Dessa maneira, esse trabalho se propõe a um estudo extremamente inovador, que pode levar a produção de biodiesel à regiões mais remotas, além de potencialmente modificar toda a cadeia de produção industrial do processo de transesterificação. Isso se dá principalmente pelo fato de o atual processo principal de síntese de biodiesel ser o batelamento.

Hoje, esse processo é realizado em tonéis de batelada. Esse tonéis são tanques com alto volume e peso, como mostrado na Figura 1, além de alto custo de implantação. O grande

porte é necessário para que estes tonéis possam gerar grandes capacidades de biodiesel (alguns chegam a gerar milhares de litros por batelada) e ter um valor agregado de sua produção que compense os custos de sua manutenção e operação. O fato de serem produzidos grandes quantidades de biodiesel por vez acaba prejudicando o rendimento e a eficiência da produção.

Essa geração é realizada em etapa única (cuja duração pode chegar a 9 horas, levando ao limite de apenas 3 produções diárias) e possui ainda muitos pontos a serem otimizados como o tempo de reação, taxas de conversão dos reagentes, separação de produtos (assim como a impureza destes), altos níveis de desperdício.



**Figura 1: Usina de biodiesel por batelamento da Methes Energy**

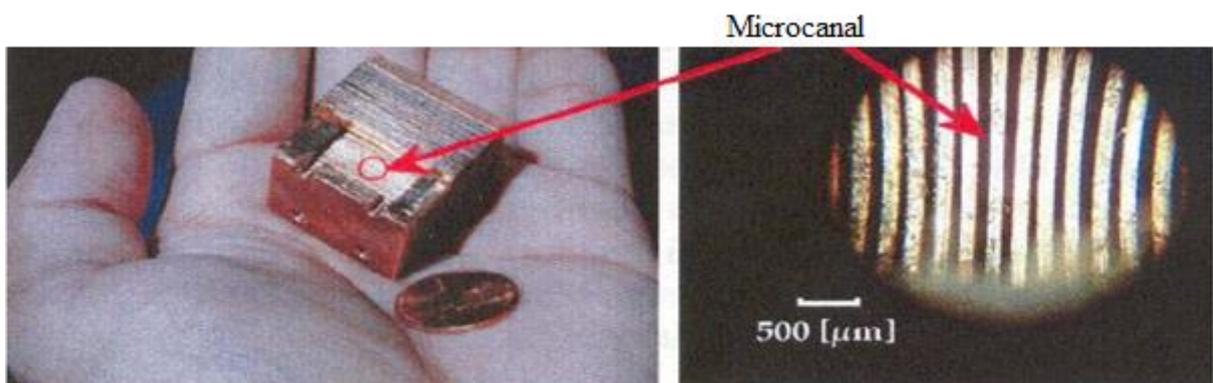
O processo de síntese proposto pelo presente estudo baseia-se em microrreatores, que possibilitam um menor desperdício, é mais rápido, possui altíssimas taxas de conversão no processo de transesterificação e se apresenta em menores volumes. Na

Figura 2, por exemplo, está mostrado, posicionado em uma mesa, o reator construído por *Billo et al, 2014*, a partir de microrreatores. Por isso, um dispositivo que alie todos esses aprimoramentos pode alavancar a produção industrial ao atingir níveis competitivos de produção. Além de permitir maior controle de qualidade do processo e com maior flexibilidade de produção.



**Figura 2: Reator de biodiesel a partir de microrreatores ( *Billo et al. , 2014* )**

A intensificação das trocas necessárias à reação e da maior velocidade das microrreações são consequência da alta relação área superficial-volume. Na Figura 3 está ilustrado um microreator usado no trabalho de *Al-Dhudabian(2005)* , onde é possível visualizar a ordem de grandeza das dimensões dos microcanais e sua particular propriedade de alta relação área x volume. Essa particularidade tem fundamental importância no processo de transesterificação dentro de um microcanal, permitindo o alcance de índices de eficiência muito mais altos do que os encontrados nos processos atuais de produção em tonéis de batelada.



**Figura 3: Ilustração de microreator e seus microcanais ( adaptado de *AL-DHUDABIAN,2005* )**

O microrreator projetado neste trabalho também visa realizar um reaproveitamento energético provindo de sua integração com um sistema de resfriamento de células de painéis fotovoltaicos.

A proposta de combinar células fotovoltaicas de alta concentração (HCPV) com recuperação térmica para síntese de biodiesel objetiva de forma simultânea tratar os problemas térmicos inerentes à conversão direta de energia solar em energia elétrica investigando uma concepção simples de um dissipador térmico baseado em micro-canais integrados às células fotovoltaicas, *Guerrieri et al.( 2013)*; *Knupp et al.(2013)*, para o resfriamento eficiente destas células fotovoltaicas de alta concentração (HCPV). Além disso, a utilização do calor removido das células, por recuperação térmica, em processos contínuo de síntese de biodiesel em microrreatores, será também aqui explorada. O sistema HCPV , recentemente adquirido da Sunflower da Coreia do Sul, foi utilizado como referência neste projeto e é apresentado na Figura 4.



**Figura 4: Exemplo de um módulo de 30 células fotovoltaicas de alta concentração do fabricante Saunflower;**

Cada modulo deste painel possui 30 células que se utilizam de lentes de Fresnel para concentrar 1200 sóis em uma pequena área de silício de apenas 1cm<sup>2</sup>, como ilustrado no desenho equemático apresentado pela Figura 5.

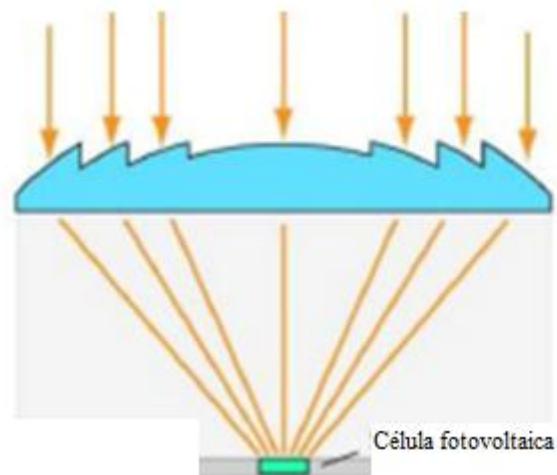


Figura 5: Desenho esquemático que ilustra a concentração solar pela lente de Fresnel.

A Figura 6 ilustra a concepção do sistema combinado de resfriamento das células fotovoltaicas com a recuperação do calor rejeitado pelas células para síntese de biodiesel.

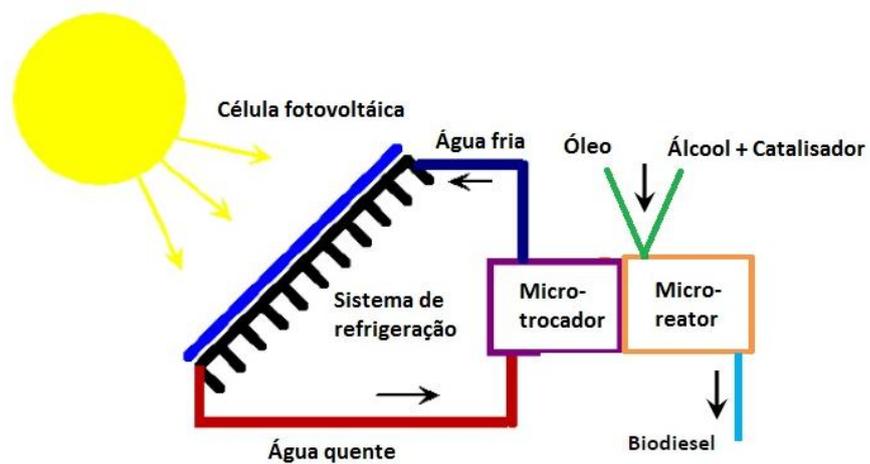
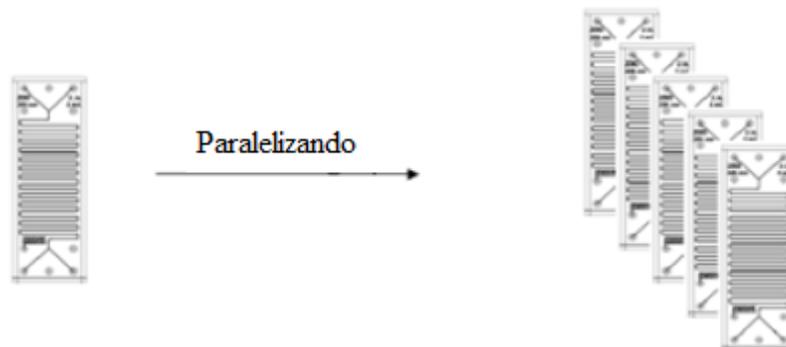


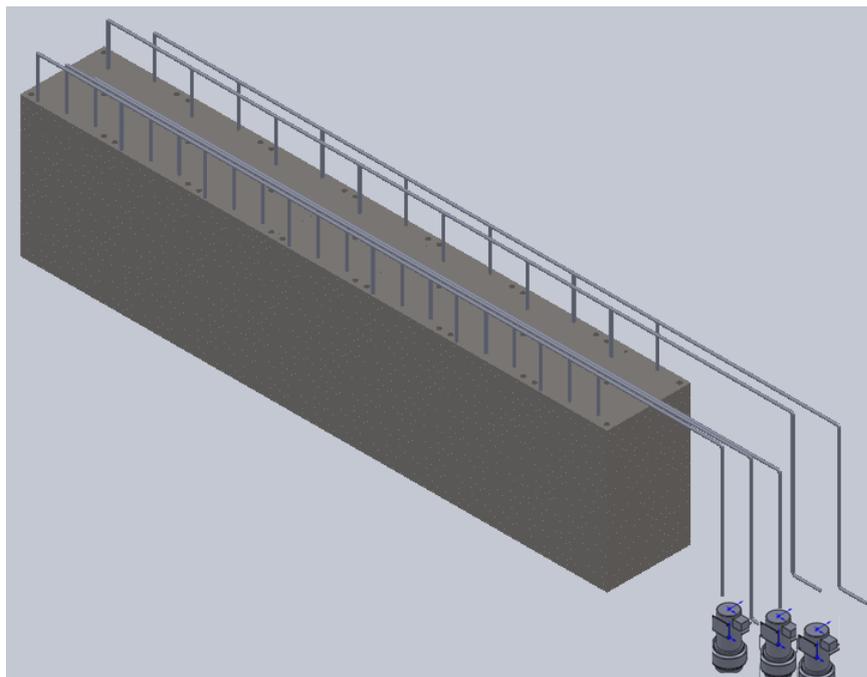
Figura 6: Concepção do sistema combinado HPCV com recuperação térmica para síntese de biodiesel.

## 1.2 Objetivos

Neste contexto, o objetivo do presente trabalho é apresentar o projeto de um sistema de múltiplos microrreatores paralelizados, processo exemplificado na Figura 7- visando aliar a alta produtividade de biodiesel que um grande número de microrreatores podem sintetizar e suas vantagens únicas, como altas taxas de conversão (alguns chegam a atingir 99% de conversão) e, por consequência, baixo desperdício de reagentes, baixos tempos de residência (na ordem de minutos), baixo volume, baixo peso; etc - com re-utilização de calor rejeitado para aumento das eficiências de conversão, capaz de gerar biodiesel em quantidade significativa (capaz de gerar pouco mais de 15 litros diariamente que pode ser utilizada para suprir a demanda energética de uma pequena casa, por exemplo) e que seja mais portátil e flexível do que os atuais meios industriais de produção. Um modelo genérico de metade do microrreator projetado neste trabalho, com 350 microrreatores paralelizados, junto a suas tubulações de abastecimento e de saída dos fluidos, além das bombas do sistema, cujo processo de dimensionamento será mostrado nos capítulos que se seguem, está ilustrado na Figura 8..



**Figura 7: Ilustra a possibilidade de paralelização do microrreatores e conseqüentemente da produção de biodiesel**



**Figura 8: Desenho esquemático de microrreator**

Essa maior portabilidade do sistema em relação às plantas de produção por batelamento pode ser utilizada para suprir a necessidade energética de populações residentes em áreas remotas e com baixo acesso de métodos convencionais de fornecimento energético, além de ser mais um passo na direção de constituir um processo de produção de biodiesel, em quantidades aproveitáveis, através da microrreação.

### **1.3 Organização do Trabalho**

No capítulo 2 é apresentada uma revisão de literatura de assuntos que contemplam todo ou parte da tecnologia que este trabalho se predispõe a discorrer.

No capítulo 3, é mostrada a estrutura do elemento fundamental deste dispositivo, os microrreatores. Neste capítulo, são especificadas suas características geométricas e físicas, condições de funcionamento e metodologia de paralelização.

No capítulo 4 é apresentado o procedimento para cálculo dos pré trocadores de calor existentes nos microreatores deste dispositivo.

No capítulo 5 é explicitado o estudo realizado para cálculo do número de microrreatores capazes de atender a demanda energética de um domicílio. Estão presentes também todas as etapas de avaliação de consumo e geração dessa energia, assim como a divisão espacial com que os microchips serão organizados dentro do dispositivo aqui projetado.

O capítulo 6 contém a dimensionalização das tubulações envolvidas no processo de escoamento dos fluidos dentro do sistema de geração de biodiesel. Está ilustrado o método iterativo de cálculo do diâmetro de cada trecho dos dutos de distribuição, visto que é esse perfil de tubulação que garante as vazões de projeto de abastecimento dos microchips.

No capítulo 7 é calculada a perda de carga inerente à passagem dos fluidos reagentes através de todo o dispositivo, considerando o comprimento, os acidentes, os acessórios e a altura de todos os diferentes trechos de dutos do gerador.

No capítulo 8 está a conclusão do projeto e a dissertação acerca de alguns pontos de potencial aprimoramento em estudos futuros.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O estudo de produtos formados pela compactação de microssistemas, de maneira aliar a sua alta eficiência e pequeno porte a resultados práticos viáveis já vem sendo realizada por pesquisadores. Já no âmbito do biodiesel, microrreatores capazes de produzir quantidades significativas de biocombustível ainda estão em início de pesquisa, sendo assim , um campo a ser intensamente explorado.

### 2.1 - Escoamentos reativos em microdispositivos

*M Kersaudy-Kerhoas(2010)* mostrou um estudo de design de dispositivos para sistemas microfluídicos de separação de plasma sanguíneo, analisando o escoamento em tubulações com derivações e técnicas de fabricação (utilizou o modelo de parâmetros concentrados), para determinação da vazão desses sistemas e em todos os microcanais, principais ou derivados).

Foi realizado um estudo teórico do comportamento do fluido em tubulações com diferentes geometrias de canais secundários ( diferentes angulações das derivações, por exemplo) além de avaliar a dificuldade de construção, o custo para fazê-lo e outras características inerentes à fabricação do sistema.

*Costa Junior(2012)* fez uma análise teórico experimental de micromisturadores através de um estudo de diversas configurações geométricas diferentes, com observação das características térmicas da mistura, utilizando-se de métodos como termografia por infravermelho para determinar perfis de temperatura sem interferir no sistema. A mistura dos reagentes é de fundamental importância para a reação de biodiesel obter altos índices de eficiência .

### 2.2 - Síntese de biodiesel em microrreatores

Chen(2012) analisou diferentes configurações de canais, gerando níveis altos de conversão, fez simulações numéricas em softwares computacionais para deter maiores informações do escoamento dentro destes microcanais e mostrou a enorme viabilidade de fabricação de microreatores para síntese de biodiesel, em polímeros fotossensíveis,

através da transesterificação. A transesterificação é o processo químico em que um álcool e um triglicerídeo reagem e têm como produto a formação de outro éster. Na Figura 9 é mostrada uma reação de transesterificação genérica(sem a especificação dos parâmetros, como o catalisador utilizado,por exemplo).

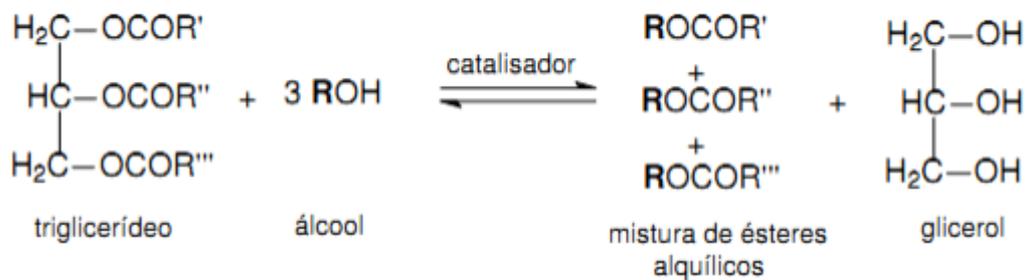


Figura 9: Reação de transesterificação de um triglicerídeo (GARCIA apud CHEN , 2012)

Este é o método de produção mais difundido mundialmente por ser relativamente simples e ser capaz de atribuir ao produto gerado propriedades muito próximas ao do diesel fóssil.

### 2.3 - Aplicações de múltiplos microrreatores em paralelo

A. Salic e B.Zelic(2011) mostraram as vantagens da síntese de biodiesel em microrreatores e a viabilidade de sistemas com a sua utilização em grande escala. O fizeram mostrando que a reação em microcanais, na faixa de 10 a 500 micrometros de dimensão lateral (seção quadrada), permite alto controle do processo de injeção de reagentes (e por consequência torna capaz uma rápida visualização do que está ocorrendo na reação e atribui maior segurança ao processo). Além disso, encontraram altos valores de troca de calor e massa, menores tempos de residência, menor uso de reagentes e catalisadores para obter o mesmo volume de produtos, assim como menor desperdício destes, menor peso total, maior compactabilidade do sistema, mistura eficiente dos reagentes, maior controle do processo

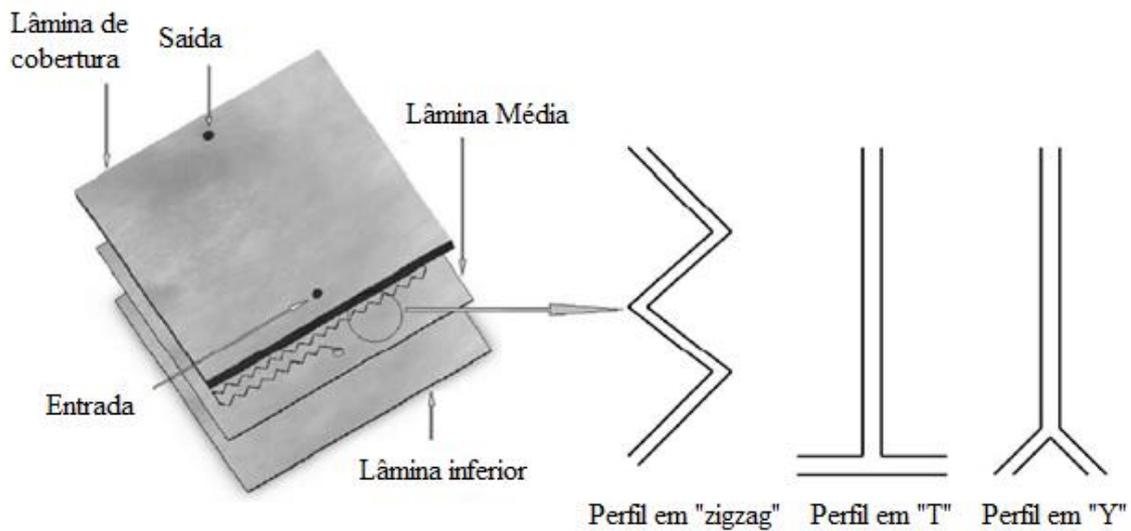
como um todo e menor consumo de energia do sistema ( todos esses parâmetros foram comparados a reatores de macroescala).

Também reforçam, como mostrado na Tabela 1., a alta eficiência de trocadores de calor na microescala, através dos altos coeficientes de troca de calor atingidos, e suas melhores propriedades em relação a trocadores na macroescala, como a maior razão área/volume.

Tabela 1: Comparação entre trocadores de calor de diferentes escalas( Adaptado de A.SALIC e B.ZELIC,2011)

Parâmetros	Trocador de Calor Casco Tubo	Trocador de Calor Compacto	Trocador de Calor de Microcanais
Razão Área / Volume $m^2/m^3$	50 - 100	850 - 1500	> 1500
Coefficiente de troca de calor $W/(m^2 K)$ (Líquido)	~ 5000 ( Tubos)	3000 - 7000	> 7000
Coefficiente de troca de calor $W/m^2 K$ (gas)	20 - 100	50 - 300	400 - 2000
Regime do Escoamento	Turbulento	Turbulento	Laminar

Já no que tange a paralelização , sua contribuição foi ainda maior pois mostraram como é mais fácil e eficiente multiplicar microreatores em vez de projetá-los em maiores volumes. Na Figura 10 são mostradas diferentes configurações (variados perfis de microcanais) e um sistema para vedação dos microchips que se utiliza de chapas unicamente para selagem ( sem interferência na reação), isso é, lâminas de cobertura, que não tem qualquer outra função que não seja vedar os microcanais. Possuem apenas a função de "tampas".



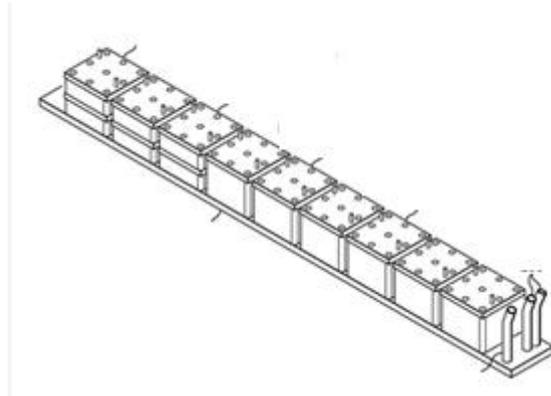
**Figura 10: Sistema de selagem dos microreatores e diferentes geometrias (adptado de A.SALIC e B.ZELIC,2011)**

## 2.4 Patentes

*Jovanovic (2009)* registrou a patente (publicação US20090165366 A1) de um dispositivo para fabricação de biodiesel com a utilização de microreatores. Foi estabelecido pela primeira vez uma organização em série de microreatores para síntese de biodiesel. O dispositivo teórico consegue obedecer alguns pré requisitos desejados no dispositivo que esse projeto visa desenvolver. Essas características são pequeno volume (tendo como dimensões finais um volume igual a 0,04m<sup>3</sup>), maior portabilidade, em relação à produção de biodiesel em tonéis de batelada, e capacidade de produção de biodiesel diária significativa (capaz de gerar pouco mais de 17 litros diariamente).

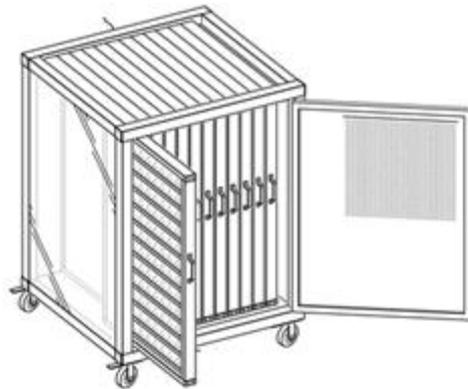
*Dennis(2011)* também registrou uma patente (Publicação US 20110060152 A1.) de um sistema com microreatores em paralelo (possuindo injeção de reagentes pela face do microchip), incluindo um método de armazenamento que permitia ter ainda mais microreatores paralelizados e com a garantia de um sistema compacto, simples de construir e com facilitadores para transporte.

Utilizou-se de microreatores instalados em série linearizadamente, como mostrado na Figura 11, compondo fileiras.



**Figura 11: Microreatores linearizados. Dennis(2013)**

Estas fileiras, por sua vez, foram agrupadas linearmente também porém em direção perpendicular a dos microreatores, compondo, todas juntas, um plano de microreatores (uma "placa"). Estas placas, como pode ser visto na Figura 12, eram armazenadas paralelamente dentro de um volume único e, para viabilizar a mobilização desse sistema, foram instaladas pequenas rodas.



**Figura 12: Volume único com rodas para manuseio. Dennis(2013)**

## **2.5 Parâmetros da transesterificação**

*Colombo (2009)* fez uma análise da influência dos catalisadores heterogêneos na reação de transesterificação em processos discretos tanto em termos absolutos quanto em relação aos catalisadores homogêneos, explicitando suas vantagens, como a geração de produtos da transesterificação mais puros após separação( o que diminui o tempo, os custos e o consumo

de energia nas etapas de purificação) e a não redução de atividade catalíticas após algumas reações - caracterizando o potencial para utilização de catalisadores heterogêneos em produção contínua-, mas também abordando suas desvantagens, como a baixa capacidade de reutilização de catalisadores já utilizados e a redução significativa daqueles poucos catalisadores regenerados após já desenvolvidos.

*Ahmad Al-Dhubabian(2005)* reforçou o uso dos catalisadores como fontes de aceleração da velocidade da transesterificação, sendo estes alcalinos (NaOH,KaOH), ácidos(H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) ou enzimáticos. Quando utilizados catalisadores alcalinos a reação de geração consegue ocorrer 400x mais rapidamente do que quando se usa a mesma quantidade de catalisadores ácidos, o que representa mais uma diferenciação positiva para os catalisadores deste tipo, justificando sua maior utilização no mercado( exceto quando o triglicerídio possui um alto percentual de ácidos graxos e água, onde os catalisadores ácidos são preferidos). Nos casos das transesterificações alcalinas ( como será a considerada neste projeto), o álcool utilizado tem que ser anidro, pois a água contribui para a formação de sabão e reduz a formação de ésteres, o que torna as etapas de separação dos produtos mais demorada e complexa.

*Masoud Rahimi(2014)* dissertou sobre os métodos de otimização da reação de biodiesel, abordando a influência dos fatores envolvidos e sendo capaz de determinar um peso a cada fator, onde seu peso estava diretamente interligado aos que mais determinavam a eficiência da transesterificação. Encontrou extrema relevância no montante de catalisador utilizado, na temperatura instalada durante o processo (sendo capaz até de determinar limite superior e inferior que levavam a resultados ótimos ), na relação álcool e óleo e no tempo de residência da reação. Principalmente a dependência da eficiência com a temperatura será intensamente explorada neste trabalho, devido a utilização de uma microcanais com água quente para manter a reação em uma temperatura desejada.

## **2.6 Desenvolvimento e Fabricação**

*Billo et al.(2014)* desenvolveram o projeto conceitual e fabricaram um sistema de geração de biodiesel através da paralelização de milhares de microrreatores. Neste trabalho, foi dada ênfase na construção e na capacidade produtiva do dispositivo.

O método de selagem utilizado, ilustrado na Figura 13, foi o de "tampa" e parafuso. Organizados em "grupos" (chamados "módulos") de 50 microreatores, a vedação foi feita através de apenas 2 chapas de aço inoxidável nas extremidades superior e inferior de cada módulo. Sua fixação foi feita por 9 parafusos, sendo 1 centralizado( é feito desta maneira para garantir a estanqueidade e estabilidade do sistema em série.), como apresentado na Figura 14.

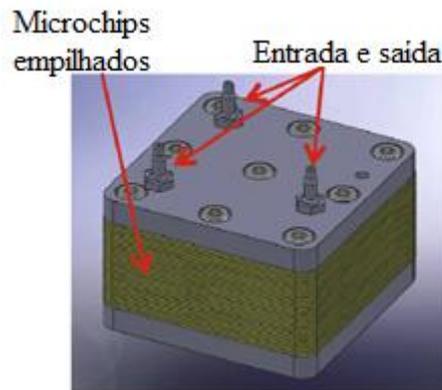


Figura 13: Módulo com 50 microchips. Billo et al.( 2014)

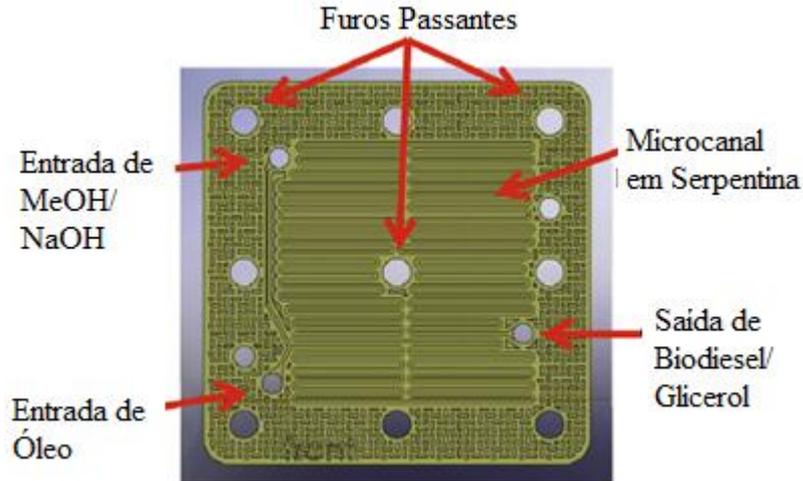


Figura 14:Dispositivo com 9 parafusos de selagem, canais de injeção e 2 pinos guia(Adaptado de Billo et al.(2014) )

O projeto utilizou Hidróxido de sódio e Metanol reagindo em dispositivos cujas dimensões eram 0,76mm de espessura e 5,7cm x 5,7cm (comprimento x altura). O material dos dispositivos foi escolhido Poli-Etileno de alta densidade, devido ao baixo custo e à não

reatividade com os fluidos. Os microcanais possuía seção quadrada (0,5mm de dimensão lateral) e comprimento total de 500mm.

*Billo et al.* também apresentaram a tabela 2, que mostra as condições de reação. Logo, garantindo que a reação ocorra a uma temperatura média de cerca de 65°C, com uma relação de óleo:álcool igual a 1:3, com vazão de 0.53L por hora e com concentração molar de catalisador de 0,9M, o processo deste dispositivo conseguiu obter 99% de conversão em biodiesel.

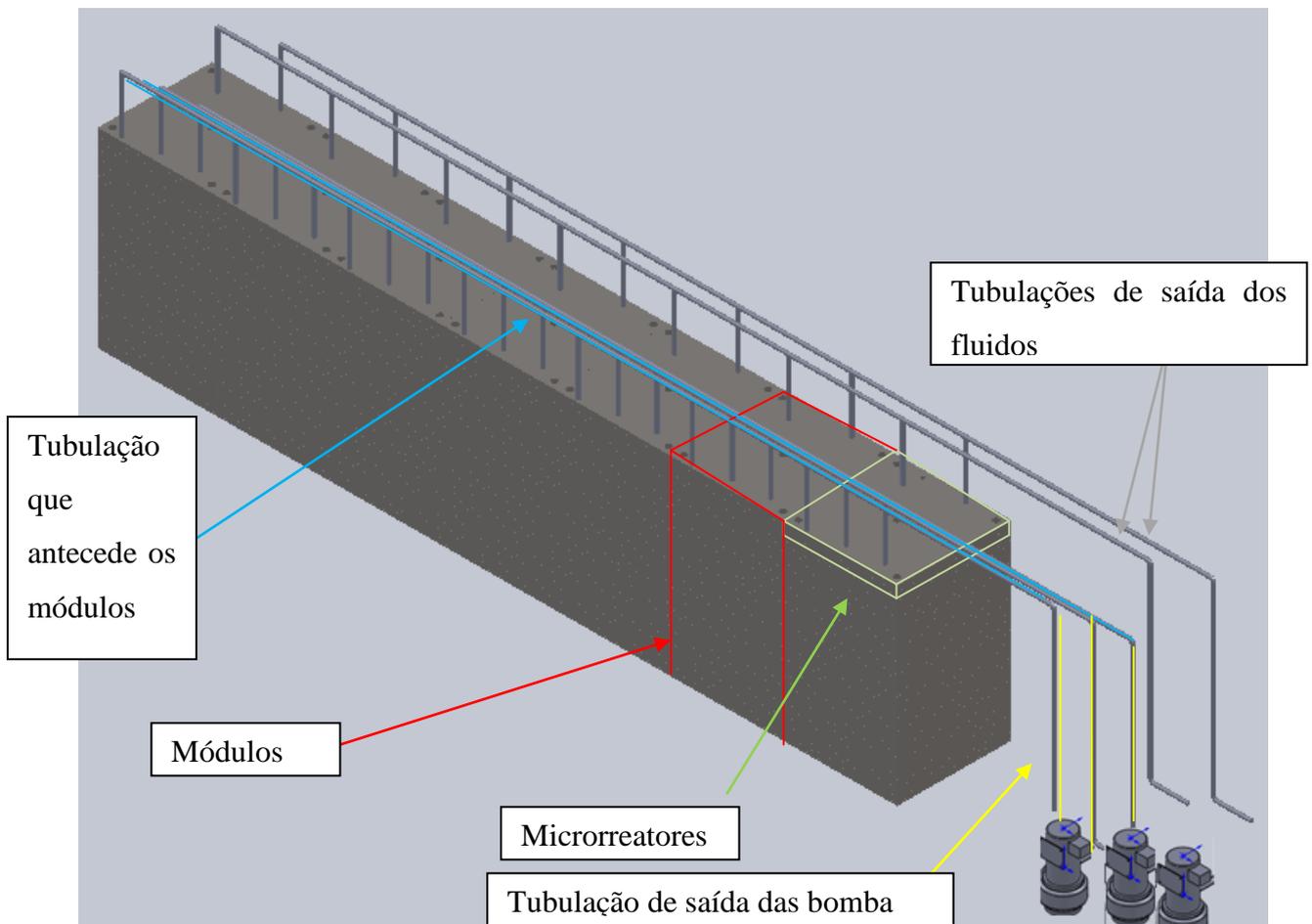
**Tabela 2: Tabela de Condições de Operação.** *Billo et al.(2014)*

Operating conditions for microreactor module (50 laminae) to achieve 99% oil conversion.

Property	Value
Reactant temperature	65 °C
Maximum oil flow rate	0.53 L/h
Flow rate ratio (MeOH:oil)	1:3
Catalyst concentration	0.9 M

### 3.CONFIGURAÇÃO DO DISPOSITIVO

Neste capítulo, serão apresentados alguns elementos que compõem o reator, como o microchip que será paralelizado, os elementos de vedação (lâminas com intuito de fechar os microcanais) e os mecanismos de externos de selagem (itens que irão comprimir, unir, os microrreatores e suas chapas de vedação).

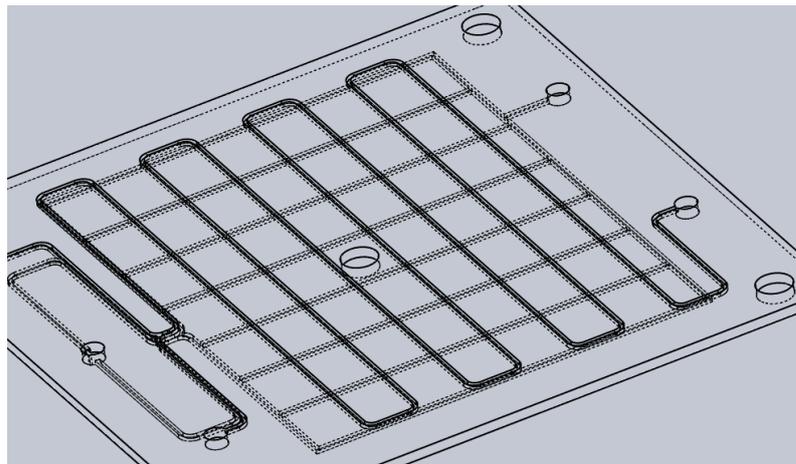


**Figura 15: Indicação do microchip na montagem completa**

Na Figura 15, está destacado, em verde, um microrreator e seu posicionamento na montagem completa do reator aqui projetado, em vermelho, um dos 7 módulos apresentados..

Para facilitar a visualização, os itens citados estão todos representados a seguir. Na Figura 16, está o microrreator, onde os microcanais presentes em ambas as faces estão representadas. A

fabricação é feita em um único substrato, pois assim têm-se como vantagem uma diminuição na resistência termica de contato, o que acaba por elevar a eficiência do trocador de calor existente na face inferior dos microrreatores.. Já na Figura 17 , há a ilustração de uma paralelização de microchips, já com a inclusão das chapas que cobrem e vedam os microcanais. Na Figura 18, está uma representação de elementos de selagem de chips utilizado por *Billo et al.(2014)* e suas lâminas de selagem( no caso, a selagem foi realizada por parafusos).



**Figura 16: Desenho esquemático do microrreator com microcanal de transesterificação e microcanais de troca de calor**

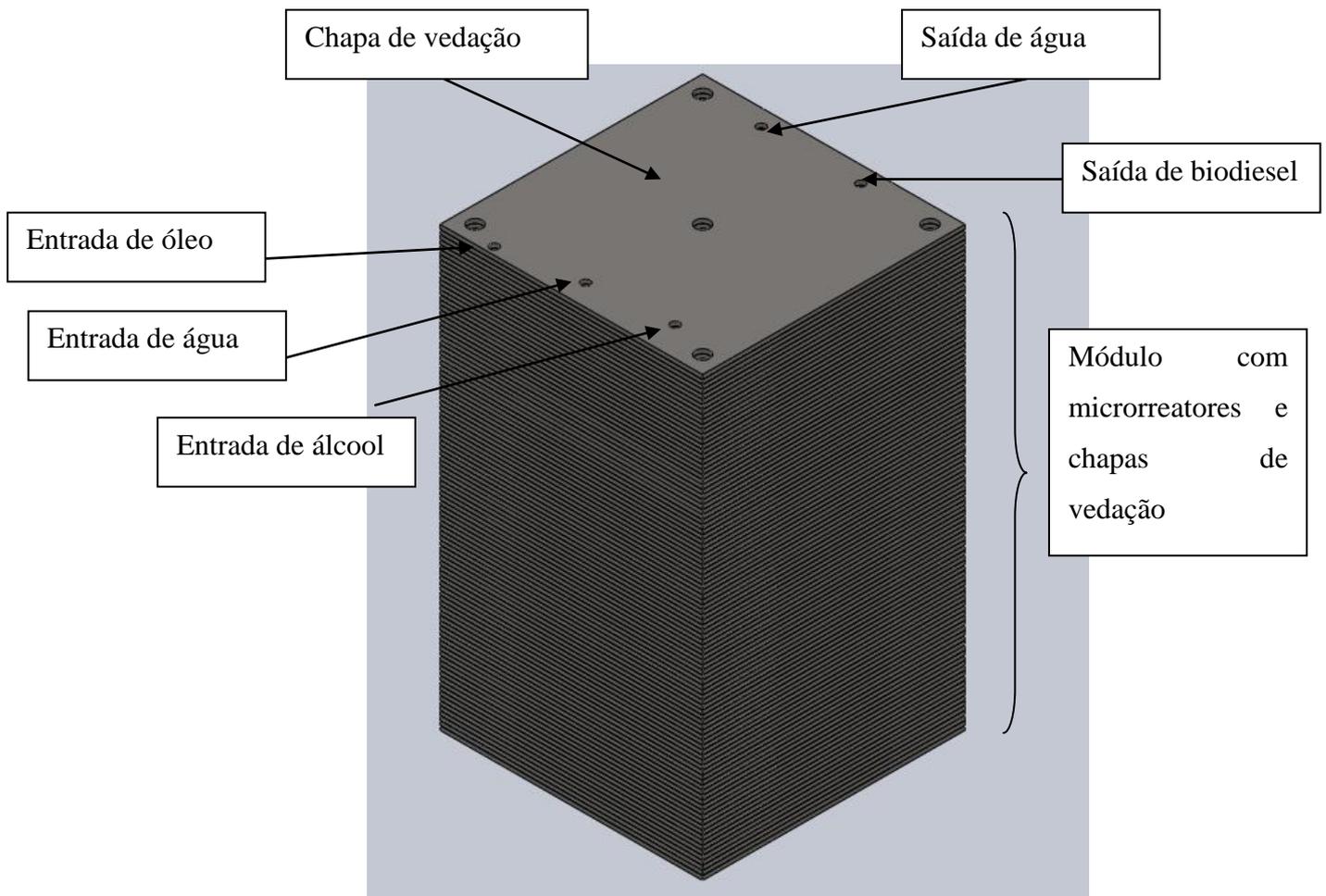


Figura 17: Modelo de microchips e lâminas de vedação paralelizados

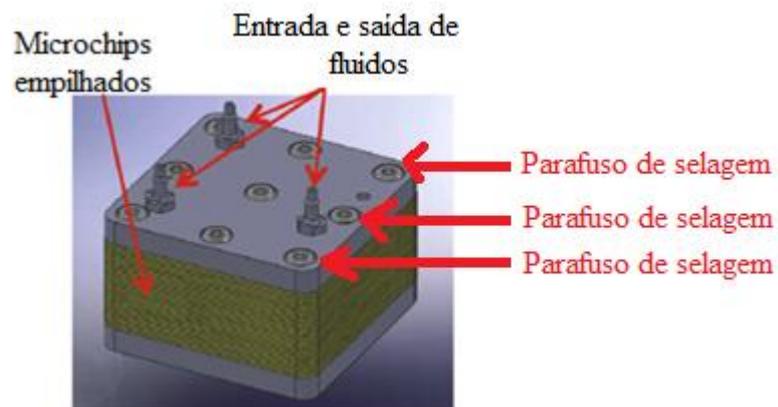
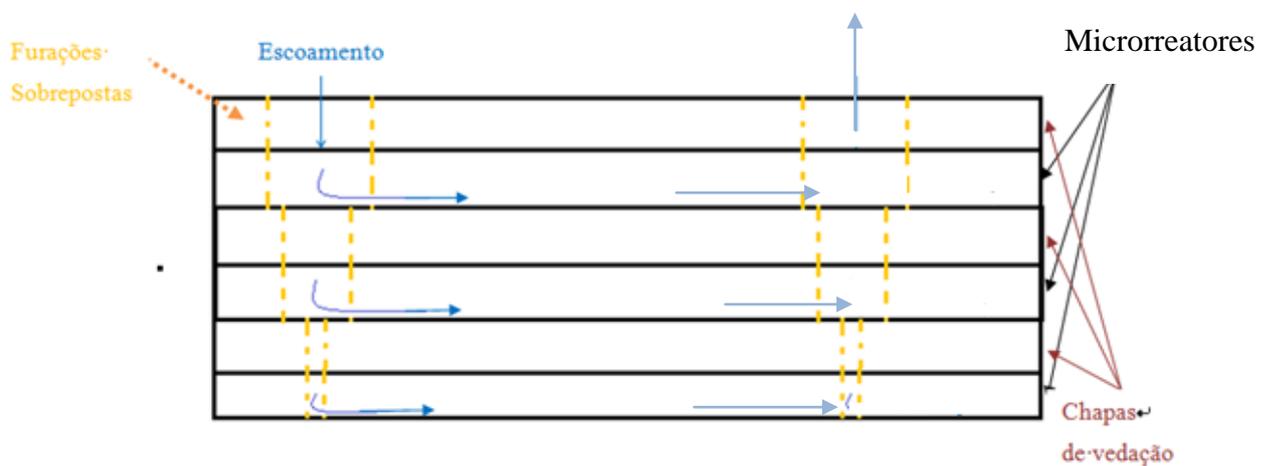


Figura 18: Chips paralelizados selados através de parafusos ( Adaptado de *Billo et al.,2014*)

### 3.1 Microchips

O elemento fundamental desse trabalho é o microchip de transesterificação, componente cuja configuração permite que a síntese de biodiesel ocorra em interior. A injeção dos 3 diferentes fluidos nos microrreatores será feita através de furações realizadas nas faces do microchips, de forma que quando essas furações forem sobrepostas, formem uma tubulação de abastecimento. Um desenho esquemático mostrando essa tubulação formada por furações sobrepostas está presente na Figura 19.



**Figura 19: Demonstração de tubulação formada por furações sobrepostas e escoamento entrando nos microchips**

As dimensões do microrreator projetado são 60mm x 60mm x 1 mm ( comprimento, altura, espessura) e as dimensões de todos os microcanais são de 0,4mm de largura e 0,4mm de altura ( essas dimensões de seção transversal foram escolhidas devido a disponibilidade das ferramentas do laboratório em que os mesmo são fabricados, assim como a maior facilidade de construção - pois ferramentas de dimensões menores que estas passam a apresentar muito maior dificuldade de manuseio e maior sensibilidade durante a usinagem-. As dimensões do microchip devem ser suficientes para nele seja possível fabricar os furos passantes, necessários para o mecanismo de selagem, os furos de escoamento dos fluidos- pelos quais os fluidos entram e saem dos microchips-(sendo 3 de entrada-água, álcool e óleo- e 2 de saída - água e biodiesel-), todos os microcanais existentes no chip e, principalmente, microcanais com comprimento efetivo suficiente para garantir um tempo de residência mínimo para conversão dos reagentes em biodiesel. Dessa forma, as dimensões do microchip não são

restritas, porém devem atender as condições descritas acima e estar dentro da capacidade de usinagem daquele que o fabrica.

O comprimento do microcanal pode ser projetada a partir do tempo de residência necessário para conversão em biodiesel, a vazão dos reagentes escoando pelo microcanal e as dimensões deste microcanal. Isso se dá, pois com a vazão determinada e sabendo a seção transversal do microcanal, pode-se inferir a velocidade do escoamento. A partir daí, sabendo a velocidade e o tempo mínimo para conversão, é necessário projetar um comprimento efetivo que garanta esse tempo de residência.

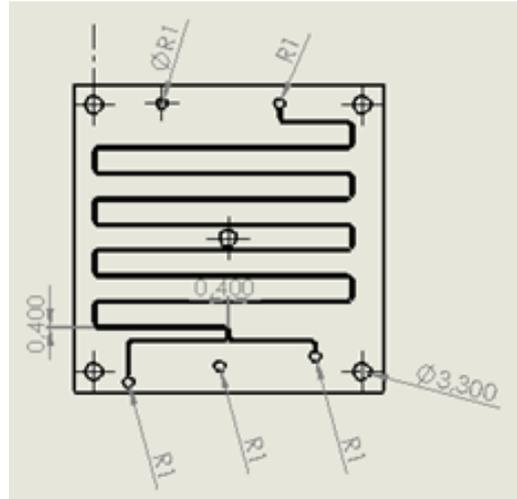
O desenho do microcanal que percorre o microchip é semelhante a uma serpentina. Isso se dá pois, dessa maneira, é possível implementar um maior comprimento efetivo enquanto se mantém as dimensões volumétricas do microrreator.

Outra particularidade do projeto dos microcanais de transesterificação usinados na face do microchip é a região de mistura de reagentes, onde o microduto de óleo se une ao de álcool. Essa região é projetada em forma de "T" para intensificar a mistura destes fluidos e permitir que a conversão de biodiesel se dê com menor tempo de residência, devido a uma fusão mais brusca. Uma junção destes microcanais em "Y", por exemplo, geraria uma transição mais suave e uma mistura menos intensa.

Na Figura 20, vê-se o desenho do projeto da face do microchip em que ocorre a reação de síntese do biodiesel. A furação representando os pontos de entrada dos fluidos destes microchips tem diâmetro indicado R1, pois terá seu valor variando a cada microrreator.

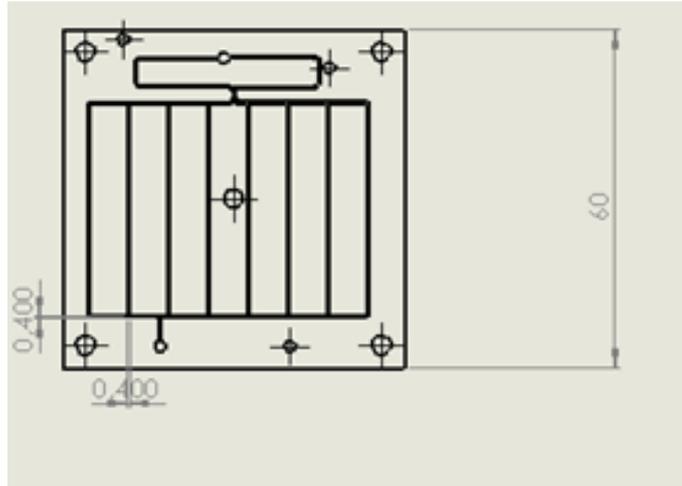
Os valores destas furações será indicado claramente na seção 6.

Também na Figura 20, vê-se o diâmetro da furação dos pinos de selagem e as dimensões do microcanal. O diâmetro dos pinos de selagem possuem enorme flexibilidade ( desde que seu diâmetro não interfira nos microcanais que passam próximo a eles, no microchip) e foram escolhidos como 3,3mm devido a facilidade de fabricar furos passantes e encontrar pinos guia com esse diâmetro.



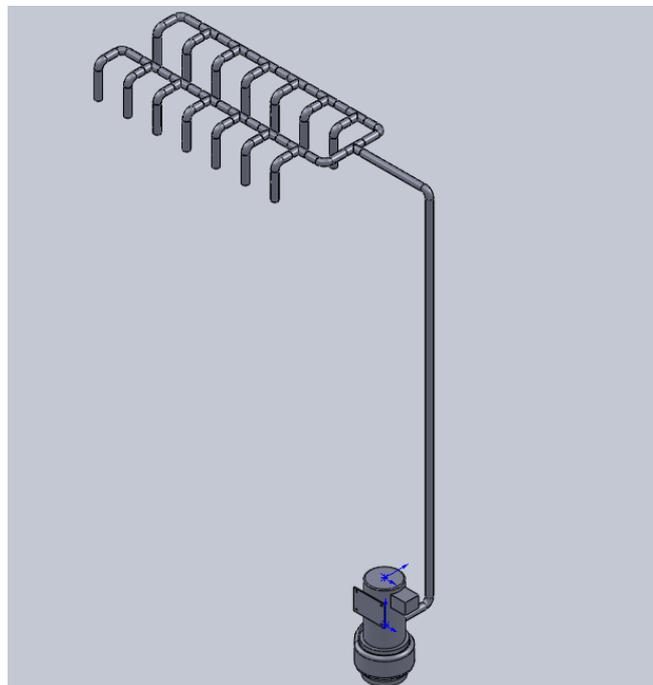
**Figura 20: Face do microchip em que ocorre a transesterificação**

No dispositivo aqui projetado, além da face de transesterificação, foi projetado na outra face do microrreator, um microcanal com a função de trocador de calor. Na face inferior dos microchips, haverá escoamento de água aquecida( essa água a alta temperaturaé proveniente do sistema de refrigeração das células fotovoltaicas abordado na introdução), que através da troca de calor, elevará a temperatura dos reagentes e permitirá que a reação ocorra a uma temperatura mais alta, o que eleva a taxa de conversão de biodiesel (*Masoud Rahimi,2014*). Na Figura 21, está o desenho do projeto da face do trocador de calor do microrreator, onde as dimensões de seus microcanais estão explicitados e são iguais as dimensões do microcanal da face de síntese do biodiesel. Isso se dá dessa maneira para facilitar a fabricação ( pode-se utilizar as mesmas ferramentas para fabricação de todos os microcanais). O desenho da Figura 21 é apenas uma representação do trocador de calor. Isso é, o número de canais representados na imagem (8) não geram uma divisão igualitária do escoamento que adentra o microchip. A otimização desta canalização e da troca de calor que ocorre devido a esta face do microchip será apresentada ao fim deste projeto como um ponto de aprimoramento em futuros trabalhos.



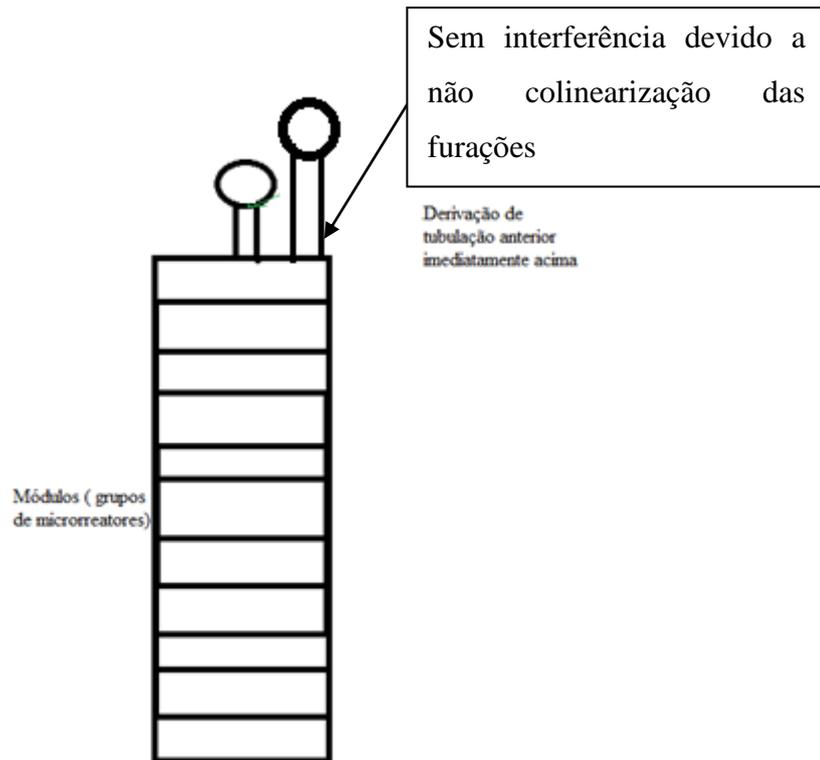
**Figura 21: Face do trocador do calor do microchip**

Na Figura 22, está mostrado o modelo elaborado da tubulação anterior aos grupamentos de mirorretores( os módulos) com derivação iniciando-se acima e à lateral destes( e não mais , imediatamente acima, como na Figura 15). Essa configuração pode ser implementada, para que não ocorra interferência nas tubulações quando estas foram se conectar aos módulos.



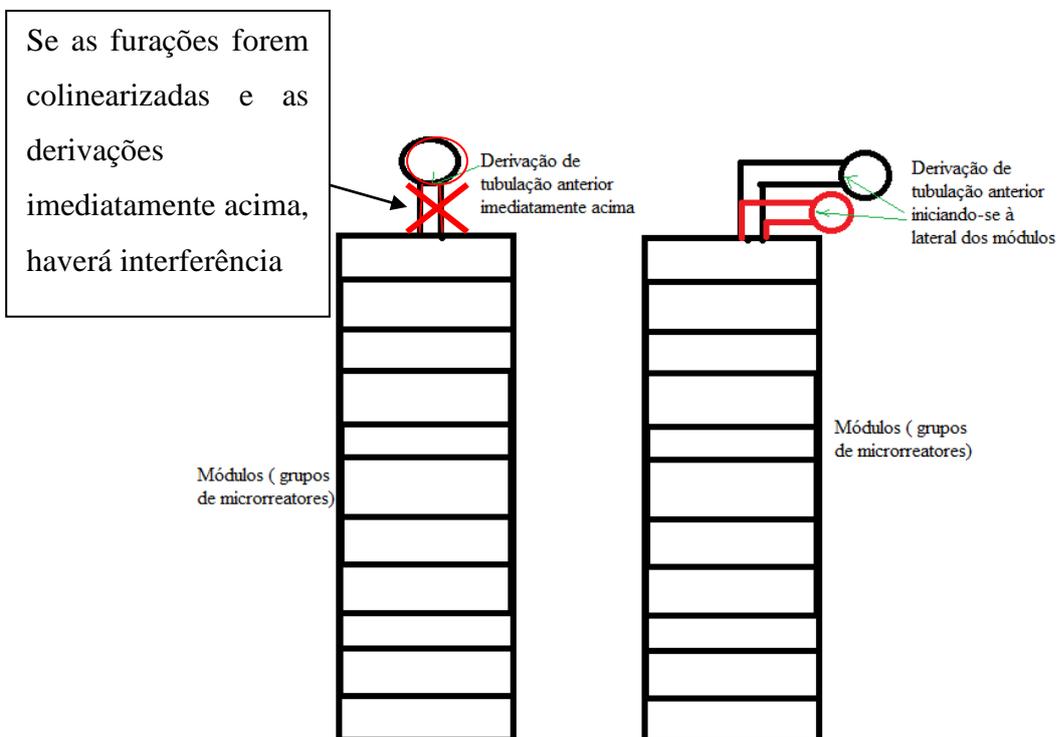
**Figura 22: Modelo de tubulação anterior aos módulos com derivação ocorrendo imediatamente acima dos módulos .**

É interessante notar nas figuras Figura 20 e Figura 21, que os 3 pontos de entrada dos fluidos reagentes não estão colinearizados horizontalmente, como estavam dispostos em outros microchips encontrados na literatura. Essa distribuição se dá para viabilizar o acesso das tubulações individuais de cada reagente. Dessa forma, é possível assegurar que os dutos não interferirão um no outro, como no desenho esquemático da Figura 23..



**Figura 23: Vista lateral dos módulos, mostrando as tubulações que os abastecem**

Outra possibilidade para impedir essa obstrução dos canais de injeção, é projetar os dutos de maneira que a derivação do canal anterior aos módulos não se dê imediatamente acima do topo dos módulos, e sim, lateralmente. Isso é, como ilustrado no esboço presente na Figura 24, se as tubulações que percorrem os grupos de módulos não passarem acima destes ( e sim, ao lado) , esse impedimento também é evitado.



**Figura 24: Imagem ilustrativa da diferença entre a tubulação imediatamente acima e à lateral dos módulos**

Os microchips serão projetados considerando aço inoxidável devido a suas propriedades químicas, mecânicas e por facilidade de fabricação. Este aço é um material quimicamente que pode ser considerado não reativo em relação ao processo de síntese de biodiesel que ocorrerá em sua superfície( as propriedades do microchip e a geometria dos microcanais não são significativamente alteradas pelo efeito de corrosão do bioóleo). Esse fator é de extrema importância visto que este dispositivo se propõe a gerar biodiesel por processo contínuo, logo , o tempo de atuação dos reagentes na superfície estará limitado apenas pela vida útil dos componentes que alimentam o sistema.

O fato de os microchips de aço terem maior rigidez e serem mais resistentes que os microchips feitos de polímeros fotossensíveis se apresenta também como uma vantagem imprescindível visto que o mecanismo estará exposto a movimentação, a funcionamento em ambientes externos e a ambientes mais agressivos (possivelmente solo irregular, altas variações de temperatura, umidade,etc). Além de reduzir o risco de danificar algum microrreator ao realizar a selagem (que será abordada em seção posterior). A escolha acerca do material do microchip possui certa flexibilidade desde que as condições de funcionamento contínuo( isso é, o material deve ser capaz de perdurar durante o funcionamento ininterrupto do sistema) sejam lembradas e as considerações físico-químicas estejam garantidas.

### 3.1.1 Face da transesterificação

Na face em que ocorrerá a síntese do biodiesel, os microcanais terão um perfil de seção quadrada de dimensões laterais iguais a 0,4mm, e comprimento efetivo de reação igual a 300mm. Está ilustrado na Figura 25: A -Dimensão da altura do microcanal. B-Dimensão da largura do microcanal Este comprimento efetivo de reação tem início quando os 2 reagentes entram em contato, o que ocorre após uma junção dos microcanais individuais de abastecimento. Estes microcanais individuais terão um comprimento mínimo determinado pela troca de calor com a água a alta temperatura que escoar pelos microcanais presentes na face imediatamente abaixo, que deve ser suficiente para que elevar ambos os reagentes a 60 Celsius antes de entrarem em contato. Isso é realizado pois a temperatura é um dos fatores mais influentes na taxa de conversão em biodiesel e 60°C foi aqui determinada como temperatura objetivo para que a reação aconteça pois são nessas condições que a taxa de conversão atinge os maiores índices e/ou menores tempos de residência, *Masoud Rahimi(2014)*. .

É importante enfatizar que o calor transferido aos reagentes, origina-se no projeto de reaproveitamento energético abordado logo na introdução deste trabalho, que se propõe a utilizar a mesma água que resfria as células fotovoltaicas do Sistema HCPV da SUNFLOWER para aquecer, ao transferir o calor rejeitado do painel, os fluidos usados no microrreator de transesterificação.

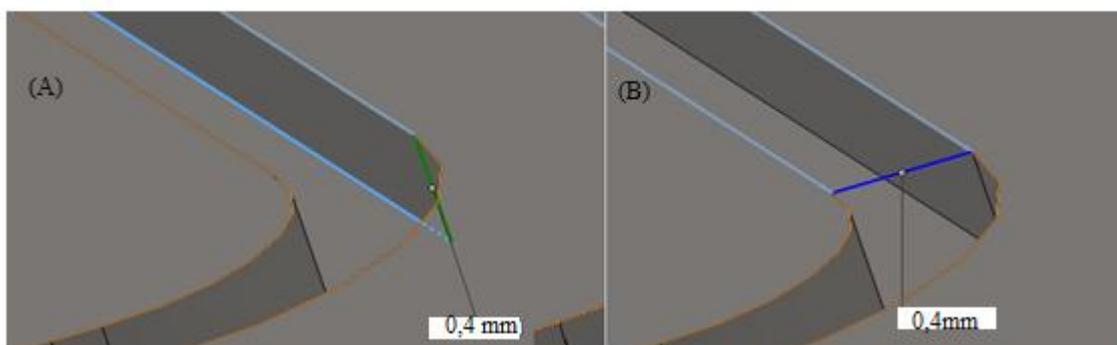
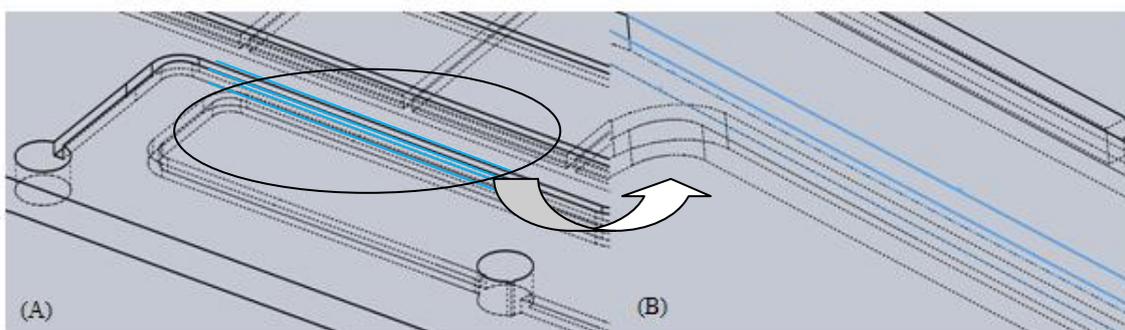


Figura 25: A -Dimensão da altura do microcanal. B-Dimensão da largura do microcanal

### 3.1.2 Face com escoamento de água aquecida

Os microcanais responsáveis pela transferência de calor para a reação através do escoamento de água aquecida possuirão a mesma seção transversal ( seção quadrada de lado 0,4mm) e mesma forma de abastecimento, porém algumas particularidades no perfil dos canais.

A primeira é que para haver a troca de calor de maneira mais eficiente, na região dos microcanais individuais (tanto de óleo quanto de álcool ), os canais de água devem estar colinearizados com estes. A Figura 26A mostra a região do microchip em que os canais se sobrepõem para que a troca de calor ocorra com maior eficiência. A Figura 26B dá destaque aos canais colinearizados e sobrepostos, sendo que as linhas em azul representam os canais de transesterificação e as linhas pretas representam os canais com escoamento de água..



**Figura 26: Posição dos microcanais de água em relação aos microcanais de óleo (região de entrada)**

A segunda diferença é uma configuração discrepante (em relação aos canais da face superior) da distribuição dos canais de água ao longo do microchip. Isso se dá pois devemos tentar estabelecer uma troca de calor o mais uniformizada possível ao longo da reação que ocorre nos canais acima. Isso é, se todos os canais tivessem o mesmo perfil de distribuição, ao fim do comprimento efetivo a troca de calor seria muito menor que no início, pois a água já teria resfriado (fazendo com que a reação ocorra em temperaturas diferentes a medida que percorre o microchip e potencialmente diminuindo a conversão de biodiesel). Para reduzir esse efeito tentamos nos aproximar ao máximo de uma troca de calor uniformizada ao longo do microreator, faremos os canais com água se distribuírem em paralelo entre si e na direção perpendicular a dos canais de reação, na face superior. Essa particularidade já pode ser notada nas Figura 16 e Figura 21.

## 3.2 Selagem

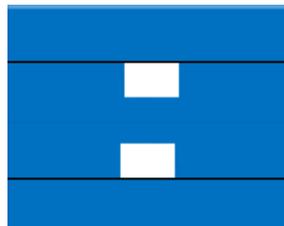
### 3.2.1 Selagem unitária

A selagem unitária é a vedação de cada um dos microchips que irão compor o sistema paralelizado. Como a fabricação de microcanais em materiais metálicos é a usinagem das faces do material (através da utilização de microfresas, por exemplo), tem-se que vedar a abertura inerente ao processo (em ambas as faces), como mostrado na Figura 27.



**Figura 27: Abertura inerente ao processo de usinagem de microcanais em um microchip**

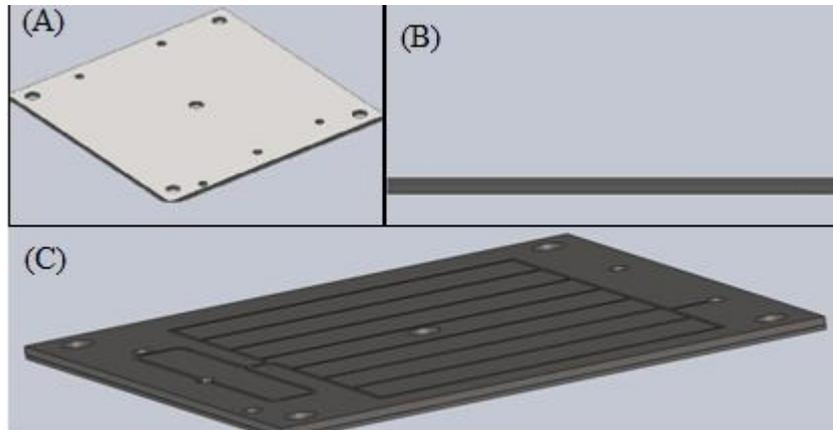
Isso se dará através da utilização de placas de mesmo material (para garantir a não reatividade com o processo químico) e mesmas dimensões que o microrreator e estão ilustradas na . Essas placas apenas cobrem, vedam o sistema. Têm a função unicamente de tampas.



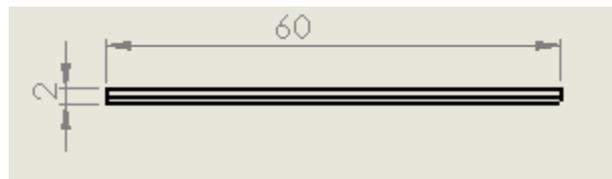
**Figura 28: Microcanais selados**

A Figura 29 A mostra uma vista isométrica do microrreator e sua tampa superior, onde pode-se ver a furação da chapa de selagem- que deve possuir as mesmas dimensões volumétricas e de furação do microrreator inferior a ela. Na Figura 29B está a vista lateral da montagem do micro chip com sua tampa. As dimensões, em mm, desta montagem estão na Figura 30. A Figura 29C mostra a imagem inferior do microrreator para facilitar a visualização de que a selagem deve ser feita em ambas as faces. Porém a selagem da face do trocador de calor é feita pela chapa que cobre o microrreator que vem em seguida na paralelização (com exceção

do último microrreator, no qual será necessário por mais uma tampa, como mostrado na Figura 28, para a vedação estar completa)



**Figura 29:**Diferentes vistas da montagem do microchip com tampa de selagem



**Figura 30:** Dimensões da vista lateral de um microrreator e uma chpa de vedação

A subseção a seguir abordará como será realizada a selagem física do sistema.

### 3.2.2 Selagem de Módulos

A maneira escolhida para selar tanto os microchips unitários quanto os módulos do nosso sistema é a mesma utilizada por *M Kersaudy-Kerhoas(2010)*, *Dennis(2011)* e *Billo et al.(2014)*: aparafusando-os. Porém, os módulos, compostos por 50 microchips com 51 laminas de vedação, sendo todos de 1 mm de espessura, possuem 101 mm de altura e permitem que usemos uma barra rosqueada/um parafuso nas extremidades de tal comprimento, como na Figura 18. Essa medida também permite que as barras/parafusos sirvam como pinos guia para minimizar os possíveis erros de posicionamento dos microchips, garantindo que sejam paralelizados na posição correta.

#### 4. REAPROVEITAMENTO ENERGÉTICO

Após a selagem dos microrreatores, é possível analisar o escoamento que neles ocorre. Como dito em capítulos anteriores, logo que os reagentes são injetados no microchip, eles passarão por um aumento de temperatura através do recebimento de calor oriundo da água a alta temperatura que foi utilizada para resfriar as células do painel fotovoltaico e está sendo escoada nos microcanais na outra face do microchip.

O cálculo da troca de calor entre os canais foi modelado considerando a aproximação do sistema para um trocador de calor de correntes paralelas. A Figura 31 é um modelo da troca de calor ocorrendo entre duas tubulações de fluxo concorrente: como no início do escoamento, a diferença de temperatura é a maior possível (representada pelo 0 % do fluido frio, indicando que nenhum calor foi recebido ainda, e pelo 100% do fluido quente, indicando que nenhuma parcela do calor foi transmitida), ocorre a troca mais intensa de calor. Essa troca irá cessar quando ambas os fluidos tenderem a mesma temperatura (indicado, na figura, como ambos os fluidos de mesma cor e com o índice 50% em cada corrente).

Assim, a injeção dos fluidos dessa forma (concorrente) garante maior troca térmica no início, como pode ser visto na do microchip, sendo assim, mais fácil de elevar a temperatura dos reagentes a 60C como desejamos para otimizar a conversão de biodiesel).

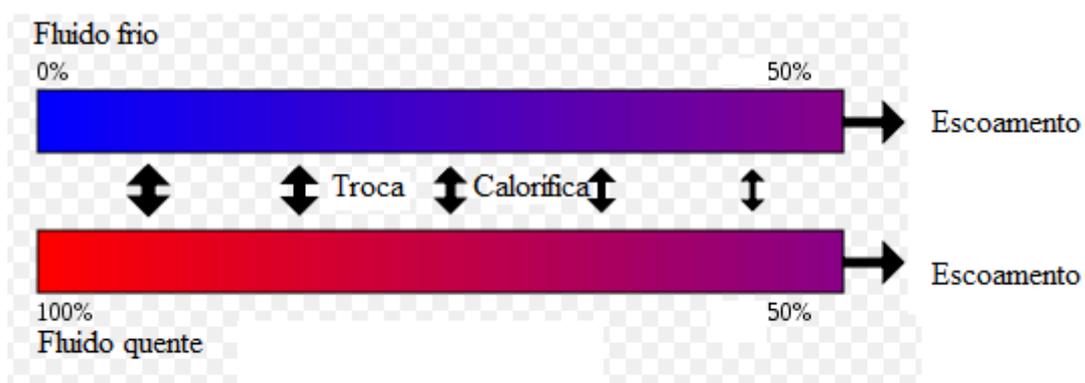
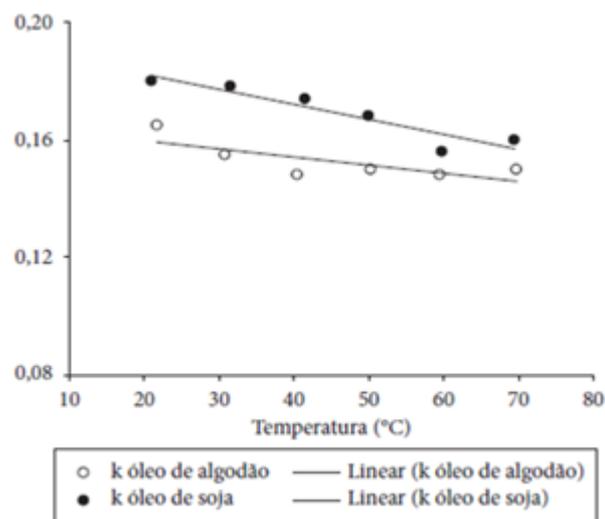


Figura 31: Modelo representativo da troca de calor que ocorre em fluxos concorrentes

#### 4.1 Troca calorífica do Óleo

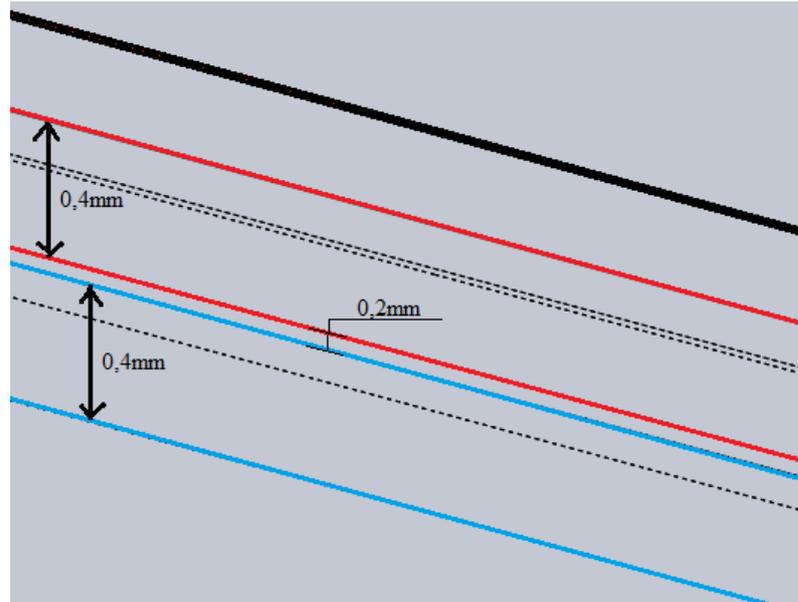
O cálculo do comprimento necessário para que o óleo reagente fosse levado a temperatura de 60C foi realizado através da consideração das seguintes premissas:

- Óleo de soja utilizado na reação ( escolha feita devido ao fato de o óleo de soja ser o mais utilizado para síntese de biodiesel no Brasil hoje, sendo responsável por cerca de 80% da produção). A Figura 32 apresenta a variação da condutividade térmica do óleo de soja e do óleo de algodão em função da temperatura( *Brock et al.,2008*)

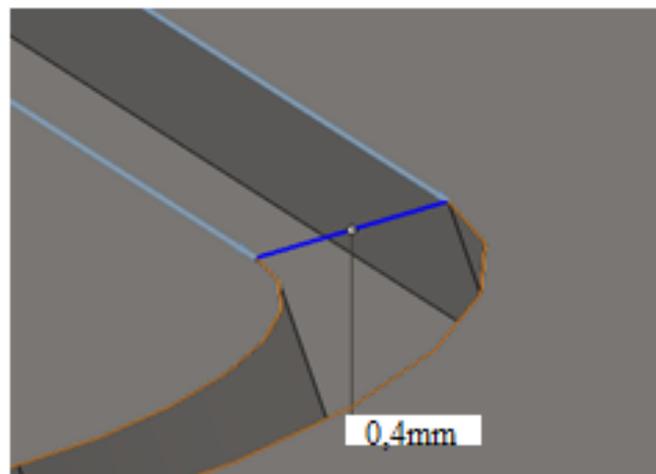


**Figura 32: Variação da condutividade térmica do óleo de soja e algodão em função da temperatura**

-Altura e largura do microcanal 0,4mm, como indicado na Figura 33, onde as linhas em azul representam os canais de água e as linhas em vermelho os canais do outro fluido ( no caso, óleo) , e na Figura 34, que representa a largura de qualquer microcanal do microchip, visto que todos possuem a mesma largura.



**Figura 33: Altura dos microcanais e distância entre eles**



**Figura 34: Indicação da largura de qualquer microcanal do microrreator.**

-Diâmetro hidráulico 0,4mm.

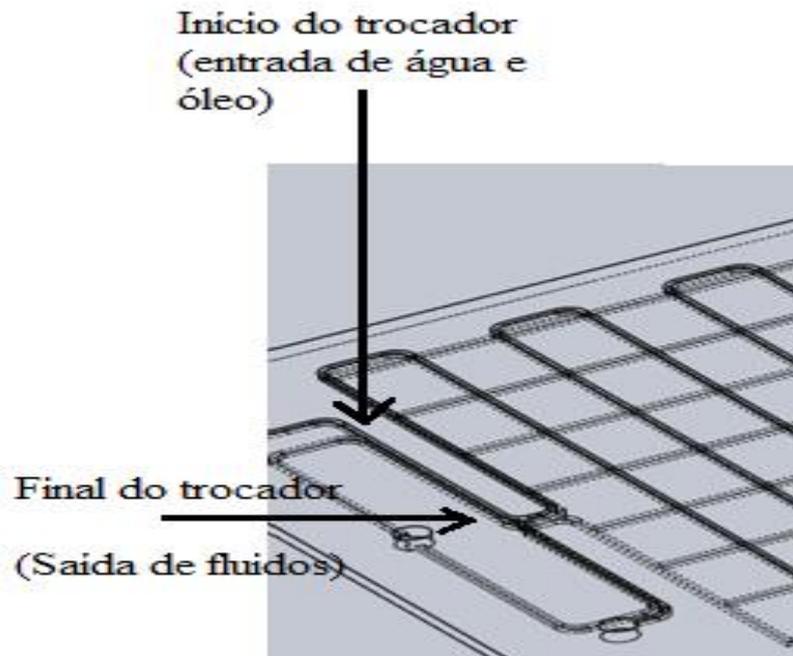
Na Tabela 3 estão mostradas as temperaturas de entrada de água e óleo, sendo a entrada de óleo ocorrendo a uma temperatura ambiente de 25°C e a água entrando a uma temperatura elevada, visto que esse escoamento é o mesmo que reaproveitou o calor rejeitado pelas células do painel fotovoltaico, considerada 85°C. A temperatura de saída do óleo é projetada para ser 60°C .O posicionamento do trocador está indicado na Figura 35.

A Tabela 4 mostra as vazões de óleo utilizadas para geração de biodiesel. Esse parâmetro é baseado no utilizado por *Chen(2012)*. A vazão de água foi projetada para ser a mesma de óleo, para intensificar a troca de calor tanto com os dutos de óleo quanto com os de álcool (foi escolhido dessa forma pois a vazão de óleo é menor que a vazão de álcool).

A Tabela 5 mostra a propriedade dos fluidos envolvidos, sendo os dados retirados de *Osizik(1985)*, *Brock et al.(2008)*.

**Tabela 3: Temperaturas Água x Óleo de Soja**

T final óleo (°C)	60
T entrada Óleo(°C)	25
T entrada água(°C)	85



**Figura 35: Início e final da troca de calor com reagentes**

**Tabela 4: Vazões de Injeção**

Vazão Óleo	1,03017E-07(Kg / s)	0,007 ml/min
Vazão Água	1,16667E-07(Kg / s)	0,007 ml / min

Tabela 5: Propriedades dos fluidos (adaptado de *Osizik, 1985; Brock et al., 2008*)

Calor específico óleo (J/ Kg*Celsius)	1960
Calor específico água(J / Kg*Celsius)	4180
Massa específica água (Kg/ L)	1
Massa específica óleo(kg / L)	0,883
k óleo(a T média=42)-( w/C*m)	0,174
k água( a T media= 68) (w/C*m)	0,66

Considerando temperatura constante na parede do microcanal, é possível determinar o número de Nusselt como indicado na Tabela 6.

O número de Nusselt vem da correlação apresentada em Ozisik(1985) para o caso de temperatura constante na parede em que ocorre a troca de calor e para o caso de ser quadrada a seção transversal dos dutos. Dessa forma, esta constante se apresenta com mesmo valor para água e para o óleo :

Tabela 6: Nusselt (T =cte na parede, seção quadrada) Ozisik(1985)

Nusselt - água	2,976
Nusselt - óleo	2,976

À partir desses dados é possível fazer uma análise completa da troca de calor através das seguintes equações: Sendo  $Nu$  , o número de Nusselt,  $h$ , o coeficiente de troca de calor por convecção,  $D_h$ , o diâmetro hidráulico do duto, e  $K$ , a condutividade térmica do fluido:

$$\frac{Nu = h * D_h}{K} \quad (Eq 1)$$

Logo, a tabela 7 mostra os valores determinados.

Tabela 7 :Constantes térmicas de troca por convecção

h óleo (W / s * m <sup>2</sup> )	1,29E+03
h água (W / s *m <sup>2</sup> )	4,91E+03

Assim, é possível descobrir agora a quantidade de calor necessária para o óleo aquecer de 25C a 60C, sendo  $Q_o$ , o calor aportado,  $\dot{m}_o$ , a vazão do óleo,  $C_{po}$ , o calor específico do óleo, e  $\Delta T_o$  , a diferença entre a temperatura inicial e final do óleo:

$$Q_o = \dot{m}_o * C_{p_o} * \Delta T_o \quad (Eq 2)$$

$$Q_o = 00071 W$$

E a temperatura de saída da água, sendo  $T_{afin}$ , a temperatura da água no final do trocador,  $T_{aent}$ , a temperatura da água na entrada do trocador,  $\frac{Q_o}{C_{p_a}}$ , a razão entre o calor transferido e o calor específico da água, e  $\dot{m}_a$ , a vazão de água.

$$T_{afin} = T_{aent} - \left( \frac{Q_o}{C_{p_a} * \dot{m}_a} \right) \quad (Eq 3)$$

$$T_{afin} = 70,8^\circ C$$

E a área de troca, sendo  $A$ , a área do trocador de calor,  $Q_o$ , o calor aportado,  $U$ , o coeficiente global de transferência de calor,  $\Delta t_{sai}$ , a diferença de temperatura dos fluidos na saída do trocador, e  $\Delta t_{ent}$ , a diferença de temperatura na entrada do trocador

$$A = \frac{Q_o}{U * \ln \left( \frac{\Delta t_{ent}}{\Delta t_{sai}} \right)} \quad (Eq 4)$$

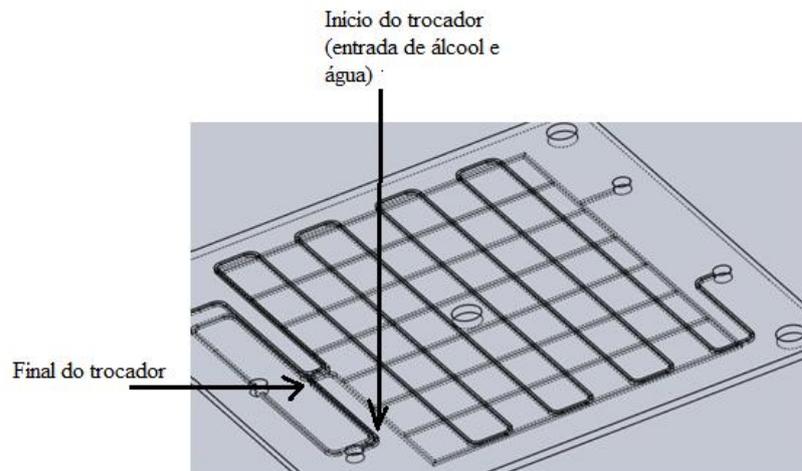
$$A = 0,000000243 m^2$$

E o comprimento,  $L$ , de troca é determinado ao dividir a área encontrada,  $A$ , pelo perímetro do microcanal (0,0016 m) :

$$L = A/0,0016 = 0,00015 m$$

## 4.2 Troca Calorífica do Álcool

Analogamente, o mesmo cálculo é feito para o álcool. O trocador de álcool e água está representado na Figura 36.



**Figura 36: Início e fim da região do trocador de calor entre álcool e água**

Sendo as premissas:

-Será utilizado o etanol anidro como álcool. A rota etílica foi escolhida por apresentar inúmeras vantagens em relação a rota metílica (muito utilizada no Estados Unidos), como a não toxicidade, os incentivos governamentais a sua produção, a sua maior disponibilidade no mercado, entre outras. Porém é importante ressaltar que a utilização da rota metílica leva a maiores taxas de conversão quando comparada à rota etílica, assim, a opção pelo etanol anidro terá uma menor taxa de conversão que aquela potencialmente obtida caso tivesse sido escolhido o metanol como álcool.

-Altura e largura do microcanal 0,4mm, como indicado na Figura 33, onde as linhas em azul representam os canais de água e as linhas em vermelho os canais do outro fluido (no caso, álcool), e na Figura 34, que representa a largura de qualquer microcanal do microchip, visto que todos possuem a mesma largura.

-Diâmetro hidráulico 0,4mm.

-Mesma consideração de temperatura constante na parede e mesmo número de Nusselt,consequentemente.

Na Tabela 3 estão mostradas as temperaturas de entrada de água e álcool, sendo a entrada de álcool ocorrendo a uma temperatura ambiente de 25°C e a água entrando à mesma temperatura considerada de 85°C. A temperatura de saída do álcool é projetada para ser 60°C .O posicionamento do trocador está indicado naFigura 36.

A Tabela 9mostra as vazões de álcool utilizadas para geração de biodiesel. Esse parâmetro é baseado no utilizado por *Chen(2012)*.A vazão de água é a mesma considerada no trocador de água e óleo.

A Tabela 10 mostra a propriedade dos fluidos envolvidos, sendo os dados retirados de *Osizik(1985)*, *Brock et al.(2008)*.

Tabela 8: Temperaturas Água x Etanol

T final álcool (°C)	60
T entrada álcool(°C)	25
T entrada água(°C)	85

Tabela 9: Vazões de Injeção

Vazão álcool	1,1835E-07(Kg/s)	0,009 ml /min
Vazão Água	1,16667E-07(Kg / s)	0,007 ml /r min

Tabela 10: Propriedades dos Fluidos

Calor específico álcool (J / Kg*Celsius)	2840
Calor específico água(J / Kg*Celsius)	4180
Massa especifica agua (Kg / L)	1
Massa especifica Álcool(kg / L)	0,789
k álcool(a T =15C)-( w/C*m)	0,18
k água( a T media= 68) (w/C*m)	0,66

Assim, através das mesmas equações 1,2,3 e 4, podemos determinar o comprimento necessário para a troca (ver tabela 11):

Tabela 11: Constantes térmicas

h Álcool (W / s * m <sup>2</sup> )	1,34E+03
h água (W / s * m <sup>2</sup> )	4,91E+03

$$Q_{et} = 0,01176 \text{ W}$$

$$T_{afin} = 60,8^{\circ}\text{C}$$

Aqui é possível notar que a transferência de calor para o etanol é mais crítica do que a troca com o óleo. Isso se dá devido a maior vazão de etanol do que de água, enquanto as vazões de água e óleo estão sendo consideradas iguais.

$$A = 0,000000799 \text{ m}^2$$

$$L = 0,0005 \text{ m}$$

Aqui se faz claro que o comprimento necessário para que os reagentes tenham sua temperatura elevada àquela de otimização da reação são pequenos e não serão uma restrição para o projeto. Isso configura uma vantagem visto que podemos variar um pouco os parâmetros e essa condição continuará sendo atendida. Por exemplo, se variar a razão álcool/óleo pela metade, será obtido um comprimento de troca necessário, para o álcool de 0,00004m, o que continua sendo plenamente capaz de ser atendido. De fato, qualquer redução na vazão pode ser feita, visto que menores vazões serão mais fáceis de se elevar à temperatura de 60°C. . Agora, se for aumentada a vazão de óleo ou álcool, tem-se que ter atenção, pois para continuar atingindo o objetivo do trocador sem alterar nenhum outro parâmetro, a vazão máxima de óleo que pode ser injetada é de 0,012 ml/s (cerca de 70% a mais do que o injetado no trocador aqui projetado), enquanto a vazão máxima de água é de 0,009ml/s (cerca de 30% a mais do que a vazão aqui utilizada).

Se for optado por utilizar outro reagente, ocorrerão alterações nos parâmetros, como condutividade térmica, densidade e seu calor específico. Se for utilizado óleo de algodão, por exemplo, o valor retornado para comprimento de troca seria 0,00016m e também seria atendido.. É necessário atentar para óleos vegetais com propriedades muito discrepantes das apresentadas pelo óleo de soja. Alguns outros dados são apresentados- para o caso de se utilizar outros fluidos reagentes ou outra faixa de temperaturas -, na

Figura 37, Figura 38, Figura 39 e Tabela 12.

COMBUSTÍVEL	PCI
Óleo de algodão	8.050 kcal/l
Óleo de amendoim	8.000 kcal/l
Óleo de babaçú	7.770 kcal/l
Óleo de soja	8.125 kcal/l

Figura 37: Poder Calorífico de alguns óleos vegetais ( AALBORG Industries)

Valores medidos de densidade dos diferentes óleos vegetais à temperatura ambiente ( $25 \pm 1$  °C).

	Óleo						
	Soja	Milho	Arroz	Girassol	Algodão	Oliva	Canola
$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	0,883	0,875	0,877	0,877	0,875	0,879	0,878
$\pm\sigma$	0,004	0,003	0,002	0,004	0,002	0,003	0,002

Figura 38 : Densidade Óleos Vegetais . Brock et al.(2008)

Tabela 12 Propriedades Água . Ozisik (1985)

T(°C)	$\rho$ (kg por m <sup>3</sup> )	condutividade(w por m*K)
0	1002,28	0,552
20	1000,52	0,597
40	994,59	0,628
60	985,46	0,651
80	974,08	0,668

Valores experimentais de condutividade térmica para os óleos vegetais em diferentes temperaturas.

T (°C)	k (W/m.s) $\pm \sigma^*$
Óleo de algodão	
21,7	0,165 $\pm$ 0,010
30,8	0,155 $\pm$ 0,011
40,5	0,148 $\pm$ 0,012
50,3	0,150 $\pm$ 0,009
59,5	0,148 $\pm$ 0,011
69,7	0,150 $\pm$ 0,011
Óleo de farelo de arroz	
21,4	0,160 $\pm$ 0,015
31,3	0,155 $\pm$ 0,011
40,5	0,155 $\pm$ 0,010
50,5	0,158 $\pm$ 0,008
60,1	0,145 $\pm$ 0,012
69,5	0,143 $\pm$ 0,013
Óleo de girassol	
21,0	0,165 $\pm$ 0,010
30,5	0,160 $\pm$ 0,011
41,5	0,157 $\pm$ 0,014
50,75	0,156 $\pm$ 0,017
59,6	0,160 $\pm$ 0,011
68,7	0,155 $\pm$ 0,018
Óleo de canola	
20,3	0,155 $\pm$ 0,009
31,0	0,147 $\pm$ 0,010
40,5	0,145 $\pm$ 0,011
50,8	0,147 $\pm$ 0,012
60,5	0,142 $\pm$ 0,016
70,0	0,144 $\pm$ 0,015
Óleo de milho	
20,4	0,155 $\pm$ 0,010
30,0	0,153 $\pm$ 0,012
41,0	0,155 $\pm$ 0,013
50,4	0,150 $\pm$ 0,010
59,8	0,147 $\pm$ 0,016
69,7	0,152 $\pm$ 0,012
Óleo de soja	
21,0	0,180 $\pm$ 0,012
31,5	0,178 $\pm$ 0,011
41,5	0,174 $\pm$ 0,014
50,0	0,168 $\pm$ 0,012
59,8	0,156 $\pm$ 0,016
69,5	0,160 $\pm$ 0,009
Óleo de oliva	
21,8	0,166 $\pm$ 0,013
31,5	0,158 $\pm$ 0,012
40,5	0,159 $\pm$ 0,015
50,1	0,149 $\pm$ 0,012
59,5	0,155 $\pm$ 0,016
68,9	0,150 $\pm$ 0,010

Figura 39: Condutividade térmica Óleos vegetais . Borck et al.(2008)

## 5.DIMENSIONAMENTO DE MICROCHIPS PARALELIZADOS

Após mostrar a configuração básica das unidades paralelizadas e o procedimento de aquecimento dos reagentes, é necessário determinar quantos microrreatores irão compor o gerador.

Nesta seção, será abordada a metodologia utilizada para se obter um dimensionamento do número de microrreatores a serem paralelizados. Para tal, será feito um estudo de caso no qual será estabelecida a demanda energética que a produção do dispositivo aqui projetado irá, hipoteticamente, suprir.

Além disso, serão apresentados os componentes necessários para que a produção de biodiesel seja convertida em energia elétrica.

### 5.1 Produção de microchip unitário

Para determinação do número de microchips que serão paralelizados no sistema, é necessário determinar a quantidade total de biodiesel que queremos produzir diariamente e saber a quantidade gerada por 1 microchip por unidade de tempo.

O volume sintetizado por 1 microchip será baseado nas condições estabelecidas para a reação, mostradas na Tabela 13. Estas condições, por sua vez, são baseadas em parâmetros e rendimentos encontrados em outro experimento anterior, *Chen(2012)*, e em decisões de projeto que discutidas em seguida:

O tempo de residência de 168s, a proporção de catalisador de 1:100 em relação ao óleo, assim como a vazão imposta de óleo(0,007ml/min) e de álcool(0,009 ml/min) são as mesmas de *Chen(2012)*. A temperatura média de reação imposta foi aquela estabelecida no sistema quando há a mistura de reagentes, isso é, 60°C. Também foi imposta uma taxa de conversão de 97% e, dessa forma, é possível estabelecer a produção útil de biodiesel do um elemento unitário de produção, representada na Tabela 14:

Tabela 13: Parâmetros de Reação

Tempo de residência(s)	168
Temperatura(C)	60
Catalisador(em relação ao óleo)	"1:100"
Vazão óleo(ml / min)	0,007
Vazão álcool(ml / min)	0,009
Conversão	97%

Tabela 14: Volume produzido por 1 microchip

Volume gerado por 1 microchip(ml / min)	0,01552
Volume gerado por 1 microchip(ml / hora)	0,9312

Assim, será realizado um estudo de caso onde será calculada a demanda energética de uma casa hipotética e a partir dessa demanda, determinar o número necessário de microreatores para atendê-la.

É importante considerar que a taxa de conversão considerada aqui é fruto de uma condição otimizada da reação de transesterificação( cuja temperatura é elevada pela água aquecida proveniente das células do painel fotovoltaico). Porém é possível que haja uma redução desta taxa de conversão durante a noite, visto que, neste período, o painel fotovoltaico não está operando - pois não há luz do sol - e assim a temperatura da reação não será elevada à temperatura de 60graus.Desta maneira, deve-se encontrar uma diferença entre o volume gerado por 1 microchip descrito acima, na Tabela 14, e o volume gerado por este mesmo microchip durante a noite.

## 5.2 Análise de Demanda Energética

A mensuração da demanda energética que o dispositivo aqui projetado se dispõe a suprir deve ser feita a partir de um estudo de caso detalhado a seguir:

### 5.2.1 Simulador de consumo caseiro

Antes de estimar o consumo mensal e diário de uma residência, é necessário determinar os utensílios que compõem uma possível casa que venha a ter sua energia fornecida pelo dispositivo aqui projetado. Lembrando que estamos projetando um mecanismo que a princípio auxiliará na geração de energia de locais remotos e, por consequência, possuem menor infraestrutura e menor número de bens. Essa é a razão de escolha de um estudo de caso de geração de energia para um domicílio, e não para uma indústria.

Assim, analisaremos um domicílio hipotético habitado por 5 moradores (no intuito de simular uma família média), com 1 geladeira (com 24h de funcionamento diário), 3 ventiladores de teto-com 8h de funcionamento diário cada, no intuito de simular que o funcionamento destes ocorre enquanto os integrantes da casa dormem e supondo 8h de sono-, 1 televisão de 21"-com 16h de funcionamento diário, supondo que esta fique ligada durante, aproximadamente, todo o tempo em que algum integrante da casa está acordado-, 8 lâmpadas fluorescentes (com 6h de funcionamento diário, isso é, considerando que fiquem ligadas de 18h a 00h), 1 Chuveiro elétrico (com 3h de funcionamento diário, tempo considerado suficiente para diversos banhos) e 1 forno Elétrico de 2 bocas (ativo durante 4h diariamente).

Foi feita a estimativa do consumo dessa casa genérica em 3 simuladores comerciais diferentes para minimizar particularidades de fornecedores:

Simulador CEEE: 27,64 kwh por dia      CUSTO: 12,00r\$ por dia ou R\$ 359,97 por mês. (CEEE Distribuição - <http://www.cee.com.br/pportal/cee/Component/Controller.aspx?CC=1221>)

Simulador ELETROPAULO: 27,14KWh por dia      CUSTO: R\$ 10,37 por dia ou ~321,75 por mês (<https://www.aeseletropaulo.com.br/para-sua-casa/informacoes/conteudo/simulador-de-consumo>)

Simulador MUX energia 28,72 KWh por dia      CUSTO: R\$12,06 p dia ou R\$ 361,96 por mês ([http://www.muxenergia.com.br/principal.php?id\\_menu=conta&id\\_area=consumo](http://www.muxenergia.com.br/principal.php?id_menu=conta&id_area=consumo))

Pico médio: 6KW

Fazendo custo médio: 27,833KWh por dia      R\$11,51 por dia ou R\$356,83 por mês

### 5.2.2 Geração energética

Antes de fazer a análise da geração de energia elétrica demandada pela casa a partir do biodiesel, será feita a análise considerando o diesel fóssil como combustível. Assim, buscamos um gerador movido a diesel fóssil que fosse capaz de garantir o funcionamento dessa residência.

Escolhemos o Gerador Toyama (modelo TD 7000CX3ED-ATS), conforme apresentado na Figura 40, devido a uma capacidade de suportar picos e variações um pouco maiores do que os outros da mesma categoria (Potencia máxima 6KW, Potência Nominal 5,5KW, com 15 L de combustível consumido por dia), assim permitindo um pouco mais de flexibilidade aos moradores no que tange a utilização dos equipamentos elétricos (porém é importante lembrar que ainda não é possível ligar todos os aparelhos ao mesmo tempo-atingindo o pico de 6KW-, pois a unidade geradora não suporta tal demanda. Se fossemos escolher um gerador capaz de suportar permanentemente esse pico, ele estaria superdimensionado em quase todo o seu período de funcionamento. Logo, não seria vantajoso.



**Figura 40: Grupo gerador**

(<http://www.brasutil.com/produto/Gerador+de+Energia+Diesel++10HP+6,5KVA+Trif%C3%A1sico+220V+Painel+Autom%C3%A1tico+ATS++Toyama/1275/TD7000CX3EDATS>)

### 5.2.3 Análise comparativa Biodiesel x Diesel em grupo gerador

*Puquevicz et al. (2008)* fizeram um estudo comparando os desempenhos de grupos geradores movidos a Diesel fóssil e Biodiesel etílico de Soja. Foi observado uma variação no comportamento do gerador a partir da adição de biodiesel na mistura que o alimentava ( foram

feitos testes com diversas misturas desde B0 a B100- o que nos interessa mais- passando por B2,B5,B10,B20 e B50)

Quando utilizando B100, o Biodiesel tornou o gerador um pouco mais instável. Devido à sua maior viscosidade -76 % maior que o diesel, *Puquevicz et al.(2008)*-, o biodiesel acaba por vezes oferecendo maior resistência de bombeamento no sistema do gerador ( fazendo com que ele oscile em alguns momentos e acabe tendo algumas variações na energia gerada). Porém em nenhum momento a geração energética é falha, isso é, ela não é interrompida em momento algum.

No que tange ao consumo, o biodiesel é consumido mais rapidamente do que o diesel( cerca de 10% a mais, *Puquevicz et al.(2008)*).Porém essa é uma quantidade que não inviabiliza seu uso. Essa característica provém do menor poder calorífico do biodiesel em relação ao combustível fóssil (a diferença também está nessa faixa).

Esse estudo mostrou que é possível utilizar biodiesel no gerador originalmente projetado para funcionamento a Diesel fóssil, havendo apenas algumas pequenas variações de funcionamento citadas acima.

Por isso é necessário ter um gerador capaz de produzir um excedente de energia em relação ao consumido pela casa. Ao usar o biodiesel a geração será levemente menor ( ou ,se igual, será capaz de gerá-la por menos tempo).

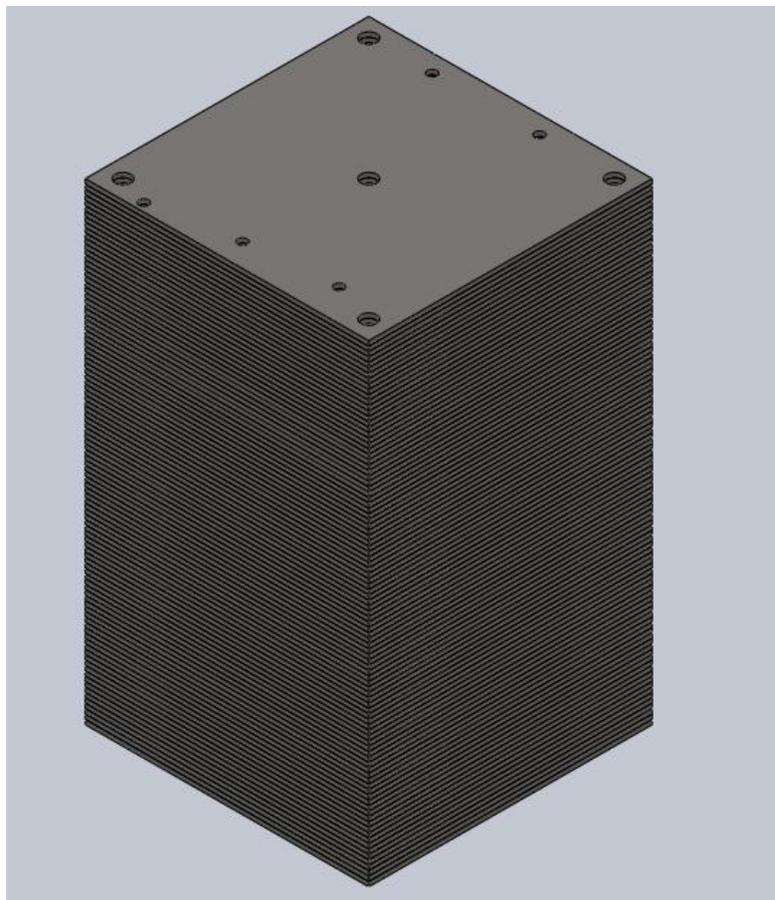
Dessa maneira, como o sistema gerador capaz de suprir a demanda energética da casa consome diariamente 15 L de combustível, é possível inferir que o dispositivo de microrreatores paralelizados deve atingir uma produção diária mínima de 15 L de biodiesel.

Este montante só é atingido com a utilização de um sistema composto por, no mínimo, 672 microreatores, visto que cada chip individualmente produz 0,9312 ml/hora , como indicado na Tabela 14.

### **5.3 Divisão de Módulos e Macromódulos**

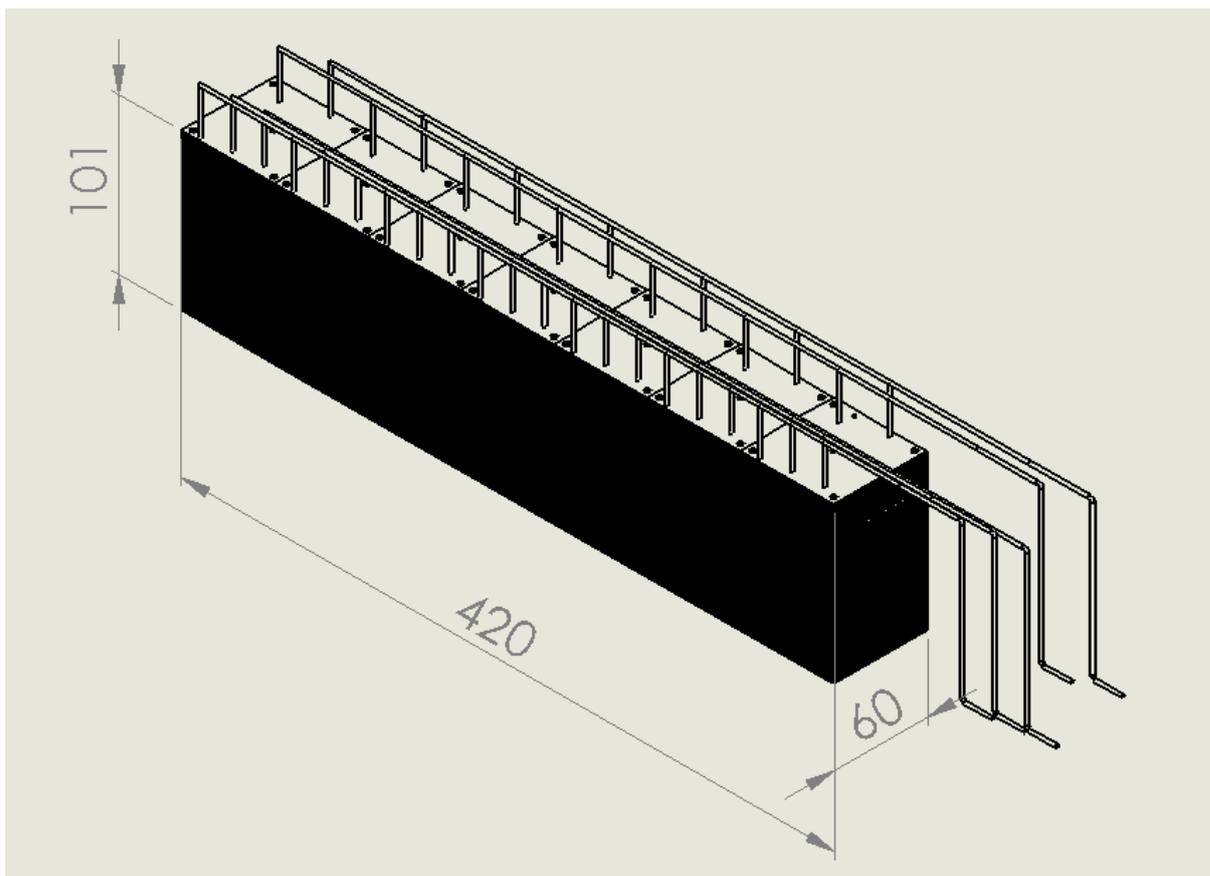
Por uma questão de segurança, de facilidade de manutenção e construção, vamos organizar esses 672 microchips em módulos, isso é, grupos de 50. Escolhemos esse número de

microchips agrupados para termos um dispositivo de menor altura, mais compacto, e de mais fácil acesso, além de maior simplicidade para construção de um protótipo. A Figura 41 apresenta um módulo com 50 microrreatores e 51 tampas de vedação.



**Figura 41: Representação de 1 módulo com 50 microchips selados**

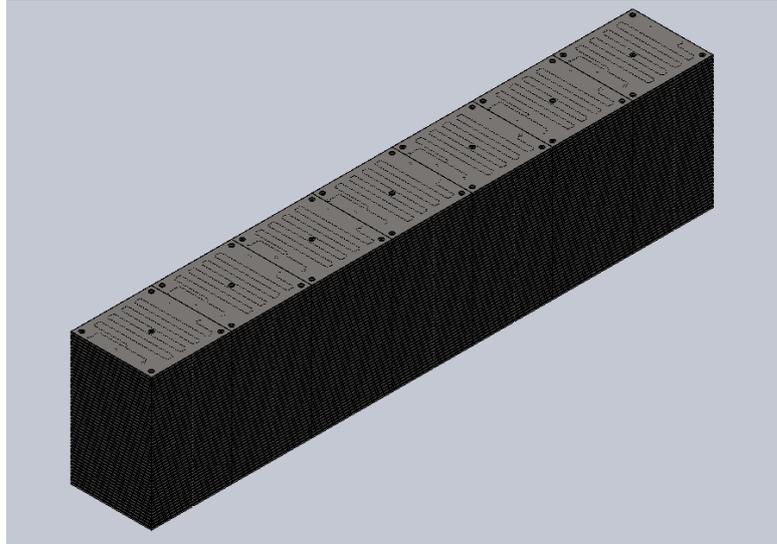
Como para o cálculo de distribuição de vazões foram considerados módulos com 50 microrreatores, o número de microchips do gerador está restrito a um múltiplo inteiro de 50 (sendo este número inteiro, a quantidade de módulos que existirá no gerador). Assim, será determinado como número de microchips o menor número possível que atende à demanda do estudo de caso realizado, isso é, 700 microrreatores, distribuídos em 14 módulos. Um modelo representativo destes 14 módulos está presente na **Error! Reference source not found.**



**Figura 42: Representação do sistema com 700 microchips**

Esses 14 módulos ainda serão agrupados em 2 grupos, por uma diferenciação puramente geométrica e organizacional, que influenciará positivamente nos cálculos fluidodinâmicos (pois reduzirão a perda de carga ao longo destes módulos) que serão mostrados nas seções seguintes e não gerará maior dificuldade de montagem.

Esses 2 grupos, compostos por 7 módulos cada, serão denominados Macromódulos. Uma ilustração de um macromódulo está presente na Figura 43.

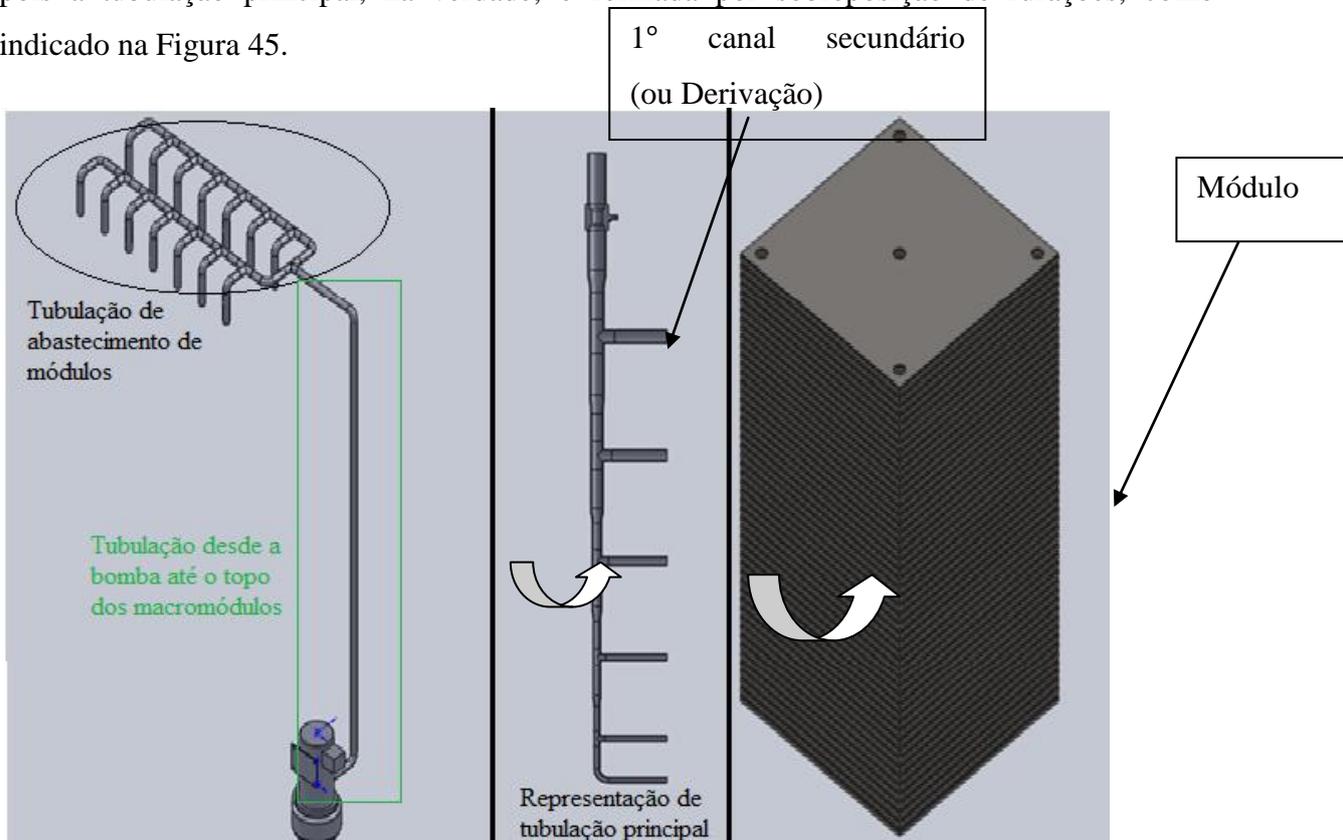


**Figura 43: Representação de 1 macromódulo**

## 6. Tubulação de Abastecimento

Nesta seção, será demonstrado o método utilizado para dimensionamento das tubulações diretamente conectadas aos módulos e aos microrreatores. Esse dimensionamento é fundamental para o projeto pois estas tubulações apresentam propriedades essenciais, como diâmetro de seção transversal variável, para garantir a distribuição igualitária de vazões em todos os microrreatores( primordial para que a síntese de biodiesel se dê da mesma maneira em todos os microchips).

Na Figura 44, pode-se observar um modelo do trecho de tubulação desde a bomba até o topo dos macromódulos e sua conexão com a "Tubulação de abastecimento dos módulos", ambas presentes à esquerda, na imagem. No centro da mesma imagem, há um duto análogo à "Tubulação principal", que se inicia ao fim de cada vertente da "Tubulação de abastecimento de módulos" e percorre o interior dos módulos ( seus canais secundários, serão denominados derivações, como será explicitado na próxima sub-seção). Essa tubulação é análoga à real, pois a tubulação principal, na verdade, é formada por sobreposição de furações, como indicado na Figura 45.



**Figura 44: Modelo dos diferentes trechos de tubulação do dispositivo**

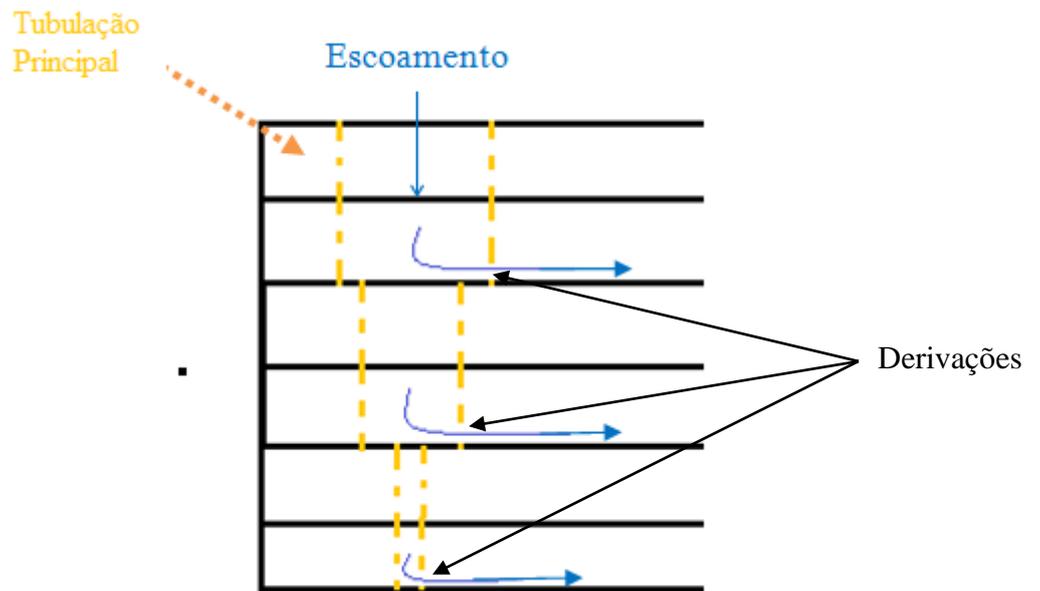
## 6.1 Tubulação principal de seção variável

É imprescindível, isso é, é condição fundamental para que atinjamos o objetivo de geração de biodiesel, que consigamos garantir a vazão específica de projeto na entrada todos os microchips do sistema.

A tubulação que antecede os microcanais é formada pelo alinhamento de furações nos microchips, como já foi dito anteriormente e ilustrado na Figura 19. E à medida que o fluido vai sendo escoado e parte dele é injetado nos microchips, sua vazão é reduzida e as perdas por atrito vão se tornando mais efetivas, tornando ainda mais difícil a garantia dessa condição de funcionamento (vazão igual em todas os microchips).

Para garantir tal condição, é necessário, então, fazer um estudo fluidodinâmico do sistema e algumas alterações no formato das estruturas que o compõem, isso é, o projeto desses dutos será feito de forma que, em cada microchip, adentre a mesma vazão do fluido, seja ele água, óleo ou álcool;

Modelamos nosso sistema da seguinte maneira: as furações sobrepostas sendo denominadas como "tubulação principal" e a microcanalização de cada microreator como sendo uma "derivação", para termos uma visão mais didática do abastecimento dos microrreatores. Está exposto na Figura 45, um destaque da região da Figura 19 em que o fluido sai da tubulação principal e adentra os microrreatores pelas derivações, isso é, as derivações são os pontos de conexão entre os microcanais e a tubulação principal.



**Figura 45: Modelo de tubulação principal e Derivações**

Será feita a análise, a princípio, de apenas 1 módulo. Sendo assim, há apenas 1 tubulação principal e 50 derivações ( pois o módulo é composto por 50 microchips).

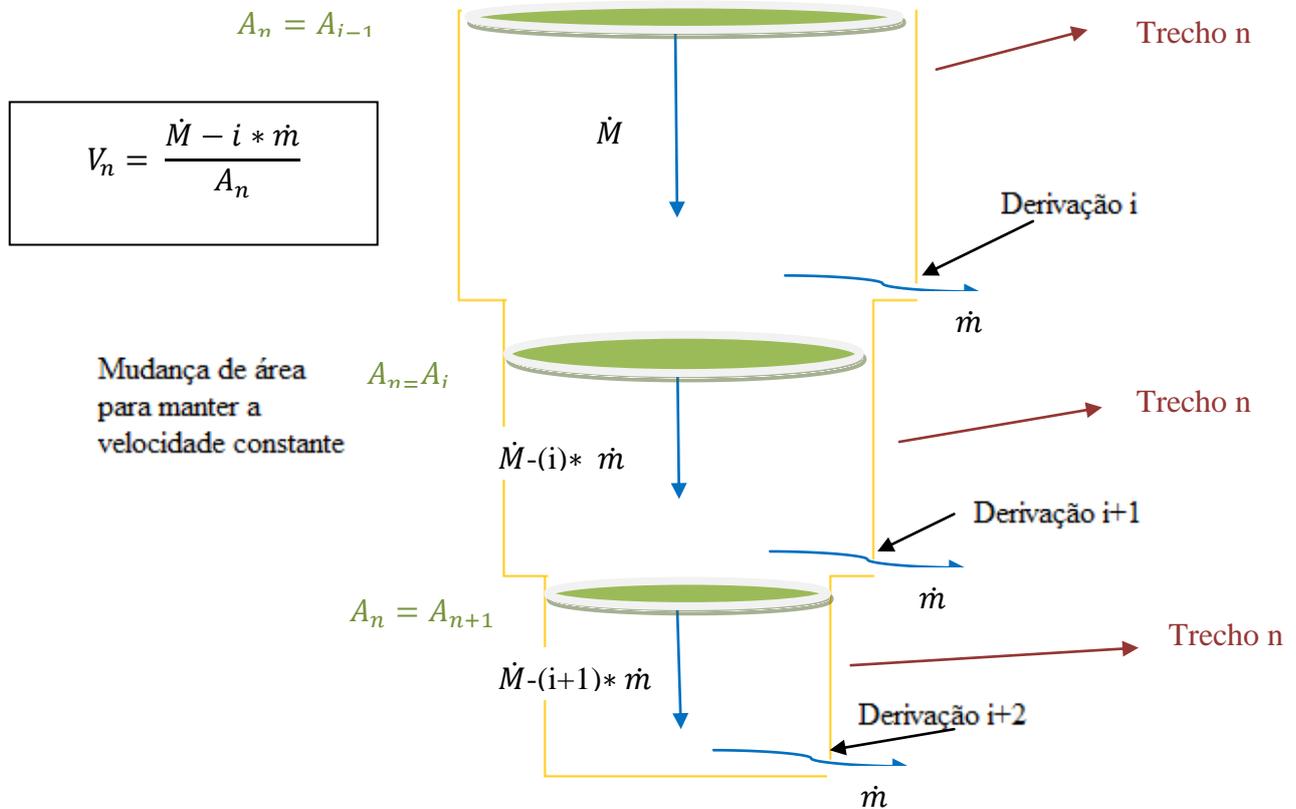
A grandeza a que está relacionada a quantidade de fluido que é injetada nas derivações é a velocidade média deste mesmo fluido, na tubulação principal, na seção imediatamente anterior à entrada da derivação. Isso é, a quantidade de fluido que entrará no microrreator - a vazão de entrada no microchip- é determinada pela velocidade média com que este fluido escoava na região imediatamente anterior à derivação( quando ainda estava na tubulação principal). Desta forma, se conseguirmos garantir a velocidade média do fluido constante ao longo de toda a tubulação principal (formada pelos furos sobrepostos), poderemos ter certeza de vazões constantes em todas as derivações.

Logo , sendo  $V$  , a velocidade média com que o fluido escoava na tubulação principal,  $A$  sendo a área transversal da tubulação principal no trecho pelo qual o fluido escoava e  $\dot{M}$  a vazão deste mesmo fluido neste trecho de tubulação , é sabido que :

$$V * A = \dot{M} \quad (Eq 5)$$

A velocidade está diretamente relacionada com a vazão que escoava pela tubulação principal. E, como consequência de uma variação da vazão nessa tubulação (pois a cada microchip, uma

parcela dos escoamento total sai das furações e é injetada nos microcanais) , há uma variação na velocidade.



**Figura 46: Desenho esquemático da variação da seção transversal compensando a variação de vazão e mantendo a velocidade na tubulação principal constante**

A maneira de solucionar este problema está diretamente relacionada à outra grandeza do existente na equação acima, a área da seção principal. Já que a cada microchip,  $\dot{M}$  (a vazão injetada no topo da tubulação principal) sofre uma queda de vazão  $\dot{m}$  (sendo  $\dot{m}$  a vazão necessária em cada microrreator para atingir as condições de geração de biodiesel) devido a saída de fluido pela derivação, é necessário também reduzir a seção transversal da tubulação para garantir que a velocidade se mantenha constante.

A queda de vazão a cada microrreator é representada por em

$$\dot{M} * - i * \dot{m} \quad (Eq 6)$$

Assim, sendo  $A_n$  a área do determinado trecho n da tubulação principal( onde n varia de 0 a 49, isso é, o primeiro trecho da tubulação principal é denominado trecho 0);  $\dot{M}$  a vazão

injetada no topo da tubulação principal;  $i$  o número do microchip existente neste trecho  $i$  de tubulação (por exemplo, se for o primeiro microchip,  $i=1$ ,  $n=0$  mas se for o último,  $i=50$ ,  $n=49$ ). e  $V_n$  a velocidade na tubulação principal neste trecho  $n$  de tubulação:

$$A_n = \frac{\dot{M} * - i * \dot{m}}{V_n} \quad (Eq 7)$$

$$n = i - 1 \quad (Eq 8)$$

A Figura 46 mostra como a variação da seção transversal da tubulação principal permite que, mesmo com a variação na vazão desta tubulação (devido a entrada de fluido nos microchips), a velocidade se mantenha constante.

Sendo que  $V_n$  será sempre igual a  $V_{cte}$ , que é uma velocidade tal que garante essa injeção  $\dot{m}$  de fluido em todos os microchips e que será determinada pela razão entre a vazão no último trecho da tubulação principal e a área deste trecho.

Ao determinar esta velocidade, é possível determinar a área necessária em cada trecho da tubulação que antecede os microchips e os abastece, pois serão sabidas as vazões de todos os trechos, pela Equação 6 e a área necessária para se chegar a velocidade  $V_{cte}$ .

Para descobrir qual a velocidade que consegue garantir a vazão exigida em todos os microcanais, faremos 2 considerações de projeto que devem ser seguidas mesmo que outros parâmetros sejam alterados (como número de microchips por módulo, vazão em cada microchip, etc):

1- O fim da tubulação principal (ou a furação do último microchip do módulo) deve transferir todo o fluido que por ele passa para o microcanal desse último microchip que o acompanha. É necessário atentar para o fato de a seção transversal da furação ser circular enquanto a do microcanal é quadrada. Essa condição será atingida se ambas as seções tiverem a mesma área.

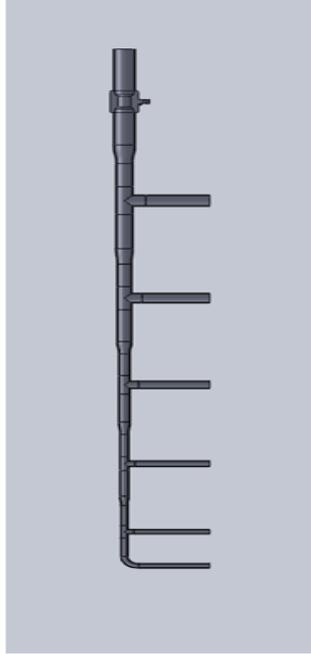
Sendo assim, já está determinada a área do último trecho da tubulação principal, pois está será igual à área do microcanal do microchip).

$$A_{50} = 0,16 \text{mm}^2$$

2- A vazão total injetada no topo do módulo deve ser igual a vazão de projeto de cada microchip multiplicada pelo número de microchips no módulo. Dessa maneira, garantimos continuidade total do escoamento a partir do regime estabilizado e determinamos a vazão inicial (e máxima) do nosso sistema.

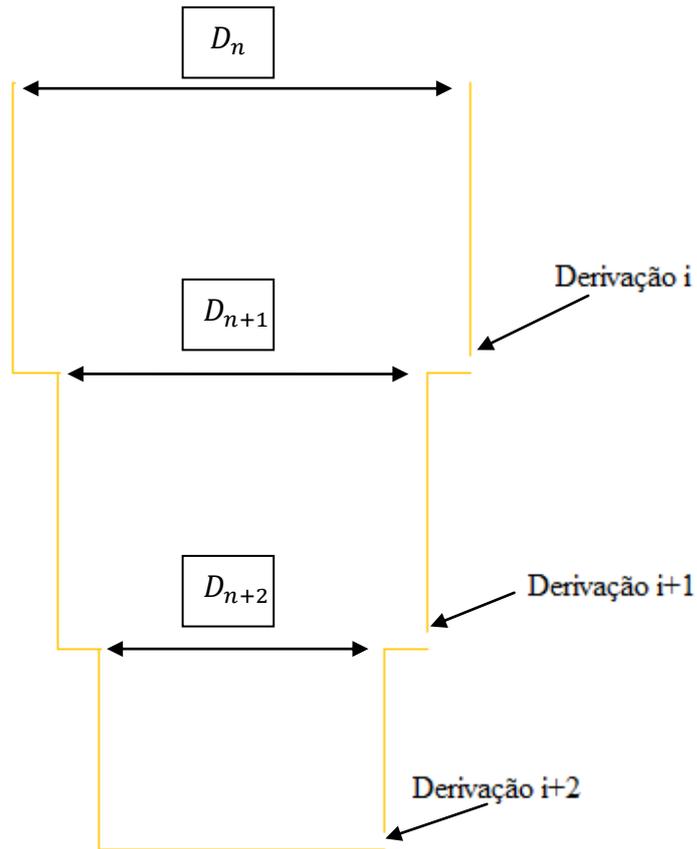
Seguindo essas condições, como já foi dito, é possível fazer uma iteração para resolver e determinar todas as variáveis do sistema (vazão em cada seção da tubulação que antecede os microreatores é determinada pela Equação, sua respectiva área de seção transversal-parâmetro de maior relevância a essa altura do projeto- é determinada pela Equação e a velocidade constante do fluido ao longo de todo o módulo é determinada pela razão Vazão/Área-ambas as variáveis do mesmo trecho).

É importante reforçar que, na prática, não teremos uma seção de seção continuamente variável, e sim, diferentes valores discretos de diâmetro de furação para cada trecho do escoamento( na Figura 47, há uma representação de tubulação equivalente a essa furação de diferentes diâmetros e na Figura 46 é possível ver a mudança abrupta de seção). Apesar de a Figura 47 apresentar diferentes distâncias entre as suas ramificações, assim como diferentes seções transversais dessas mesmas ramificações, não é isso que ocorre nas tubulações formadas pelas furações sobrepostas. Isso é, na Tubulação Principal, todas as derivações possuem a mesma seção transversal ( a mesma seção transversal dos microcanais) e possuem igual afastamento em todos os trechos de tubulação ( essa distância é a espessura de um microchip e sua tampa, 2mm).



**Figura 47: Representação de tubulação análoga à gerada pela furação de diferentes diâmetros**

Outra importante consideração é a de que há uma característica do método adotado para fabricação dessa tubulação do módulo a qual não foi dada grande importância anteriormente: as furações sobrepostas permitem que se fabrique essa "tubulação de seção variável" sem maiores dificuldades, visto que basta alterar o diâmetro da ferramenta de usinagem para alterar a seção. Na Figura 48, estão ilustrados uma parte da tubulação principal com três diferentes diâmetros. Esses diâmetros são usinados nas faces de um par microrreator e tampa (os diâmetros de furação da tampa são os mesmos diâmetros de furação do microrreator que está logo abaixo) e, para modificar seu valor, basta alterar, por exemplo, a broca utilizada nessa operação. Por exemplo, para fazer os furos  $D_1$ , usa-se a uma broca e para o furo  $D_2$ , usa-se outra.



**Figura 48: Representação dos diferentes diâmetros da tubulação principal**

As Tabela15, Tabela16 e Tabela17 mostram o procedimento iterativo de cálculo da variação de seção transversal e vazão em cada trecho os dutos de óleo, o álcool e a água, respectivamente

Nelas, é possível observar os parâmetros utilizados para se chegar, primeiramente, à velocidade constante que deverá ser obtida na tubulação ( os parâmetros área da seção transversal do microcanal e vazão do microcanal -que são os primeiros parâmetros apresentados na tabela, nas células em azul- retornam a velocidade apresentada nas células em verde, através da Equação 5). Assim, vê-se a velocidade constante em cada tubulação ( para água e óleo,  $V_{cte} = 0,729$  mm/s e para álcool,  $V_{cte} = 0,938$  mm/s) .

Para analisar o diâmetro e a vazão em todas os trechos ( na tabela, identificados pela coluna "i", em vermelho), a tabela deve ser lida da seguinte forma:

A coluna i indica o trecho da tubulação principal, logo, quando o valor deste primeira coluna é 1 (referente ao primeiro microrreator) , sabemos pela Equação 8 que  $n = 0$ , logo, estamos

observando o primeiro trecho da tubulação principal, aquele que antecede o primeiro microrreator , isso é, a primeira furação, feita no topo do módulo. Em seguida, deve-se observar as colunas imediatamente a direita, sendo estas: a coluna "Diâmetro de furação"(a segunda coluna da tabela) , em laranja, cujos valores foram determinados através da Equação 7, e "Vazão"(terceira coluna), em amarelo, cujos valores foram calculados através da Equação 6, que indicam o diâmetro da tubulação e a vazão que está escoando pelo trecho indicado na primeira coluna.

Assim, a vazão no microchip nº1, no primeiro trecho de tubulação, para cada fluido fica:

Água e óleo ,  $\dot{M} = 5,8 \text{ mm}^3/\text{s}$  , e para álcool,  $\dot{M} = 7,5 \text{ mm}^3/\text{s}$ .

Tabela 15: Dimensionamento da tubulação principal de óleo

Escoamento de óleo		
MICROCHIP		
Área seção microcanal(mm <sup>2</sup> )	0,16	
Vazão microcanal(mm <sup>3</sup> /s)	0,12	
Velocidade[mm/s]	0,73	
i	Diâmetro da furação[mm]	Vazão[mm <sup>3</sup> /s]
50	0,451	0,117
49	0,638	0,233
48	0,782	0,350
47	0,903	0,467
46	1,009	0,583
45	1,106	0,700
44	1,194	0,817
43	1,277	0,933
42	1,354	1,050
41	1,427	1,167
40	1,497	1,283
39	1,564	1,400
38	1,627	1,517
37	1,689	1,633
36	1,748	1,750
35	1,805	1,867
34	1,861	1,983
33	1,915	2,100
32	1,967	2,217
31	2,019	2,333
30	2,068	2,450
29	2,117	2,567
28	2,165	2,683
27	2,211	2,800
26	2,257	2,917
25	2,301	3,033
24	2,345	3,150
23	2,388	3,267
22	2,431	3,383
21	2,472	3,500
20	2,513	3,617
19	2,553	3,733
18	2,593	3,850

<b>i</b>	Diâmetro da furação[mm]	Vazão[mm <sup>3</sup> /s]
17	2,632	3,967
16	2,670	4,083
15	2,708	4,200
14	2,746	4,317
13	2,782	4,433
12	2,819	4,550
11	2,855	4,667
10	2,890	4,783
9	2,925	4,900
8	2,960	5,017
7	2,994	5,133
6	3,028	5,250
5	3,061	5,367
4	3,094	5,483
3	3,127	5,600
2	3,160	5,717
1	3,192	5,833

Tabela 16: Dimensionamento da tubulação principal de Álcool

Escoamento de álcool		
Parâmetros MICROCHIP		
Área seção microcanal(mm <sup>2</sup> )	0,16	
Vazão microcanal(mm <sup>3</sup> /s)	0,15	
Velocidade[mm/s]	0,938	
<b>i</b>	Diâmetro da furação[mm]	Vazão[mm <sup>3</sup> /s]
50	0,451	0,150
49	0,638	0,300
48	0,782	0,450
47	0,903	0,600
46	1,009	0,750
45	1,106	0,900
44	1,194	1,050
43	1,277	1,200
42	1,354	1,350
41	1,427	1,500
40	1,497	1,650
39	1,564	1,800
38	1,627	1,950

<b>i</b>	<b>Diâmetro da furação[mm]</b>	<b>Vazão[mm<sup>3</sup>/s]</b>
37	1,689	2,100
36	1,748	2,250
35	1,805	2,400
34	1,861	2,550
33	1,915	2,700
32	1,967	2,850
31	2,019	3,000
30	2,068	3,150
29	2,117	3,300
28	2,165	3,450
27	2,211	3,600
26	2,257	3,750
25	2,301	3,900
24	2,345	4,050
23	2,388	4,200
22	2,431	4,350
21	2,472	4,500
20	2,513	4,650
19	2,553	4,800
18	2,593	4,950
17	2,632	5,100
16	2,670	5,250
15	2,708	5,400
14	2,746	5,550
13	2,782	5,700
12	2,819	5,850
11	2,855	6,000
10	2,890	6,150
9	2,925	6,300
8	2,960	6,450
7	2,994	6,600
6	3,028	6,750
5	3,061	6,900
4	3,094	7,050
3	3,127	7,200
2	3,160	7,350
1	3,192	7,500

Tabela 17: Dimensionamento da tubulação principal de Água

Tubulação principal de água		
Área seção microcanal(mm <sup>2</sup> )	0,16	
Vazão microcanal(mm <sup>3</sup> /s)	0,117	
Velocidade[mm/s]	0,729	
i	Diâmetro da furação[mm]	Vazão[mm <sup>3</sup> /s]
50	0,451	0,117
49	0,638	0,233
48	0,782	0,350
47	0,903	0,467
46	1,009	0,583
45	1,106	0,700
44	1,194	0,817
43	1,277	0,933
42	1,354	1,050
41	1,427	1,167
40	1,497	1,283
39	1,564	1,400
38	1,627	1,517
37	1,689	1,633
36	1,748	1,750
35	1,805	1,867
34	1,861	1,983
33	1,915	2,100
32	1,967	2,217
31	2,019	2,333
30	2,068	2,450
29	2,117	2,567
28	2,165	2,683
27	2,211	2,800
26	2,257	2,917
25	2,301	3,033
24	2,345	3,150
23	2,388	3,267
22	2,431	3,383
21	2,472	3,500
20	2,513	3,617
19	2,553	3,733
18	2,593	3,850
17	2,632	3,967
16	2,670	4,083

$i$	Diâmetro da furação[mm]	Vazão[mm <sup>3</sup> /s]
15	2,708	4,200
14	2,746	4,317
13	2,782	4,433
12	2,819	4,550
11	2,855	4,667
10	2,890	4,783
9	2,925	4,900
8	2,960	5,017
7	2,994	5,133
6	3,028	5,250
5	3,061	5,367
4	3,094	5,483
3	3,127	5,600
2	3,160	5,717
1	3,192	5,833

E também vê-se que todas as 3 tubulações principais ( a de óleo, álcool e água) possuem o mesmo perfil de variação de diâmetros, e consequentemente, de áreas. Isso é, a coluna dos diâmetros indica os mesmos valores , para cada trecho de seção, independente do fluido.

Isso atribui maior facilidade na confecção dessas canalizações e não foi obtido por acaso.

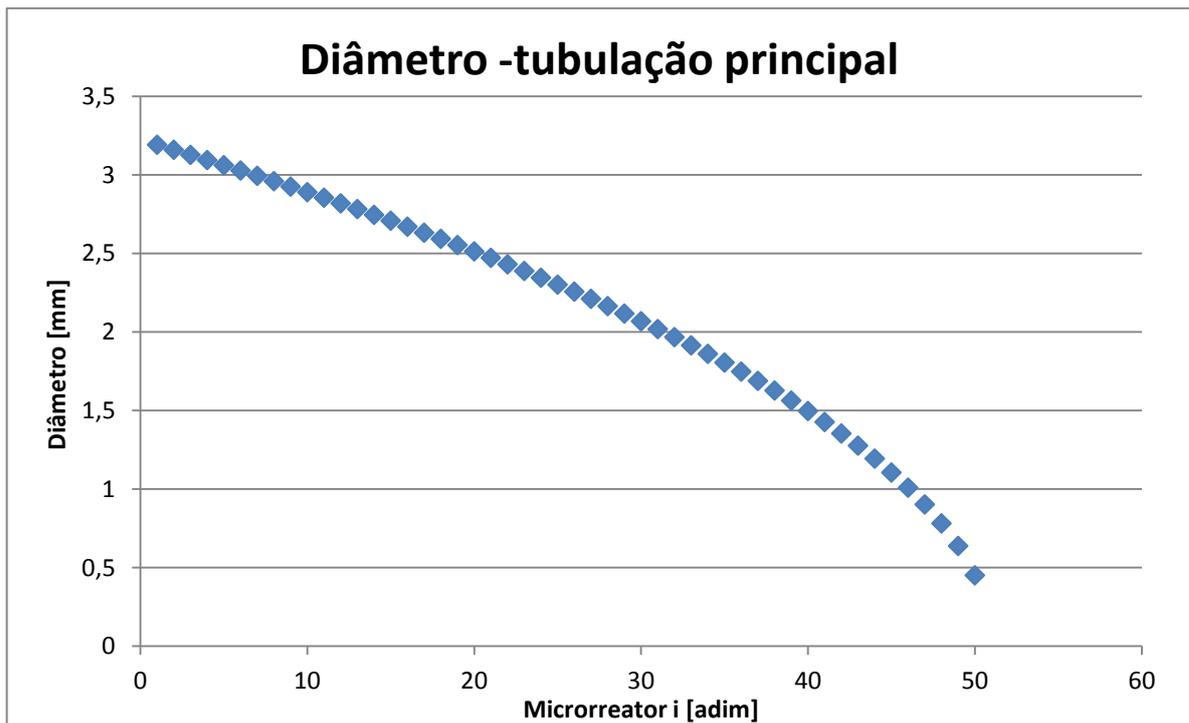
O que garante essa uniformidade nos dutos dos 3 fluidos é o fato de termos baseado nossos cálculos na fixação da velocidade interna do seu respectivo líquido, tornando este o único parâmetro que possivelmente variará. Quando se têm diferentes vazões, para permitir que o sistema ainda seja abastecido da maneira correta, poderíamos modelar nosso dispositivo com um perfil de variação de seção transversal para cada fluido ou com uma velocidade interna para cada fluido. E neste projeto, foi feito estabelecendo diferentes velocidades , justamente para facilitar a fabricação.

Isso é, quando houver uma variação de vazão de um fluido para outro, o que mudará no sistema é a velocidade interna de escoamento, e não de sua seção transversal. Como exemplo prático, é possível fazer a comparação entre a tabela de óleo, Tabela **15** , e a tabela de álcool, Tabela **16**.

O escoamento de álcool têm vazão de projeto superior ao escoamento de óleo ( 0,009 ml/min e 0,007 ml/min, respectivamente). E, ao observar as tabelas(mais precisamente na 2<sup>a</sup> coluna e 7<sup>a</sup> linha, onde se lê "Velocidade[mm/s]", vê-se que a velocidade constante de escoamento de cada tubulação é diferente (permitindo que suas áreas sejam iguais em trechos semelhantes).

Dessa forma, podemos gerar o seguinte perfil de variação de seção transversal para a tubulação principal. Na Figura 49, está ilustrado o perfil das seções transversais ao longo da tubulação principal, isso é, o gráfico mostra o diâmetro da tubulação que antecede os microchips, em função do trecho da tubulação, diretamente ligado à ordem dos microreatores.

Para facilitar a visualização, pode-se vislumbrar da seguinte forma: o início da tubulação se dá no 1<sup>o</sup> microreator, porém à cada microreator, esse diâmetro é reduzido. O gráfico ilustra o diâmetro da tubulação( eixo das ordenadas) no trecho que antecede o iésimo microreator(eixo das abscissas), desde o 1<sup>o</sup> até o 50<sup>o</sup>..

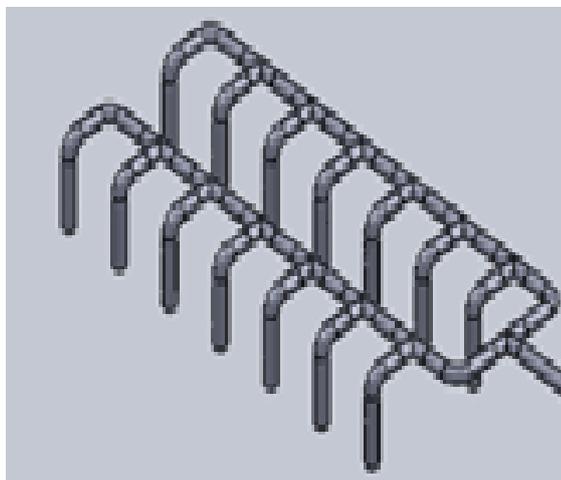


**Figura 49: Diâmetros das seções transversais da tubulação principal a cada microchip**

## 6.2 Tubulação de abastecimento dos módulos

Esta seção apresentará a metodologia para o dimensionamento do trecho de tubulação do dispositivo que antecede a tubulação principal ( dimensionada na seção anterior). Esta tubulação também possuirá diâmetro de seção transversal variável, uma vez que esta alimentará variados módulos, com a obrigatoriedade de fornecer vazões iguais em todos.

Observando a Figura 22, onde está o trecho desde a bomba até os módulos, e a Figura 50, onde está ilustrada a representação da tubulação que será estudada agora, é possível inferir seu posicionamento no dispositivo.



**Figura 50: Tubulação de abastecimento dos módulos**

## 6.3 Utilização de uma bomba por fluido

Devido ao fato de este projeto se propôr a desenvolver todas as partes do microrreator de biodiesel, será realizado o estudo do projeto conceitual considerando 1 bomba para cada fluido- devido às propriedades discrepantes da água , do álcool e do óleo vegetal-, totalizando 3 bombas em todo o dispositivo. Assim, cada bomba terá que pressurizar o fluido através de todos os módulos e microchips.

Sendo assim, é necessário fazer um estudo análogo ao feito na seção 6.1 , de maneira a garantir a vazão no topo de cada módulo uma velocidade constante tem que ser imprimida nas

tubulações(esses valores foram determinados na seção anterior e são  $V_{cte} = 5,8\text{mm/s}$ , para os módulos de água e óleo, e  $V_{cte} = 7,5\text{mm/s}$  para os módulos de álcool ).

Esse estudo foi feito para cada macromódulo, que é constituído de 7 módulos cada, gerando 7 pontos de derivação nessa tubulação, como ilustrado na Figura 50 e 7 diferentes vazões ao longo de seu comprimento ( visto que a cada módulo, a vazão é reduzida, pois uma parte do fluido é injetada no módulo). Assim, foram determinados, através do mesmo método da seção anterior, todos os parâmetros acerca do escoamento dos fluidos nessa tubulação que antecede a entrada dos grupos de microchips ( vazão em cada trecho e área do respectivo trecho para garantir velocidade constante).

Isso é, com os primeiros parâmetros da tabela 18,19 e 20 , que estão indicados nas células em azul ( área da furação realizada no topo do módulo e a vazão que tem que ser estabelecida nesta furação), pode-se inferir a velocidade que deve ser estabelecida em toda a tubulação que antecede os módulos ( para todos os fluidos) através da Equação 5( este valor está indicado nas células em verde).

Assim, com a velocidade constante já determinada, é necessário ler as Tabela 18, Tabela 19 e Tabela 20 do seguinte modo:

A coluna  $i$  (primeira coluna, à partir da célula em vermelho) , representa o trecho da tubulação, isso é, se  $i = 2$ , estamos analisando o trecho de tubulação antecedente ao módulo 2( isso é, o trecho 1, pela equação 8). Ao saber a qual trecho se refere, basta analisar a coluna "diâmetro da seção", cujos valores estão em laranja ( e foram determinados através da equação 7), e a coluna "Vazão", cujos valores estão em amarelo( e foram calculados através da Equação 6), para saber os parâmetros nesta seção.

Tabela 18: Dimensionamento da tubulação que antecede os módulos (escoamento de óleo)

Tubulação que antecede os módulos(escoamento de óleo)		
Área seção da furação de topo(mm <sup>2</sup> )	8	
Vazão topo módulo(mm <sup>3</sup> /s)	5,83	
Velocidade módulo(mm/s)	0,729	
<b>i</b>	Diâmetro da seção[mm]	Vazão[mm <sup>3</sup> /s]
7	3,192	5,830
6	4,514	11,667
5	5,528	17,500
4	6,383	23,333
3	7,137	29,167
2	7,818	35,000
1	8,444	40,833

Tabela 19: Dimensionamento da tubulação que antecede os módulos (escoamento de etanol)

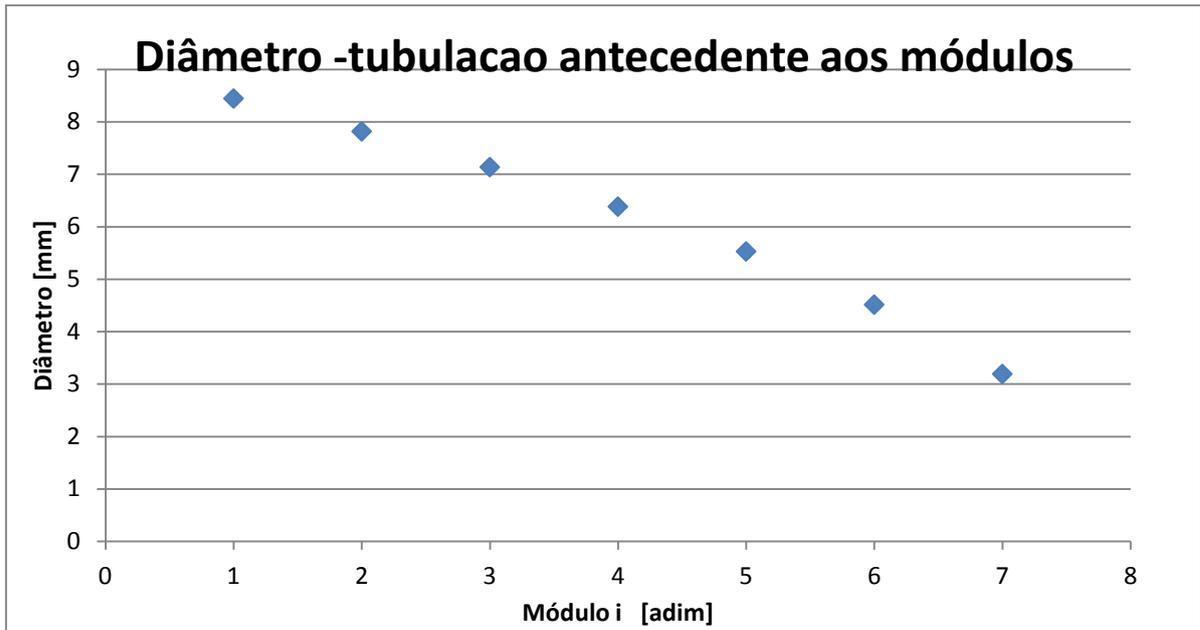
Tubulação que antecede os módulos(escoamento de etanol)		
Área seção da furação de topo(mm <sup>2</sup> )	8	
Vazão topo módulo(mm <sup>3</sup> /s)	7,5	
Velocidade módulo(mm/s)	0,938	
<b>l</b>	Diâmetro da seção[mm]	Vazão[mm <sup>3</sup> /s]
7	3,192	7,500
6	4,514	15,000
5	5,528	22,500
4	6,383	30,000
3	7,137	37,500
2	7,818	45,000
1	8,444	52,500

Tabela 20: Dimensionamento da tubulação que antecede os módulos (escoamento de água)

Tubulação que antecede os módulos(escoamento de água)		
Área seção da furação de topo(mm <sup>2</sup> )	8	
Vazão topo módulo(mm <sup>3</sup> /s)	5,83	
Velocidade módulo(mm/s)	0,729	
	Diâmetro da seção[mm]	Vazão[mm <sup>3</sup> /s]
7	3,192	5,830
6	4,514	11,667
5	5,528	17,500
4	6,383	23,333
3	7,137	29,167
2	7,818	35,000
1	8,444	40,833

Aqui ,de novo, encontramos um perfil único de variação, independente do fluido que escoar ou da vazão instituída como obrigatória para funcionamento do módulo.

O perfil de variação da tubulação que antecede os módulos, então,está representado na Figura 51. Neste gráfico está explicitada a variação nesta tubulação à medida que se avança de um módulo para outro. Dessa forma, nele estão representados, o diâmetro do trecho de tubulação(eixo das ordenadas) que antecede o iésimo módulo(eixo das abscissas), desde o 1<sup>o</sup> até o 7<sup>o</sup>.



**Figura 51: Diâmetro da seção transversal do duto anterior aos módulos após a passagem por cada módulo**

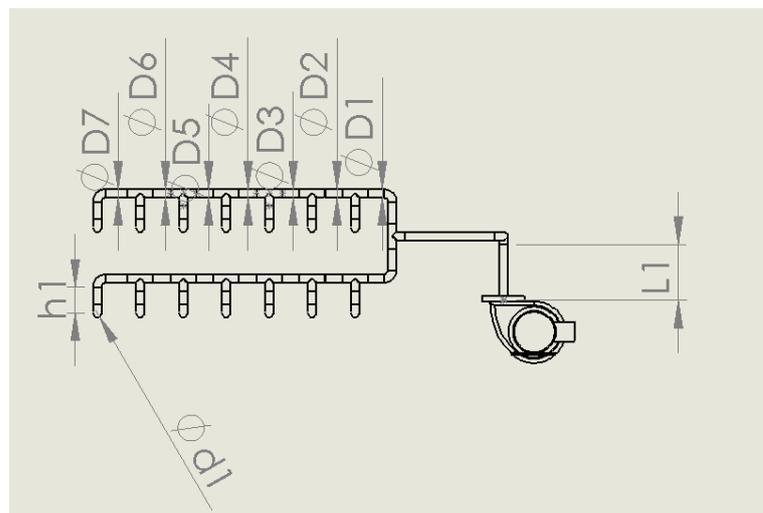
A tubulação existente desde a bomba até os macromódulos, junto com aquela que liga os conjuntos de módulos até o reservatório de separação serão dimensionadas nesta seção, porém há certa flexibilidade em seu dimensionamento. Isso é, em uma possível reprodução do trabalho aqui desenvolvido, o projetista pode atribuir comprimentos maiores a essas tubulações do que os determinados neste capítulo, desde que recalcule as perdas de carga do escoamento nesses dutos.

Este trecho possui seção transversal fixa e por isso não requer nenhum tratamento ou fabricação especial. O mesmo pode ser considerado de seu material. Assim sendo, este componente pode ser constituído desde material polimérico (que traz como vantagem uma maior flexível, importante em situações de movimentação do sistema) até ligas metálicas (mais resistentes ao tempo e a possíveis esforços que possam atuar sobre a esse trecho dos dutos do dispositivo). É necessário apenas atentar para as condições mínimas de funcionamento do sistema: a não reação do material com os fluidos que por ele escoam e a possibilidade de fabricação nas exatas dimensões demandadas pelo estudo fluidodinâmico realizado.

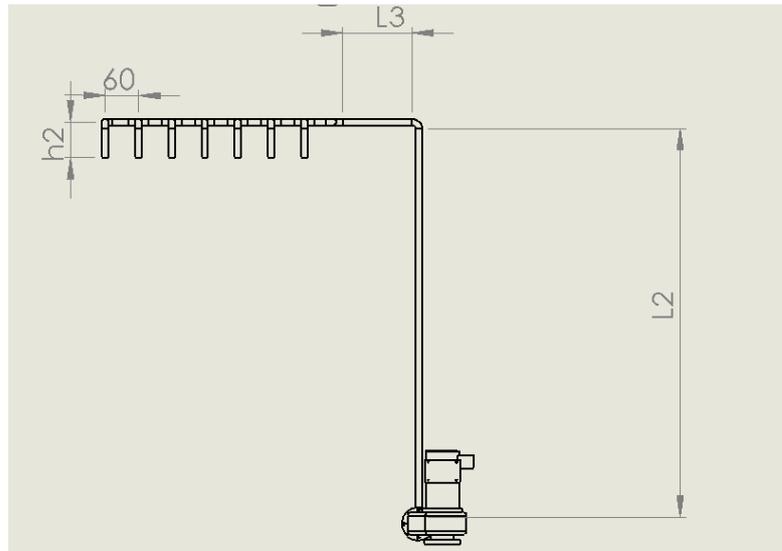
As válvulas e outros acessórios possivelmente presentes na linha são, em sua grande maioria, flangeadas, tornando mais fácil sua instalação em tubulações metálicas. Porém a decisão por qualquer material desse tipo acarretará em maior peso do gerador de biodiesel e menor maleabilidade do posicionamento dos sistemas de bombeamento. Portanto, é necessário considerar qual dos materiais se adequa mais a situação de projeto almejada por aquele que construirá o dispositivo.

Aqui, optaremos por uma tubulação de material metálico devido a sua maior resistência ao desgaste e a possíveis impactos que o dispositivo pode sofrer em um eventual manipulação ou transporte (possível devido à sua portabilidade). Isso é, visto o objetivo do trabalho, que é projetar um mecanismo que operará em ambientes externos e potencialmente agressivos, o material metálico oferece menor risco de danos permanentes.

Esse trecho da tubulação passará por uma bifurcação logo antes de atingir os 2 macromódulos (para que ambos possam ser alimentados igualmente). Como a velocidade na entrada desses macromódulos foi determinado pelo estudo anteriormente realizado (ver seção 6.2.1) sabemos que a velocidade do fluido na tubulação que sofre a bifurcação deve ser o dobro dessa velocidade calculada (pois possui mesma seção transversal porém com o dobro de vazão). Essa característica é fundamental para o cálculo da perda de carga que será realizado a seguir.



**Figura 52: Desenho da tubulação externa- desde a bomba até os macromódulos - Vista Superior**



**Figura 53: Desenho da tubulação externa -desde a bomba até os macromóduls - Vista lateral**

As dimensões das tubulações externas ao sistema de chips requerem atenção para sua correta interpretação. Aqui, essas premissas criadas para o projeto dessas tubulações serão repetidas para facilitar a leitura dos desenhos.

Primeiramente, a tubulação de entrada e de saída dos macromódulos foram assumidas como de mesmo comprimento total. Isso, na prática, representa um modo conservador de pensar o sistema, visto que nos dutos de saída, não é necessário o mesmo comprimento (sendo possível, por exemplo, que não haja os trechos de dimensão  $L1$ ,  $L2$  e  $L3$ ).

Além, claro, de não existir a componente da bomba na tubulação de saída.

As dimensões  $L1$ ,  $L2$  e  $L3$  constituem o chamado Trecho1, e assim como foi descrito na seção 6, possuem um comprimento determinado neste projeto mas, como já foi dito anteriormente, podem assumir outras dimensões se for do interesse do projetista (desde que o responsável pela fabricação do dispositivo contabilize a total perda de carga inerente ao comprimento escolhido). No presente trabalho foi determinado que  $L1+L2+L3$  possuam dimensão máxima de 350mm, sendo sua perda de carga também calculada para esse valor.

Aqui é importante ressaltar que foi representado um modelo de tubulação rígida para o trecho 1. As dimensões  $D1$ ,  $D2$ ,  $D3$ ,  $D4$ ,  $D5$ ,  $D6$  e  $D7$  também estão indicadas na seção 6, nas Tabela 18, Tabela 19 e Tabela 20, além da Figura 51.

É fundamental que  $h1$  e  $h2$  não sejam pré determinados nos desenhos (assim como o comprimento total do trecho1), pois são dimensões existentes para que seja possível um

acoplamento das tubulações dos 3 fluidos ao sistema de módulos sem que haja interferência. Dessa maneira, a tubulação de cada fluido terá um valor adequado para elas possam coexistir e garantir a montagem.

Deve-se atentar também para o fato de, caso o construtor do dispositivo tenha optado por válvulas na tubulação de comprimento  $h_2$ ,  $h_2$  tem que ser capaz de aportar a inserção desta válvula.

#### 6.4 Válvulas

É importante ressaltar a necessidade da existência de válvulas no trecho 2 ( tubulações de abastecimento de módulos) da tubulação ( parte dos dutos que abastecem os módulos). Essa necessidade provém da adaptação que o sistema tem que sofrer quando o operador do dispositivo deseja fazer uma manutenção de algum módulo (seja por rotina ou por identificação de alguma falha), sem que, para tal operação, se veja obrigado a desligar as bombas e , conseqüentemente, interromper por completo a geração de biodiesel.

Um estudo foi realizado para quantificar o tipo de ajuste que tem que ser feito nas vazões dos módulos que não sofrerão a manutenção, de forma a não prejudicar a geração de biodiesel.

Isso é, a utilização de válvulas, posicionadas no trecho de dimensão  $h_2$  , indicado na Figura 53, permitirá controle da vazão quando 1 ou mais módulos do macromódulo estiverem em manutenção e tiverem que ser fechados.

Com a interrupção completa do fluxo através de 1(ou mais) módulo(s), o fluxo em todos os outros grupamentos aumentará, pois uma mesma quantia de fluidos será bombeada por menos pontos de saída.

Sendo assim, este aumento na vazão na entrada de cada módulo será vazão que passava pelo módulo interrompido sobre o número de grupamentos restante.

$$\Delta m = i * \frac{(\dot{m})}{(14 - i)} \quad (Eq 9)$$

Sendo:

$\Delta m$  – a diferença na vazão de cada módulo não interrompido

$i$  – Número de módulos interrompidos para manutenção

$\dot{m}$  – Vazão do módulo interrompido

Dessa maneira, para continuar tendo as mesmas condições de funcionamento e geração de biodiesel do dispositivo, é necessário restringir o fluxo na entrada de cada módulo.

Assim, por exemplo, como todos os módulos em funcionamento normal possuem a mesma vazão, a restrição a ser feita pode ser calculada da seguinte maneira

$$\frac{(\dot{m} + \Delta m)}{\dot{m}} = \frac{1}{r} \quad (\text{Eq 10})$$

Sendo  $r$  o fator de restrição que devemos aplicar à vazão em todos os grupamentos ainda em funcionamento.

Então para o caso de interrupção do fluxo de 1 módulo para que se faça a manutenção deste, pode-se afirmar que:

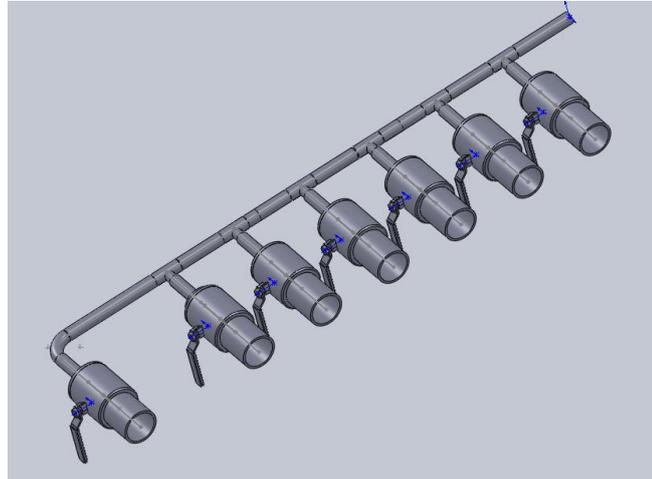
$$\frac{1}{r} = \frac{(\dot{m} + \frac{\dot{m}}{13})}{\dot{m}} \rightarrow r = 0,93 \quad (\text{Eq 11})$$

Isso indica que, ao interromper o funcionamento de 1 módulo do sistema, deve-se reduzir a vazão em todos os outros módulos em cerca de 7%. Essa redução compensará o aumento na vazão dos outros módulos ainda em operação inerente à interrupção, decorrente de uma possível manutenção, do fluxo de 1. Dessa forma, o ajuste garante que se continue tendo uma geração de biodiesel nas condições de projeto.

A adição de válvulas na rota deixaria a tubulação com a aparência indicada na Figura 54.

As válvulas escolhidas foram as válvulas globo por terem sua aplicação extensamente utilizada em sistemas onde o fechamento, a abertura e o ajuste de vazão são recorrentes. Além de permitirem o ajuste da vazão, elas atingem o fechamento/abertura completos em menos tempo que outros tipos de válvulas. Outra propriedade que levou a sua escolha foi a

adequação e aplicabilidade ao escoamento de fluidos variáveis, desde água até óleos de viscosidade elevada, como o petróleo (*Unival-Válvulas e conexões* )



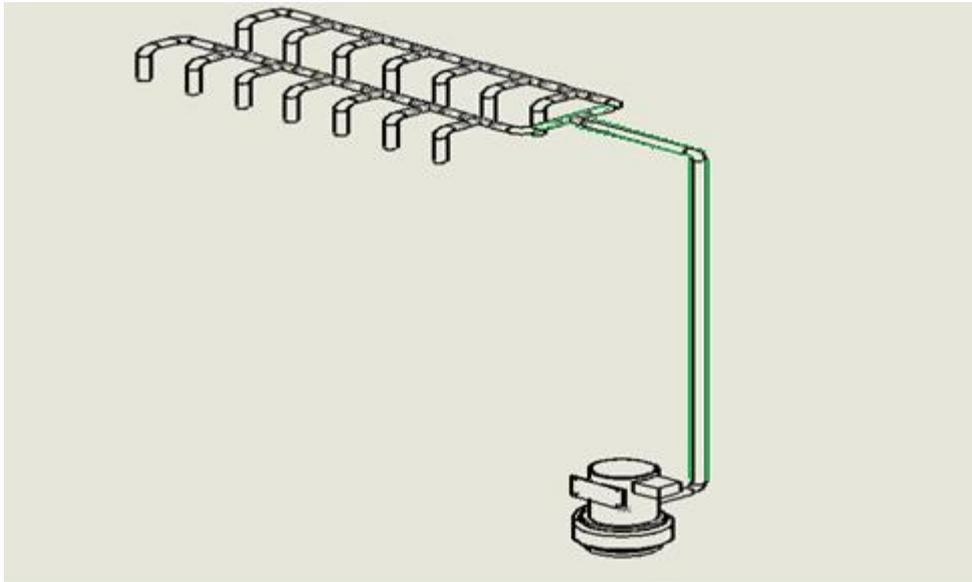
**Figura 54: Representação de válvulas no trecho 2 da tubulação**

## 7 PERDA DE CARGA

O estudo sobre a perda de carga foi realizado individualmente para cada fluido, de modo a permitir o dimensionamento da bomba capaz de suprir o funcionamento do equipamento aqui projetada. Assim, explicitaremos aqui o estudo realizado para água, etanol e óleo de soja (lembrando que também está presente nesse relatório, parâmetros de outros fluidos para o caso de não serem estes 3 os fluidos utilizados pelo projetista que use esse trabalho como referência).

Primeiramente, para ter o valor mais correto possível da perda de carga total do sistema, dividiremos nossa análise em diferentes trechos do escoamento e tipos de perda, sendo eles:

Trecho1-Tubulação desde a bomba até os macromódulos (2 para este projeto) e tubulação dos macromódulos até reservatório de separação, indicados na Figura 55, pelas linhas na cor verde (desconsiderar a bomba genérica ilustrada).



**Figura 55: Trechos 1, destacado com as linhas em verde, e 2, com as linhas em preto**

Trecho 2-Tubulação de abastecimento dos módulos - presente tanto antes dos módulos como depois, indicado na Figura 55, pelas linhas na cor preta e representada na Figura 50.

Trecho 3-Tubulação principal de abastecimento dos chips( de seção variável) - presente tanto antes dos chips como depois , formada pela sobreposição de furações, indicada nas Figura 45 e Figura 46 e representada na Figura 47.

Trecho 4-Microcanais dos microrreatores, mostrado nas Figura 16

-Perda de carga por acidentes

-Diferença de altura

Para iniciar o estudo de perda de carga por trecho de tubulação, determinados o regime do escoamento através do número de Reynolds, através de

$$Re = V * \frac{D}{\vartheta} \quad (Eq 12)$$

Sendo V= velocidade média do escoamento

D = Diâmetro da seção transversal do duto no trecho de análise.

$\vartheta$  = Viscosidade cinemática do fluido sendo escoado

A partir da comprovação de regime laminar em todo o escoamento (como será mostrado), aproximamos nossa perda de carga pela equação de Darcy-Weisbach :

$$\Delta p = f * \frac{L}{D} * \frac{V^2}{2 * g} \quad (Eq 13)$$

Sendo  $f$  = fator de atrito,  $L$ = comprimento do trecho,  $V$ = velocidade ao longo do trecho,  $D$ = diâmetro do duto no trecho,  $g$ = constante gravitacional

Tem-se as seguintes premissas(OSIZIK, 1985):

$$f_{seção\ circular} = \frac{64}{Re} \quad (Eq 14)$$

$$f_{seção\ quadrada} = \frac{56,91}{Re} \quad (Eq 15)$$

$$g = 9806\ mm/s^2$$

Aqui foram apresentados os fatores de atrito para tubulações de seção quadrada e seção circular. Isso se faz necessário pois ambos serão aplicados, dependendo do trecho de tubulação analisado, isso é, nos microcanais dos microrreatores-que possuem seção quadrada-será utilizado o fator de atrito de seção quadrada , enquanto em todas as outras tubulações abordadas - e que possuem seção circular- o fator de atrito utilizado será o de seção circular. Os outros parâmetros serão determinados na análise de cada trecho, feita a seguir.

### 7.1 Perda de carga devido ao escoamento de água

Iniciando a análise pelo escoamento de água:

Os parâmetros necessários para determinação da perda de carga são aqueles necessários para resolver as equações 12 e 13.É importante frisar que nos trechos 2 e 3, é necessário fazer um cálculo da perda de carga para cada seção. Isso se dá devido ao fato de cada trecho possui uma seção transversal diferentes e ,com isso, possuir diferentes número de Reynolds e fatores de atrito.

Fazendo a análise por trecho:

- Trecho 1

V é o dobro da velocidade necessária na entrada dos macromódulo, devido ao fato de passar por uma bifurcação antes dos grupos de módulos, logo  $V = 2 * 0,73 \text{ mm/s} = 1,46 \text{ mm/s}$

A viscosidade cinemática da água (considerando a temperatura de 85 °C) é

$$(\nu)_{\text{água}} = 0,364 \text{ mm}^2/\text{s}$$

O diâmetro considerado é o mesmo indicado do primeiro trecho da tubulação que antecede os módulos, pois esta e o trecho 1 são diretamente conectadas. Este valor está indicado na Tabela 20

Logo,  $Re = 16,9 < 2300$ , configurando regime laminar de escoamento.

Considerando a equação de Darcy-Weisbach (Equação 13), as variáveis  $V$ ,  $g$  e  $D$  e  $f$  (através da Equação 14) agora estão determinadas. Assim, a única variável que nos resta determinar é  $L$ , o comprimento desse trecho de dutos.

Como uma decisão de projeto, é necessário ser conservador e projetar um comprimento de linha suficiente para atender ao objetivo (no caso, fazer a conexão entre a bomba e o topo dos macromódulos) e segurança àquele que constrói o dispositivo.

Assim, considerando a bomba posicionada no chão e como comprimento mínimo a altura do módulo, 100 mm, mais a bifurcação que antecede os macromódulos, 60 mm (largura de 1 chip) e aplicando um fator de segurança de 2.2 sobre o total - a opção desse fator de segurança foi imposto pelo desejo de se considerar, no cálculo da perda de carga, uma tubulação com mais que o dobro do comprimento mínimo, para que a perda calculada contemple mudanças no trajeto ilustrado na Figura 55 (desde que essas mudanças sejam de até 100% da dimensão original)-, chegamos a um valor de  $L = 350\text{mm}$ .

Assim  $\Delta P = 0,017\text{ mm}$  (Equação 13).

Considerando que a tubulação após os macromódulos, que possui representação idêntica a destacada em verde na Figura 55, até o reservatório de separação possui as mesmas dimensões que os dutos que se iniciam na saída da bomba e tem fim no topo do 1º módulo, podemos concluir que  $\Delta P_1 = 0,034_{mm}$ , onde  $\Delta P_n$  representa a perda de carga no trecho  $n$  da tubulação.

Trecho 2:

Agora há uma tubulação de seção variável, o que traz diferentes valores de Reynolds e de diâmetro dentro do trecho 2.

Os diâmetros e a velocidade, agora, são os mesmos indicados na Tabela 20 e através das Equações 12 e 14, têm o número de Reynolds e o fator de atrito calculados. Assim, pela equação 13, e sabendo que o comprimento de cada seção é a distância entre módulos (também expressa pela largura do módulo), 60mm, a perda de carga por seção  $i$  (onde  $i$  é o módulo ao qual o trecho analisado se refere) é obtida e está mostrada na Tabela 21.

Tabela 21: Cálculo da perda de carga no trecho 2 (escoamento de água)

<b>trecho2</b>	
i	Perda total(por seção) [mm]
7	0,00510
6	0,00255
5	0,00170
4	0,00128
3	0,00102
2	0,00085
1	0,00073

O total é  $\Delta P_2 = 0,02647\text{mm}$  .

Assim como no trecho 1, podemos considerar o dobro dessa perda de carga obtida, visto que esses dutos se repetem após os módulos.

E ao considerar que existirão 2 macromódulos, essa perda de carga obtida deve ser considerada 4x maior.

Trecho 3:

De novo, analisaremos uma seção com ainda mais trechos de diferentes áreas de seção transversal e , conseqüentemente, diferentes valores de Reynolds e de fator de atrito.As únicas diferenças em relação ao cálculo feito para o trecho 2 é que os valores das seções transversais usados no trecho 3 estão expressos na

Tabela 17 e que o comprimento de cada trecho (distância entre duas seções transversais diferentes) é a espessura de 1 chip e de sua tampa, expressos na Figura 30, 2mm.

Na

Tabela 22, estão as perdas de cargas, o Reynolds e o fator de atrito para cada seção.

Tabela 22: Cálculo da perda de carga no trecho 3 (escoamento de água)

trecho 3			
i	reynolds	f circular	Perda (por seção) [mm]
1	0,9	70,7	0,00045
2	1,3	50,0	0,00032
3	1,6	40,8	0,00026
4	1,8	35,4	0,00023
5	2,0	31,6	0,00020
6	2,2	28,9	0,00019
7	2,4	26,7	0,00017
8	2,6	25,0	0,00016
9	2,7	23,6	0,00015
10	2,9	22,4	0,00014
11	3,0	21,3	0,00014
12	3,1	20,4	0,00013
13	3,3	19,6	0,00013
14	3,4	18,9	0,00012
15	3,5	18,3	0,00012
16	3,6	17,7	0,00011
17	3,7	17,2	0,00011
18	3,8	16,7	0,00011
19	3,9	16,2	0,00010
20	4,0	15,8	0,00010
21	4,1	15,4	0,00010
22	4,2	15,1	0,00010
23	4,3	14,8	0,00009
24	4,4	14,4	0,00009
25	4,5	14,1	0,00009
26	4,6	13,9	0,00009
27	4,7	13,6	0,00009
28	4,8	13,4	0,00009
29	4,9	13,1	0,00008
30	5,0	12,9	0,00008
31	5,0	12,7	0,00008

i	reynolds	f circular	Perda (por seção) [mm]
32	5,1	12,5	0,00008
33	5,2	12,3	0,00008
34	5,3	12,1	0,00008
35	5,4	12,0	0,00008
36	5,4	11,8	0,00008
37	5,5	11,6	0,00007
38	5,6	11,5	0,00007
39	5,6	11,3	0,00007
40	5,7	11,2	0,00007
41	5,8	11,0	0,00007
42	5,9	10,9	0,00007
43	5,9	10,8	0,00007
44	6,0	10,7	0,00007
45	6,1	10,5	0,00007
46	6,1	10,4	0,00007
47	6,2	10,3	0,00007
48	6,3	10,2	0,00007
49	6,3	10,1	0,00006
50	6,4	10,0	0,00006

Sendo a perda total  $\Delta P = 0,08118 \text{ mm}$

Como essa tubulação se repete após os chips e está presente em todos os módulos (14 no total), o valor final considerado tem que ser 28x a perda acima.

Trecho 4:

Ao analisar a perda de carga quando a água escoar pelos microcanais, ocorrem algumas mudanças de parâmetros:

A vazão agora é a vazão de projeto nos microrreatores.

$f = \frac{56.91}{Re}$ , pois a seção do microcanal é quadrada e possui diâmetro hidráulico de 0,4mm.

A velocidade do escoamento é determinada pela equação 5 e o comprimento do microcanal é de 300mm.

Assim, é possível determinar Reynolds pela equação 12 e , através da Equação 14, a perda de carga total obtida foi  $\Delta P = 2,407 \text{ mm}$

Porém, como há 700 chips paralelizados no dispositivo, essa perda tem que ser multiplicada por esse fator, gerando uma perda de 1684,8 mm .

## 7.2 Nas tubulações de Álcool, Óleo e Biodiesel

Analogamente ao processo da seção anterior, foi feito o cálculo da perda de carga para o álcool, óleo e biodiesel.

Porém há um diferencial fundamental. Só há álcool e óleo nas tubulações de entrada, enquanto na saída , ambos os fluidos já reagiram e formaram biodiesel.

Assim, consideraremos tubulações individuais de álcool e óleo até os microchips. Já na microcanalização dos microreatores, consideraremos a coexistência desses líquidos ( a mistura ) durante um certo trecho e ,então, será considerado biodiesel no resto dos canais até a saída para o reservatório de separação dos produtos finais.

Assim, os cálculos seguem nas tabelas a seguir, da seguinte forma:

No escoamento de etanol, é necessário determinar ,como antes, o número de Reynolds e todas os parâmetros da equação 14. A viscosidade cinemática considerada para o etanol , a baseado no valor à temperatura de 15°C , foi de  $1,52 \text{ mm}^2 / \text{s}$  , o valor do diâmetro da tubulação no trecho1 será o mesmo do primeiro trecho( $i=1$ ) da "tubulação que antecede os módulos"( valor explicitado na Tabela 19) e a velocidade também será o dobro da encontrada na Tabela 19. Os outros parâmetros são os mesmo usados no cálculo da perda de carga do escoamento de água.

Assim, através das equações 12, 13 e ,finalmente, a 14 ,têm-se a perda de carga no trecho1 igual  $\Delta P_1 = 0,0913 \text{ mm}$ .

No trecho 2 , é necessário achar o número de Reynold e o fator de atrito para cada seção.

Os valores de área de cada seção estão na Tabela 19 e através da Equação 12 e 13, os valores do número de Reynolds e fator de atrito do trecho 2, para o escoamento de álcool estão presentes na Tabela 23.

Tabela 23: Re e f, no trecho 2 do escoamento de álcool

i	Reynolds	f circular
1	5,2	12,3
2	5,2	12,3
3	4,8	13,3
4	4,4	14,5
5	3,9	16,2
6	3,4	18,8
7	2,8	23,0

Sendo todos os outros parâmetros iguais aos já utilizados no escoamento de água, é possível determinar a perda de carga por seção do trecho 2, discriminada na Tabela 24

Tabela 24: Perda de carga no escoamento de álcool (trecho 2)

trecho 2	
i	Perda total(por seção) [mm]
7	0,0194
6	0,0112
5	0,0079
4	0,0061
3	0,0050
2	0,0042
1	0,0039

Para cálculo da perda de carga no trecho 3, serão utilizados os mesmos parâmetros, menos os diâmetros de cada seção, que serão provenientes de

Tabela 16. O número de Reynolds e o fator de atrito para cada seção i, está apontada na Tabela 25

Tabela 25: Perda de carga por seção , no trecho 3 do escoamento de álcool

l	reynolds	f circular	Perda (por seção) [mm]
1	0,279	229,786	0,046
2	0,394	162,483	0,023
3	0,482	132,667	0,015
4	0,557	114,893	0,011
5	0,623	102,763	0,009
6	0,682	93,810	0,008
7	0,737	86,851	0,007
8	0,788	81,242	0,006
9	0,836	76,595	0,005
10	0,881	72,665	0,005
11	0,924	69,283	0,004
12	0,965	66,333	0,004
13	1,004	63,731	0,004
14	1,042	61,413	0,003
15	1,079	59,330	0,003
16	1,114	57,446	0,003
17	1,148	55,731	0,003
18	1,182	54,161	0,003
19	1,214	52,717	0,002
20	1,246	51,382	0,002
21	1,276	50,143	0,002
22	1,306	48,991	0,002
23	1,336	47,914	0,002
24	1,364	46,905	0,002
25	1,393	45,957	0,002
26	1,420	45,065	0,002
27	1,447	44,222	0,002
28	1,474	43,425	0,002
29	1,500	42,670	0,002
30	1,526	41,953	0,002
31	1,551	41,271	0,001
32	1,576	40,621	0,001
33	1,600	40,001	0,001
34	1,624	39,408	0,001
35	1,648	38,841	0,001
36	1,671	38,298	0,001
37	1,694	37,777	0,001
38	1,717	37,276	0,001

l	reynolds	f circular	Perda (por seção) [mm]
39	1,739	36,795	0,001
40	1,762	36,332	0,001
41	1,783	35,887	0,001
42	1,805	35,457	0,001
43	1,826	35,042	0,001
44	1,847	34,642	0,001
45	1,868	34,254	0,001
46	1,889	33,880	0,001
47	1,909	33,518	0,001
48	1,930	33,167	0,001
49	1,950	32,827	0,001
50	1,969	32,497	0,001

E os parâmetros e perdas no trecho 4 são modificados pois a seção dos microrretores passa a ser quadrada (diâmetro hidráulico 0,4mm), a vazão é a de projeto (0,15mm<sup>3</sup>/s), a velocidade é 0,938 mm/s e o comprimento considerado será de 10 mm (comprimento de etanol no microcanal até o ponto de mistura dos reagentes).

Assim, a perda total em 1 chip (atentando para o fato de que o trecho 4 possui apenas 10 mm de comprimento, distância entre a entrada do microchip e o ponto de mistura) foi de 0,258mm.

Ao considerar o dispositivo por completo, são 700 chips, logo a perda é de 180,7797214 mm

Já no cálculo da perda de carga no escoamento de óleo de soja, obtivemos (considerando a viscosidade cinemática a 25°C, e as mesmas considerações feitas para o álcool e água - o dobro da velocidade encontrada na Tabela 18 e o mesmo diâmetro do maior diâmetro encontrado na Tabela 18 - e mantendo os outros parâmetros), através das equações 12, 13 e 14 têm-se a perda de carga no trecho 1 do escoamento de óleo de soja igual a 0,397mm.

Já no trecho 2, considerando as seções transversais obtidas pela Tabela 18 e mantendo-se os outros parâmetros, obtém-se os valores para Reynolds e fator de atrito mostrado na Tabela 26:

Tabela 26: Re e f no trecho 2 do escoamento de óleo de soja

i	Reynolds	f circular
1	0,18	353,24
2	0,17	381,54
3	0,15	417,96
4	0,14	467,29
5	0,12	539,58
6	0,10	660,85
7	0,07	934,58

Gerando , assim, a Tabela 27, com a perda de carga, por seção, neste trecho.

Tabela 27: Perda de carga no trecho2 do escoamento de óleo de soja

i	Perda total(por seção) [mm]
7	0,476770708
6	0,238385354
5	0,158923569
4	0,119192677
3	0,095354142
2	0,079461785
1	0,068110101

Analogamente ao já feito no trecho 3 do escoamento de água e álcool, e obtendo as seção de cada trecho da Tabela 15, os valores de Re , f e perda de carga estão mostrados na Tabela 28.

Tabela 28: Perda de carga no trecho 3 do escoamento de óleo de soja

i	reynolds	f circular	Perda (por seção) [mm]
1	0,010	6608,505	0,795
2	0,014	4672,919	0,397
3	0,017	3815,422	0,265
4	0,019	3304,252	0,199
5	0,022	2955,413	0,159
6	0,024	2697,911	0,132
7	0,026	2497,780	0,114
8	0,027	2336,459	0,099
9	0,029	2202,835	0,088
10	0,031	2089,793	0,079
11	0,032	1992,539	0,072

I	reynolds	f circular	Perda (por seção) [mm]
12	0,034	1907,711	0,066
13	0,035	1832,869	0,061
14	0,036	1766,197	0,057
15	0,038	1706,309	0,053
16	0,039	1652,126	0,050
17	0,040	1602,798	0,047
18	0,041	1557,640	0,044
19	0,042	1516,095	0,042
20	0,043	1477,707	0,040
21	0,044	1442,094	0,038
22	0,045	1408,938	0,036
23	0,046	1377,969	0,035
24	0,047	1348,955	0,033
25	0,048	1321,701	0,032
26	0,049	1296,034	0,031
27	0,050	1271,807	0,029
28	0,051	1248,890	0,028
29	0,052	1227,169	0,027
30	0,053	1206,542	0,026
31	0,054	1186,923	0,026
32	0,055	1168,230	0,025
33	0,056	1150,393	0,024
34	0,056	1133,349	0,023
35	0,057	1117,041	0,023
36	0,058	1101,417	0,022
37	0,059	1086,432	0,021
38	0,060	1072,041	0,021
39	0,060	1058,208	0,020
40	0,061	1044,896	0,020
41	0,062	1032,075	0,019
42	0,063	1019,714	0,019
43	0,064	1007,788	0,018
44	0,064	996,270	0,018
45	0,065	985,138	0,018
46	0,066	974,371	0,017
47	0,066	963,950	0,017
48	0,067	953,856	0,017
49	0,068	944,072	0,016
50	0,068	934,584	0,016

Analogamente ao já realizado para o trecho 4 do escoamento de álcool e de água:

Fazendo as mudanças para escoamento acontecendo dentro dos microcanais ( como no diâmetro hidráulico e no fator de atrito, devido à mudança para seção quadrada) e a perda total no trecho 4 ( que possui apenas 10mm até o ponto de mistura do reagentes), foi, então: 2,379 mm

Valor este que deve ser multiplicado por 700(número total de microreatores do dispositivo), encontrando ,então: 1665,076mm.

Agora, será exposta a análise de perda de carga durante o período de coexistência dos reagentes.

Quando os reagentes estão em processo de mistura porém ainda sem ter reagido ( momento do escoamento em que será aqui considerado que os reagentes coexistem), eles ocupam de maneira não igualitária o volume do microcanal. Mais precisamente, a fase de etanol pode ser considerada como ocupando 15% do espaço do canal enquanto 85% é ocupado pela fase de óleo, *Al-Dhubabian(2005)*.

Esta característica será utilizada para determinar a parcela da seção transversal ocupada por cada fluido e, assim, determinar suas velocidades de escoamento e ,só então, calcular a perda de carga neste trecho.

Outra mudança fundamental aos parâmetros deste escoamento ( onde os reagentes coexistem) é o fato de estarem aquecidos. Esse fato terá peso maior no escoamento de óleo de soja, pois sua viscosidade cinemática decrescerá de cerca de 30mm<sup>2</sup>/s para 18 mm<sup>2</sup>/s, o que contribui para redução da perda de carga.

Assim, a área ocupada pelo escoamento de etanol será de 15% da área do canal 0,16mm, enquanto a de óleo de soja será de 85% dessa área.

Os outros parâmetros todos se mantêm iguais aos usados no cálculo da perda de carga no trecho 4, para escoamento de álcool e óleo de soja, respectivamente, claro.

Também é crucial dizer que consideraremos esse escoamento ocorrendo em 10mm de microcanalização, gerando as seguintes perdas de carga:

Assim, seguindo os mesmo procedimento de cálculo para as perdas de cargas ( através do cálculo do número de Reynolds e do fator de atrito) e , por fim, da equação de Darcy-

Weisbach (Equação 13), os valores da perda de carga para os dois fluidos neste trecho estão Tabela 29.

Tabela 29: Perda de carga devido as fases de álcool e óleo de soja coexistindo

óleo - Perda total [mm]	Etanol - Perda total [mm]
2,798	1,722

A partir deste ponto, consideraremos o fluido presente como sendo biodiesel. Os parâmetros para o seu escoamento dentro dos canais dos microchips são divergentes dos utilizados no cálculo da perda de carga para os outros fluidos.

O cálculo da perda de carga será feito agora em ordem inversa, primeiramente no trecho 4, depois no trecho 3 e assim em diante..

Trecho 4:

Aqui, a vazão foi imposta como sendo a combinação da vazão dos reagentes(  $0,267\text{mm}^3/\text{s}$  ), visto que ambos agora escoam pelo mesmo microcanal. A velocidade é obtida pela divisão desta vazão pela área- seção quadrada- do microcanal( a mesma das outras seções,  $0,16\text{mm}^2$  ) ; A viscosidade do biodiesel considerada é de  $4,5\text{ mm}^2/\text{s}$ . E o comprimento deste trecho é o comprimento efetivo total dos microcanais (300 mm) menos o comprimento do trecho em que os reagentes coexistiam, logo, o comprimento final deste trecho é de 290mm.

O cálculo foi realizado , de novo, através das equações 12,15 e ,por fim, pela equação 13 (a equação de Darcy-Weisbach) . Assim, a perda total de carga em 1 microcanal é  $39,411\text{mm}$  , porém a perda total proveniente do escoamento de biodiesel nos microcanais do dispositivo é de  $27587,85\text{mm}$ .

Já na tubulação após a saída dos microchips, ao iniciar o trecho 3, a seção passa a ser circular, alterando a equação utilizada para cálculo do fator de atrito ( deixando de usar a equação 15 e passando a usar a equação 14) , e há também diferentes valores de  $Re$  e  $f$  para cada seção.

As áreas dessas seções pode ser retirada de qualquer tabela que retrate o perfil de variação das tubulações principais.Por exemplo, a partir dos diâmetros da

Tabela 16, será exposto na Tabela30, o valor de  $Re$  ,  $f$  e da perda de carga em cada trecho.

Tabela 30: Perda de carga no trecho3 do escoamento de biodiesel

l	reynolds	f circular	Perda (por seção) [mm]
1	0,17	382,84	0,24
2	0,24	270,71	0,12
3	0,29	221,04	0,08
4	0,33	191,42	0,06
5	0,37	171,21	0,05
6	0,41	156,30	0,04
7	0,44	144,70	0,03
8	0,47	135,36	0,03
9	0,50	127,61	0,03
10	0,53	121,07	0,02
11	0,55	115,43	0,02
12	0,58	110,52	0,02
13	0,60	106,18	0,02
14	0,63	102,32	0,02
15	0,65	98,85	0,02
16	0,67	95,71	0,02
17	0,69	92,85	0,01
18	0,71	90,24	0,01
19	0,73	87,83	0,01
20	0,75	85,61	0,01
21	0,77	83,54	0,01
22	0,78	81,62	0,01
23	0,80	79,83	0,01
24	0,82	78,15	0,01
25	0,84	76,57	0,01
26	0,85	75,08	0,01
27	0,87	73,68	0,01
28	0,88	72,35	0,01
29	0,90	71,09	0,01
30	0,92	69,90	0,01
31	0,93	68,76	0,01
32	0,95	67,68	0,01
33	0,96	66,64	0,01
34	0,97	65,66	0,01
35	0,99	64,71	0,01
36	1,00	63,81	0,01
l	reynolds	f circular	Perda (por seção) [mm]
37	1,02	62,94	0,01

38	1,03	62,11	0,01
39	1,04	61,30	0,01
40	1,06	60,53	0,01
41	1,07	59,79	0,01
42	1,08	59,07	0,01
43	1,10	58,38	0,01
44	1,11	57,72	0,01
45	1,12	57,07	0,01
46	1,13	56,45	0,01
47	1,15	55,84	0,01
48	1,16	55,26	0,01
49	1,17	54,69	0,00
50	1,18	54,14	0,00

Para o cálculo no trecho 2, as seções serão obtidas a partir da Tabela 20 e seguindo a mesma metodologia, a perda de carga em cada seção, assim como o número de Reynolds e o fator de atrito, estão apresentados na Tabela 31.

Tabela 31: Perda de carga, Reynolds e fator de atrito em cada seção do trecho2, no escoamento de biodiesel

I	Reynolds	F	Perda total(por seção) [mm]
7	1,182	54,142	0,144
6	1,672	38,284	0,072
5	2,047	31,259	0,048
4	2,364	27,071	0,036
3	2,643	24,213	0,029
2	2,895	22,104	0,024
1	3,127	20,464	0,021

Dessa maneira, está contabilizada toda a perda de carga devido ao escoamento simples ao longo de todas as tubulações, de acordo com o fluido que é bombeado em seu interior.

### 7.3 Perda de carga por acidentes

No nosso sistema, devemos considerar os seguintes acidentes : Válvulas globo para controle de vazão, restrições abruptas de seção, expansões abruptas de seção, joelhos de 90 graus e derivações de ângulo reto em relação à tubulação principal.

Assim , consideramos os seguintes fatores de perda de carga:

Válvulas Globo --  $K_f = 6$

Restrição abrupta de seção -  $K_f = 0,5 * (1 - \frac{D_{saí}^2}{D_{ent}^2})$

Expansão abrupta de seção - -  $K_f = (1 - \frac{D_{ent}^2}{D_{saí}^2})^2$

Joelho de 90 graus,canto vivo - -  $K_f = 1,5$

Derivação de ângulo reto em relação à tubulação principal - -  $K_f = 1$

Assim, com a equação  $\Delta E = K_f * \frac{V^2}{2}$  (Eq 16) para determinar a perda de energia e com

$\Delta E = \frac{\Delta P}{\rho} = 2 * f * L_e * \frac{V^2}{D}$  (eq 17) para determinar o comprimento equivalente,a perda de carga, por fluido devido aos acidentes foi calculada para todos os fluidos(incluindo o biodiesel) individualmente.

Ainda devemos, para encontrar a pressão total a ser fornecida pela bomba, considerar a altura a ser vencida.

Ao considerar a altura total do dispositivo como sendo 100 mm e lembrando que esta altura dever se superada duas vezes( pois tanto a injeção dos fluidos como sua retirada serão feitas pelo topo dos módulos), devemos acrescentar essa parcela (200mm) de perda ao resultado final.

Chegando assim ao total de perda de carga, em milímetros, para cada fluido:

Escoamento de água -  $h = 2085\text{mm}$

Escoamento de etanol -  $h = 1406,12\text{mm}$

Escoamento de Óleo de soja -  $h = 2211,9\text{mm}$

Escoamento de Biodiesel -  $h=27787,9 \text{ mm}$

E a queda de pressão relativa é :

$$h * \rho = \Delta P \quad (Eq 16)$$

Escoamento de água  $\Delta P = 20,9 \text{ KPa}$

Escoamento de etanol  $\Delta P = 11,2 \text{ KPa}$

Escoamento de óleo  $\Delta P = 19,5 \text{ KPa}$

Escoamento de biodiesel  $\Delta P = 236,2 \text{ KPa}$

#### 7.4 Bombas

Para o dimensionamento das bombas foi considerado o tipo de fluido, isso é, sua viscosidade, se há presença de sólidos em suspensão, se é corrosivo, entre outras propriedades. Logo, as bombas escolhidas têm de ser aptas a operar sem serem prejudicadas pelas propriedades particulares do fluido.

Outro fator importante pensado é a contínua operação do sistema, visto que o projeto visa a geração de biodiesel durante 24 horas ininterruptas.

Para uma bomba operando em pressão atmosférica, consideraremos uma circunstância de funcionamento hipotética de altura manométrica no ponto de entrada na bomba sendo 0. Dessa maneira, dimensionaremos a bomba a partir da altura manométrica do ponto de saída do escoamento somada a perda de carga.

Assim podemos fazer o cálculo da potência necessária à bomba de cada fluido, à partir das alturas manométricas encontradas ao fim da última seção:

$$P[CV] = h * \dot{m} * \rho \quad (Eq 17)$$

Sendo

$h = \text{Altura manométrica [m]}$

$$\dot{m} = \text{vazão } \left[ \frac{m^3}{h} \right]$$

$$\rho = \text{Massa específica } \left[ \frac{kg}{m^3} \right]$$

Assim,

$$P_{\text{água}} = \frac{2,085 * 3,8 * 10^{-4} * 1000}{270} = 3 * 10^{-3} CV$$

$$P_{\text{etanol}} = \frac{1,406 * 4,7 * 10^{-4} * 789}{270} = 2,0 * 10^{-3} CV$$

$$P_{\text{óleo}} = \frac{2,212 * 3,8 * 10^{-4} * 883}{270} = 2,3 * 10^{-3} CV$$

$$P_{\text{biodiesel}} = \frac{27,788 * 1,4 * 10^{-5} * 850}{270} = 1,3 * 10^{-3} CV$$

Supondo um rendimento médio ao longo do funcionamento de 70%, as bombas precisam ter potência superior a

$$P_{\text{água}} = \frac{3 * 10^{-3}}{0,7} CV = 4,286 * 10^{-3} CV$$

$$P_{\text{etanol}} = \frac{2,0 * 10^{-3}}{0,7} CV = 2,857 * 10^{-3} CV$$

$$P_{\text{óleo}} = \frac{2,3 * 10^{-3}}{0,7} CV = 3,286 * 10^{-3} CV$$

$$P_{\text{biodiesel}} = \frac{1,3 * 10^{-3}}{0,7} CV = 1,857 * 10^{-3} CV$$

Assim, os parâmetros mais variados para escolha das bombas do dispositivo foram determinados, sendo facilitada a sua escolha:

*Laser E Santiago (2004)* listaram microbombas com sua faixa de aplicação, facilitando o dimensionamento do sistemas de bombeamento que poderiam ser utilizados aqui.

Dessa maneira, há 2 maneiras de escolher as bombas: escolhendo 1 sistema de pressurização diferente para cada fluido ou escolhendo 1 bomba capaz de ser utilizada em todos os 3 fluidos e utilizar 3 unidades desta.

Aqui será determinado apenas 1 bomba, seguindo a segunda metodologia citada acima, por diversas razões. Além de tornar mais simples a fabricação e montagem do sistema ( visto que aquele que o faz, terá de encontrar fornecedores de apenas um único modelo de bomba), o custo desta em grande quantidade pode vir a ser menor ( economia de escala) . Outro fator importantíssimo que afetou esta escolha por 3 sistemas de bombeamento iguais foi a facilidade de substituição do componente em caso de falha ou deterioração depois de determinado tempo de uso - sendo possível, inclusive, o funcionamento do gerador com apenas 2 bombas (para o óleo e o álcool), em detrimento da utilização do sistema de escoamento de água. Isso teria por consequência uma menor taxa de conversão porém a geração de biodiesel não seria interrompida; Essa intercambialidade não seria possível caso o dispositivo utilizasse 1 bomba específica para cada fluido.

Por último, uma característica fundamental para que a escolha de apenas um modelo de bomba não seja extremamente ineficiente, é a capacidade de ajuste da bomba. Mesmo que não seja possível ajustar o componente para ele estar completamente otimizado em relação ao fluido que bombeia , é possível ajustar a velocidade de funcionamento de maneira a adaptar sua dinâmica de operação o máximo possível ao demandado pelo fluido.

Assim, o modelo de bomba escolhido foi o :

Bomba AKP 103-0,1-500 P-00 , do fabricante Bieri Hydac International é apresentada na Figura 56 e seu desenho técnico é apresentada na Figura 58.

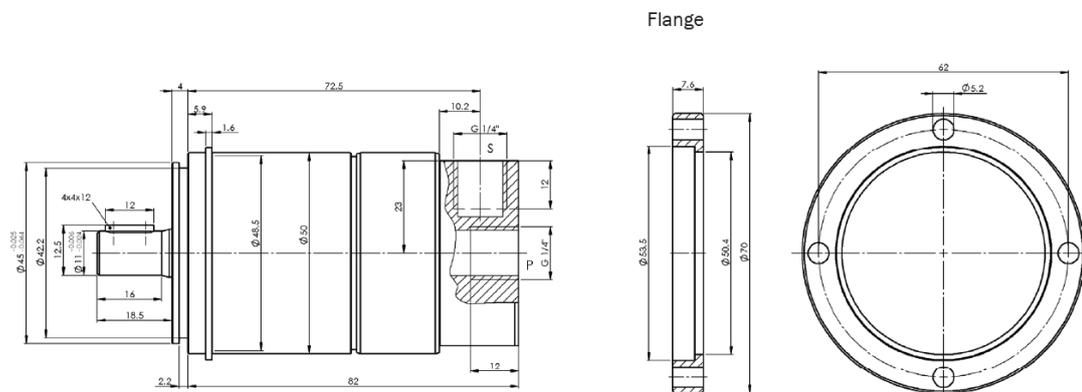


**Figura 56: Modelo de microbomba (DataSheet Bieri International)**

**Technical data**

Hydraulic fluid	Mineral oil according to DIN 51524 (other fluids on request)
Fluid temperature range	-30 to 80 °C
Ambient temperature range	-30 to 50 °C
Viscosity range	5 to 220 mm <sup>2</sup> /s (optimal: 15-35 mm <sup>2</sup> /s)
Max. operating pressure	500 bar
Filtration	According to NAS 1638 class 6 resp. ISO/DIN 4406 17/15/12
Weight	0.9 kg
Max. speed range	100-5000 min <sup>-1</sup>
Direction of rotation	any
Installation position	According mounting drawing
Material	Housing: aluminium anodised Pump head: steel blued

**Figura 57: Informações técnicas da bomba (DataSheet Bieri International)**



**Figura 58: Desenho técnico microbomba (DataSheet Bieri International)**

Este modelo tem grande flexibilidade de operação, tendo uma ampla faixa de temperaturas de bombeamento e de temperatura ambiente suportada.

Sua faixa de funcionamento ótimo, em relação a viscosidade cinemática do fluido de bombeamento é de 15 a  $35 \frac{mm^2}{s}$ , porém suporta viscosidades ainda maiores.

A diferença de pressão que este sistema consegue suprir chega a 50000KPa.

Sua velocidade de operação pode variar de 100 a 5000/min( 1,67 Hz a 83,3 Hz).

Seu peso é de 0,9Kg.

É válido ressaltar que a bomba foi escolhida sob a ótica da capacidade de adaptação ao sistema e aos diferentes fluidos/condições de bombeamento dos microrreatores. Por isso, é utilizada neste projeto uma bomba de pistão axial, que normalmente é utilizada para sistemas de alta pressão- porém não é o caso específico deste microrreator-.

Outra vantagem desse fabricante é a possibilidade de mudança dos materiais de que a bomba é feita, caso seja de interesse do comprador.

## **8 CONCLUSÃO E SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS**

Este trabalho discorreu sobre as diferentes etapas do processo de projeto de uma sistema capaz de sintetizar biodiesel continuamente pela paralelização de microreatores, desde o perfil da microcanais dos microchips, sua disposição espacial, a dimensionalização dos dutos de escoamento dos fluidos do sistema, até o sistema de bombeamento.

Os microchips foram projetados a partir de otimizações dos utilizados por CHEN(2012) e acrescentados de microcanais de água aquecida para que, através da transferência de calor, elevem a temperatura da síntese a uma temperatura o mais próxima possível daquela capaz de levar à máxima taxa de conversão.

A disposição dos microrreatores, separados em grupamentos de diferentes tamanhos, foi projetada visando simplificar o processo de montagem e de futuros momentos de manutenção do dispositivo, além de ter por objetivo dar ao gerador uma configuração que facilite o processo de selagem. Outra vantagem obtida pela separação dos chips em módulos e macromódulos foi a redução da perda de carga, que atingiu menores índices devido ao fato de permitir tubulações com menores comprimentos e menos acidentes.

Um estudo do consumo energético de uma casa potencialmente abastecida pela eletricidade proveniente do biodiesel aqui gerado, assim como o custo dessa energia e do grupo gerador capaz de fornecê-la (além de um estudo comparativo entre o biodiesel e o diesel fóssil, que se mostrou necessário para se ter um parâmetro mais real da capacidade de geração energética do biocombustível) também foi descrito ao longo do escopo deste projeto.

### **8.1 Sugestões de trabalhos futuros**

É fundamental a continuidade do desenvolvimento da metodologia utilizada para fabricação destes microreatores. A tecnologia acerca de máquinas capazes de gerar continuamente biodiesel, em quantidade significativa, através de microrreatores paralelizados é ainda prematura - há poucos trabalhos desenvolvidos e patentes registradas, como em Billo et al (2014) e Jovanovic(2009)- , e pode ser aprimorada para, por exemplo, gerar cada vez maiores quantidades de biodiesel, ter maior velocidade de reação, possuir maior compactação dos

microreatores, permitir maior controle do processo (maior aquisição e tratamento de dados), atribuir melhor qualidade dos produtos gerados, desperdiçar menor volume de reagentes, etc.

Abaixo estão apenas algumas melhorias que foram analisadas um pouco mais profundamente para este projeto, porém que não foram aplicados por tornar o projeto de mais difícil montagem e fabricação ( a utilização de chapas finas exigiria ferramentas de usinagem mais precisas e que demandam experiência do operador para que o trabalho possua acurácia), e mais longo(principalmente devido ao item que aborda os catalisadores enzimáticos, que exigem tempo para que a cultura de enzimas esteja apta a ser usada), o que foge ao escopo de trabalho definido, principalmente considerando o seu uso em áreas remotas e sem grande infra-estrutura(o que dificultaria a manutenção, a reposição, a garantia de integridade física e outras características dos itens que serão citados a seguir).

### **8.1.1 Catalisador Enzimáticos**

Rodrigues(2009) mostrou diferentes estudos sobre reações utilizando catalisadores enzimáticos imobilizados, ressaltando suas vantagens e aspectos de maior complexidade inerentes ao trabalho com enzimas. Mostrou, por exemplo, trazem inúmeras vantagens ao processo de síntese de biodiesel quando comparados com a reação através de catalisadores químicos. E que suas principais vantagens são a redução das etapas de purificação dos produtos gerados na síntese, o que também tem por consequência a produção de compostos mais puros ( de maior qualidade), e o fato de que enzimas imobilizadas têm uma capacidade maior de serem reutilizadas.

A síntese de biodiesel por catálise enzimática tem sua conversão dependente de diversos parâmetros, como a origem da enzima, a quantidade utilizada, a quantidade de água presente no processo, a temperatura em que ocorre a síntese e a taxa de reutilização dessas enzimas. Elas podem ter origem vegetal, microbiana ou animal, tendo todas estas propriedades e características particulares. Já a quantidade utilizada tem uma relação direta com a velocidade da reação, como é de se imaginar, logo, quanto mais enzimas são utilizadas, mais rápido será (porém possuindo um limite superior para este processo). No que tange a quantidade de água do processo, é necessário uma taxa ótima de presença de moléculas de H<sub>2</sub>O, pois as enzimas atuam na interface da fase aquosa com o óleo (tornando sua presença obrigatória), porém

quando há partículas de água em excesso, elas se agregam às enzimas, o que reduz sua atividade e eficiência.

O uso de catalisadores enzimáticos também reduzem a temperatura que otimiza a reação. Enquanto a temperatura ótima de síntese quando na presença de catalisadores químicos está em cerca de 60°C, na presença de enzimas, essa temperatura cai para cerca de 30°C.

Por fim, um parâmetro que é de enorme vantagem, dentre outros aspectos, para o custo do processo é a taxa de reutilização das enzimas. A eficiência destas a cada vez que são reutilizadas deve ser analisada caso a caso e não é possível pré estabelecer esse comportamento, porém é uma característica do processo que a separação das enzimas dos produtos (viabilizando seu reuso) se dá por simples decantação, o que configura outra vantagem por sua simplicidade de tratamento.

As desvantagens da catálise enzimática são o seu maior custo de obtenção (são muito mais caras que catalisadores químicos, como o hidróxido de sódio, por exemplo) e sua dificuldade de manuseio (Gamba, 2009). O processo de criação da cultura de enzimas é mais delicado, complexo, e requer uma maior dedicação e conhecimento específico, além de levar mais tempo para levar a atingir um estágio ótimo para que esta seja utilizada.

### **8.1.2 Sensores de Vazão**

Mielli (2012) mostrou todas as etapas de desenvolvimento e fabricação de sensores para sistemas microfluídicos, além de apontar áreas de aprimoramento em trabalhos futuros.

Sensores de vazão para microcanais são uma área onde as tecnologias ainda imaturas, porém já há sensores, como em Mielli (2012), que possibilitam a monitoração, aquisição e tratamento dos dados acerca do escoamento em microssistemas.

Esse tipo de monitoramento é de fundamental importância para o passo futuro de levar a síntese de biodiesel em microreatores a escalas industriais, onde o nível de exigência para com a qualidade dos produtos do processo é extremamente severo. Assim, esse padrão só pode ser mantido através do rígido controle dos parâmetros do processo.

Para o caso dos microreatores portáteis, os sensores são capazes de detectar uma obstrução de alguma canalização, o que potencialmente pode prejudicar a eficiência do dispositivo.

As desvantagens são o peso, que aumentará devido a adição das estruturas do sensor ao sistema, além da dificuldade de acoplamento de toda a aparelhagem de aquisição e tratamento de dados necessária para seu funcionamento.

### **8.1.3 Chapas Finas**

A utilização de chapas extremamente finas contribuirão para maior compactação do volume do sistema e para sua eficiência, visto que chapas com menores espessuras obrigatoriamente levam a menores dimensões de microcanais, o que aumenta a relação área volume e eleva as taxas de conversão atingidas pelo sistema.

Hoje são comercializadas, no Rio de Janeiro, em diferentes fornecedores, como a *RioInox* e a *Elinox*, e, conseqüentemente, facilmente encontradas chapas com espessuras que chegam a 0,4mm.

As dificuldades de se trabalhar com essas chapas são inúmeras, como a necessidade de ter máquinas de microssinagem capazes de operar em placas de tal espessura, por exemplo.

Outro aspecto negativo é a maior complexidade do processo de selagem de microreatores feitos com essas chapas, devido a sua inevitável maior flexibilidade e capacidade de deformação.

### **8.1.4 Otimização da face do trocador de calor**

A face do trocador de calor tem papel de fundamental importância na manutenção da temperatura média em que a reação de biodiesel ocorre. Dessa forma, o perfil dos microcanais ao longo do microchip, assim como a seção transversal destes microcanais, podem ser estudados e modelados de forma a otimizar a troca de calor e garantir que a temperatura desejada para a reação seja instalada na maior parcela possível do microchip.

Assim como foi feito neste trabalho para a Tubulação Principal e para a Tubulação antecedente aos módulos (trechos de dutos onde era necessário que houvesse a mesma vazão de saída em todas as ramificações), o projeto do número e do design dos canais do trocador também deve visar a igual vazão escoando em todas as suas possíveis divisões.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AL-DHUBABIAN,AHMAD (2005) - Production of Biodiesel from Soybean Oil in a Macro Scale Reactor.

BILLO RE, et al. "A cellular manufacturing process for a full-scale biodiesel microreactor" , Journal of manufacturing systems (2014)

BOUROUINA,T.;GRANDCHAMP,J.P., "Modeling micropumps with electrical equivalent networks",Journal of micromechanics and microengineering, 6 (1996) ,pp.198-404.

BROCK et al. "Determinação experimental da viscosidade e condutividade térmica de óleos vegetais "- Ciênc.Tecnol.Aliment., Campinas,28(3)pp.564-570,jul.-set 2008

CHEN, KELVIN, 2012 - Fabricação por fotolitografia e análise de microreatores para síntese de biodiesel .Projeto de Graduação - UFRJ / Escola politécnica / Departamento de Engenharia Mecânica , Rio de Janeiro,RJ,Brasil.

COLOMBO,K;BARRO,A.A.C.-"Utilização de catalisadores heterogêneos na produção de Biodiesel" , Evidência, Joçaba v.9 n.1-2,p.7-16, janeiro/dezembro 2009.

COSTA JUNIOR, JOSÉ MARTIM, 2012 – Fabricação por fotolitografia e análise teórico-experimental de micromisturadores por transformação integral e termografia por infravermelho. Dissertação de mestrado – UFRJ/COPPE/Programa de Engenharia Mecânica,Rio de Janeiro,RJ,Brasil.

GAMBA,M., 2009, Produção de biodiesel através de catálise enzimática em líquido iônico. Dissertação de mestrado - UFRGS/Programa de pós-graduação em química,Porto Alegre,RS,Brasil.

JOVANOVIC,G.N.; PAUL, B.K., PARKER, J., AL-DHUBABIAN, A.,United States Patent Application, Jul. 2, 2009; US 2009/0165366 A1.

LASER, D.J.; SANTIAGO,J.G., 2004 "A review of micropumps" , Journal of Micromechanics and Microengineering,14,R35-R64 Abril

LIU,C.H., et al.,2012, "Biodiesel productionby enzymatic transesterification catalyzed by Burkholderia lipase immobilized on hydrophobic magnetic particles", Applied Energy,100,pp.41-46.

LÔBO et al, 2009, "Biodiesel : Parâmetros de qualidade e métodos analíticos" , Quim.Nova,Vol.32,No.6,1596-1608, Julho

MAIWENN KERSAUDY-KHEROAS, 2010, Design, test and biological validation of microfluidic systems for blood plasma separation - Degree of Doctor of Philosophy Dissertation -Heriot-Watt University - School of Engineering and Physical Sciences

MIELLI, M.Z., 2012, Sensor de vazão para aplicação em sistemas microfluídicos. Dissertação de Mestrado - USP/Escola Politécnica/Dept.de Engenharia de Sistemas Eletrônicos/São Paulo/SP/Brasil

OZISIK, M.N., Heat transfer: a basic approach , International Edition , Singapore,McGraw-Hill, 1985

PERBONI,A., 2012, Modelo para determinar perda de carga em tubos emissores. Dissertação de mestrado - USP/Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"/Piracicaba/SP/Brasil.

PUQUEVICZ et al., 2008, "Análise comparativa da utilização de diesel e biodiesel no funcionamento de um grupo gerador" , Da Vinci, Curitiba, v.5,n.1, pp.179-195..

RODRIGUES, R.C., 2009, Síntese de biodiesel através de transesterificação enzimática de óleos vegetais catalisada por lipase imobilizada por ligação covalente multipontual. Dissertação de Doutorado - UFRGS/Programa de pós-graduação em engenharia química/Porto Alegre/RS/Brasil

SALIC.A.; ZELIC,B., 2011, "Microreactors -Portable factories for biodiesel fuel production", Goriva i maziva,50,2:pp.85-110.

WU, S. et al. "MEMS flow sensors for nano-fluidic applications" , Sensors and actuators A89(2001) pp.152-158.