UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

TESE DE DOUTORADO

OTIMIZAÇÃO GEOMÉTRICA MULTIOBJETIVO DE UM CONCENTRADOR HÍBRIDO DO TIPO DISCO PARABÓLICO

Autor: Alex Anderson Calbino da Silva

Itajubá, agosto de 2024 MG - Brasil

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Autor: Alex Anderson Calbino da Silva

OTIMIZAÇÃO GEOMÉTRICA MULTIOBJETIVO DE UM CONCENTRADOR HÍBRIDO DO TIPO DISCO PARABÓLICO

Submetido ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Mecânica da Universidade Federal de Itajubá como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em ciência em Engenharia Mecânica.

Área de Concentração: Térmica, Fluidos e Máquinas de Fluxo.

Orientador: Prof. Dr. Osvaldo José Venturini **Coorientador:** Prof. Dr. Ramiro G. Ramirez Camacho

Itajubá, agosto de 2024 MG - Brasil

COMPOSIÇÃO DA BANCA EXAMINADORA

Orientador: Prof. Dr. Osvaldo José Venturini UNIFEI, Itajubá (Brasil - Minas Gerais)

Co-orientador: Prof. Dr. Ramiro Gustavo Ramirez Camacho UNIFEI, Itajubá (Brasil - Minas Gerais)

Membro da banca: Prof. Dr. Cleverson Bringhenti ITA, São José dos Campos (Brasil - São Paulo)

Membro da banca: Prof. Dr. Gaylord Enrique Carrillo Caballero UTB, Cartagena (Colômbia - Bolivar)

Membro da banca: Prof. Dr. Waldir de Oliveira UNIFEI, Itajubá (Brasil - Minas Gerais)

Membro da banca: Prof. Jose Carlos Escobar Palacio UNIFEI, Itajubá (Brasil - Minas Gerais)

Membro da banca: Prof. Dr. Ruben Alexis Miranda Carrillo UNIFEI, Itabira (Brasil - Minas Gerais)

DEDICATÓRIA

Dedico esta tese aos meus avós (in memoriam), meus pais, minha esposa e meu filho.

AGRADECIMENTOS

Á Deus, por me iluminar e guiar no desenvolvimento desta tese.

Aos meus pais José Francisco e Maria Auxiliadora, meus grandes professores que sempre me ensinaram com maestria através do exemplo, os valores éticos, morais e religiosos que sempre nortearam minha vida pessoal e profissional.

Á minha esposa Lucimara, minha grande companheira, presente ao meu lado durante minha graduação, no exercício de minha profissão de engenheiro, durante o mestrado e doutorado, sempre me acompanhando nos desafios e conquistas de minha vida acadêmica e profissional.

Ao filho João Gabriel, meu companheirinho e grande entusiasta do título de doutor, que sempre esteve ao meu lado demonstrando seu grande apoio.

A minha família, que de maneira direta ou indireta, contribuiu ao desenvolvimento desta tese.

Ao meu orientador, o Prof. Dr. Osvaldo José Venturini pelos ensinamentos, apoio, colaboração, disposição, disponibilidade, confiança e orientação ao longo do desenvolvimento desta tese.

Ao meu co-orientador, o Prof. Dr. Ramiro Gustavo Ramirez Camacho, pelos ensinamentos, apoio, colaboração, disposição, disponibilidade, confiança e orientação ao longo do desenvolvimento desta tese.

Aos professores participantes da banca examinadora, primeiramente pelo interesse, confiança e disponibilidade ao compor esta banca de doutorado. Agradeço pelas críticas e contribuições estabelecidas a esta tese.

Aos professores do programa de pós-graduação em engenharia mecânica da Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI), que de forma direta e/ou indireta tiveram participação no desenvolvimento desta tese.

A Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI), instituição de ensino superior a qual me concedeu os títulos de engenheiro mecânico, mestre e doutor em ciência em engenharia mecânica.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo auxílio financeiro durante o desenvolvimento desta tese de doutorado.

EPÍGRAFE

"Revelemo-nos mais por atos do que por palavras"

Theodomiro Carneiro Santiago

SILVA, A. A. C. (2024) - OTIMIZAÇÃO GEOMÉTRICA MULTIOBJETIVO DE UM CONCENTRADOR HÍBRIDO DO TIPO DISCO PARABÓLICO

RESUMO

Os sistemas Dish-Stirling são comumente instalados em locais geograficamente remotos, sendo sujeitos a frequente incidência de ventos. Esta condição de contorno fomentou a proposta de hibridização de sistemas Dish-Stirling fundamentada no aproveitamento da energia eólica para a geração de eletricidade. Esta proposta oportunizou o desenvolvimento do concentrador híbrido do tipo disco parabólico, o qual promove concentração solar e, sob disponibilidade eólica, geração de torque.

O concentrador híbrido do tipo disco parabólico foi projetado e o sistema de conversão de energia solar eólico oriundo da hibridização proposta modelado, sendo ambos extensivamente analisados. Estudos subsequentes demonstraram que a maximização da geração de eletricidade do sistema hibridizado proposto seria obtida através da otimização geométrica multiobjetivo do concentrador híbrido. Deste modo, o presente estudo propôs uma metodologia para a realização desta otimização fundamentada no estudo parametrizado de variáveis geométricas de projeto do concentrador híbrido. A metodologia proposta é composta por operações parametrizadas de geração de geometrias, malhas e CFD. Estas operações são definidas pelo DOE para a obtenção da superfície de resposta que posteriormente é otimizada pela aplicação do algoritmo MOGA.

A otimização do concentrador híbrido resultou no aumento da geração anual de eletricidade do sistema híbrido proposto em aproximadamente 25% e 1 [MWh]. A maximização da geração anual de eletricidade promoveu igualmente redução percentual de seu LCOE em cerca de 17%. A análise comparativa entre o LCOE do sistema híbrido otimizado e de dois sistemas análogos (Dish-Stirling tradicional e Dish-Stirling associado a turbina eólica) demonstra a efetividade da otimização, obtendo um sistema que apresenta LCOE significativamente menor que os demais sistemas analisados.

Este estudo propôs uma metodologia válida para aplicações semelhantes envolvendo análises parametrizadas e otimização de turbinas eólicas de eixo horizontal e sistemas Dish-Stirling.A parametrização desenvolvida consiste no elemento notório da metodologia proposta, sobretudo pela aplicação de uma nova abordagem da teoria do momento do elemento de pá (BEM).

PALAVRAS-CHAVE: Dish-Stirling, projeto de pás eólicas, hibridização, CFD e otimização.

SILVA, A. A. C. (2024) - GEOMETRIC MULTI-OBJECTIVE OPTIMIZATION OF A HYBRID DISH CONCENTRATOR

ABSTRACT

Dish-Stirling systems are commonly installed in geographically remote and isolated locations, often receiving incident winds. This boundary condition encouraged the proposal for hybridization of Dish-Stirling systems based on the harnessing wind energy to generate electricity. This proposal fomented the development of the hybrid dish concentrator, which consists of an innovative concept that performs solar concentration and, under wind availability, torque generation.

The hybrid dish concentrator was designed and the proposed hybridized system was modeled, both being extensively analyzed. Subsequent studies concluded that maximizing electricity generation of the proposed hybridized system would be achieved through multiobjective geometric optimization of the hybrid concentrator. Therefore, this study proposed a methodology for carrying out an optimization based on parameterized geometric analysis of the hybrid concentrator. The proposed methodology consist of the parameterized generation of geometries, meshes and CFD, which are defined by the DOE to obtain the response surface that will be optimized by the MOGA algorithm.

The optimization of the hybrid concentrator resulted in an increase in the annual electricity generation of the proposed hybrid system by around 25% and 1 [MWh]. Maximizing annual electricity generation also resulted a reduction in its LCOE of around 17%. The comparative analysis based on LCOE of the optimized hybrid system and two analogous systems (Dish-Stirling and Dish-Stirling associated with a wind turbine) demonstrates that the optimization achieved its purpose, obtaining a system with an LCOE much lower than the other systems analyzed.

This study proposed a suitable methodology for parameterized analyzes and optimization of horizontal axis wind turbines and Dish-Stirling systems. Parameterization is the highlight of the proposed methodology, mainly due to the new approach for blade element moment theory (BEM).

KEY WORDS: Dish-Stirling, wind blade design, hybridization, CFD e optimization.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 -	Sistemas Dish-Stirling	.5
Figura 2.2 -	· Principais componentes de sistemas Dish-Stirling	.5
Figura 2.3 -	· Estrutura (a) e refletor (b) de concentradores solares do tipo disco parabólico	. 8
Figura 2.4 -	· Sistema Dish-Stirling em operação (a) e na posição "stow" (b)	.9
Figura 2.5 -	· Sistema híbrido CSCWA (a) e seu desenho esquemático (b)	11
Figura 2.6 -	· Modelo conceitual do concentrador híbrido (a) e seus componentes (b)	12
Figura 2.7 -	· Sistema Dish-Stirling (a) e sistema hibridizado (b)	13
Figura 2.8 -	Modelo conceitual do sistema híbrido (a) (b) e sistema Dish-Stirling (c)	13
Figura 2.9 -	Conjunto estrutural / rastreamento (a) e conjunto geração de eletricidade (b)	14
Figura 2.10	- Vista explodida do conjunto geração de eletricidade	14
Figura 2.11	- Subconjunto dinâmico (a) e subconjunto estático (b)	15
Figura 2.12	- Vista frontal (a) lateral (b) e isométrica (c) do concentrador híbrido	16
Figura 2.12	- Diagramas de comportamento do concentrador híbrido	17
Figura 2.13	- Análise de sensibilidade (LCOE vs investimentos)	18
Figura 2.15	- Turbina eólica pá elemento de pá e velocidade tangencial avial e angular	20
Figura 2.15	- Triôngulo de velocidades associado ao elemento de pá	20 20
Figura 3.1	Integração entre softwares no Ansys Workbanch estabelecida a otimização	22
Figure 2.7	Eluvo astruturado no Ansys Workbanch para a realização da atimização)/ 20
Figure 2.2	Concentradores hibrides projetados em ângulos de surveture 22%(s) a 20%(h)	20 4つ
Figura 5.5 -	Concentradores hibridos projetados em angulos de curvatura 22 (a) e 50 (b)2	+∠ 1 /
Figura 5.4 -	Concentradores moridos espectificados sob razao de cubo de $0,2$ (a) e $0,5$ (b) 2	+4 10
Figura 3.3 -	Seção periodica aplicada ao estudo de otimização	+ð 10
Figura 3.6 - Σ^{-1}	Seções periodicas geral (a) e periodica rotativa (b) (c)	+ð 50
Figura 3.7 -	Mainas: seção periodica (a) (b), dominios periodicos geral (c) e rotativos (d)	50 5 1
Figura 3.8 -	• Malha adjacente a parede da pa eolica) I 7 1
Figura 3.9 -	· Distribuição de Y' no intradorso (a) e extradorso (b) da pa eolica	>1 ~~
Figura 3.10	- Seção periodica - entrada, saida e borda	>3 70
Figura 3.11	- Condição de contorno requerida a geração hibrida no rastreamento solar	<u>9</u> ر
Figura 3.12	- Carta solar (a), rosas dos ventos (b) e sobreposição de ambas (c) para Aracati. (50 60
Figura 3.13	- Alinhamento (a) e desalinhamento (b) (c); direção do vento e concentrador6	50
Figura 3.14	- Curvas de coeficiente de potência para ângulos de incidência do vento	51
Figura 3.15	- Diagrama do coeficiente de potência vs variação angular do eixo de elevação. (53
Figura 3.16	- Malha (a) e direção/sentido de incidência dos ventos no domínio geral (b)	54
Figura 3.17	- Fluxo estruturado à otimização e fluxo intrínseco ao DesignXplorer	56
Figura 3.18	- Fluxo estabelecido entre o DOE e a simulação numérica parametrizada	58
figura 3.19	- fluxograma da metodologia proposta a otimização do concentrador híbrido?	73
Figura 3.20	- Curvas características de (<i>C</i> _P) vs (λ) para os modelos de rotores eólicos	74
Figura 3.21	- Curvas características de (T) vs (n) para cada (U_{∞}) e curva (P_{max})	75
Figura 3.22	- Curvas características de (C_P) vs (n) para cada (U_{∞})	76
Figura 3.23	- Sistemas de conversão de energia aplicados a análise econômica.	77
Figura 4.1 -	Campo de velocidades omitindo o conjunto receptor8	30
Figura 4.2 -	Campo de velocidades após implementação do conjunto receptor	31
Figura 4.3 -	Reflexão solar e região de sombreamento no refletor central	32
Figura 4.4 -	· Campo de velocidades: concentrador híbrido com abertura no refletor central 8	33
Figura 4.5 -	Projeto inicial do anel externo; campo de velocidades (a) pressão estática (b)8	34
Figura 4.6 -	Concentrador híbrido e seu anel externo; projetos inicial (a) e revisado (b)	34
Figura 4.7 -	Anel externo revisado - campo de velocidades (a) pressão estática (b)	35
Figura 4.8 -	Novo conjunto suporte (a) e sua montagem no concentrador híbrido (b)	36
Figura 4.9 -	Campo de velocidades: concentrador e novo conjunto suporte (modelo inicial).	37

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Premissas de projeto concernentes as fontes de energia renováveis	39
Tabela 3.2 - Projeto das pás eólicas; ângulo de ataque, coeficientes de sustentação e arra	ısto 41
Tabela 3.3 - Parâmetros / configurações de discretização espacial aplicados ao CFD	53
Tabela 3.4 - Fatores, constantes e coeficientes aplicados ao dimensionamento térmico	56
Tabela 3.5 - Coeficientes de convecção	59
Tabela 3.6 - Configurações intrínsecas aos AGs aplicadas a otimização	72
Tabela 4.1 - Resultados referentes ao CFD, eficiências e potências gerados no DOE	89
Tabela 4.2 - Resultados gerados pelo DOE para a geração anual de eletricidade	90
Tabela 4.3 - Erro máximo entre DOE e RSM, refinamento e tolerâncias aplicadas	91
Tabela 4.4 - Avaliação de qualidade do ajuste entre RSM e DOE	91
Tabela 4.5 - Geração anual de eletricidade do sistema híbrido no ponto de projeto revisa	do103
Tabela 4.6 - Otimização da geração de eletricidade do sistema híbrido	103
Tabela 4.7 - Análise comparativa de (GAESH) entre o projeto revisado e o otimizado	105
Tabela 4.8 - LCOE do sistema composto por concentrador no projeto inicial revisado	105
Tabela 4.9 - Análise econômica comparativa - Sistema híbrido otimizado e seus análogo	os.105

LISTA DE SÍMBOLOS

LETRAS LATINAS

а	Fator de indução axial	
<i>a</i> ′	Fator de indução tangencial	
A_C	Área do concentrador	[m ²]
A_{PL}	Área projetada das lacunas	[m ²]
A_V	Área varrida pelas pás do concentrador híbrido	[m ²]
b	Número de elementos de pá	
b_s	Número de elementos de pá aplicados à solidez do concentrador híbrido	
С	Corda do perfil aerodinâmico	[m]
Cr	Corda do perfil aerodinâmico inerente ao elemento de pá	[m]
C_D	Coeficiente de arrasto	
C_G	Razão de concentração geométrica	
C_L	Coeficiente de sustentação	
C_P	Coeficiente de potência	
C _{Pmáx}	Coeficiente de potência máximo	
CPm%	Coeficiente de potência percentual médio	[%]
Срмт	Coeficiente de potência máximo teórico	
CRF	fator de recuperação do capital	[%]
D_{ai}	Diâmetro do anel interno do concentrador híbrido tipo disco parabólico	[m]
D_C	Diâmetro do concentrador tipo disco parabólico	[m]
DCC	Custo capital direto	[U\$]
D_e	Diâmetro externo do concentrador	[m]
D_i	Diâmetro interno do concentrador	[m]
Dic	Diâmetro interno do concentrador corrigido	[m]
DNI	Irradiação normal direta	[kWh/m ²]
DNID	Irradiação normal direta média diária	[kWh/m ² dia]
DNIdis	Irradiação normal direta média diária inerente ao período de insolação	[kWh/m ² dia]
D_R	Diâmetro do receptor	[m]
f	Distância focal	[m]
F_E	Fator de estrangulamento	
F_{CE}	Fator de capacidade eólico	

FCR	Taxas fixas	[%]
F_D	Fator de deterioração	
F_R	Fator de resfriamento	
Fs	Fator de sombreamento	
g	Aceleração da gravidade	$[m/s^2]$
G_{AE}	Geração anual de eletricidade	[MWh\ano]
GAEE	Geração anual de eletricidade - conversão de energia eólica	[MWh\ano]
Gaeeh	Geração anual de eletricidade - conversão de energia eólica híbrida	[MWh\ano]
GAES	Geração anual de eletricidade - conversão de energia solar	[MWh\ano]
Gaesh	Geração anual de eletricidade do sistema híbrido	[MWh\ano]
h	Altura das lacunas	[m]
h_F	Coeficiente de convecção forçada	$[W/m^2K]$
hG	Coeficiente de convecção global	$[W/m^2K]$
h_N	Coeficiente de convecção natural	$[W/m^2K]$
Н	Altura de energia	[m]
H_R	Altura R	[m]
H_Z	Altura Z	[m]
Ι	Irradiância solar média anual	$[kW/m^2]$
I_D	Irradiância solar média diária	$[kW/m^2]$
Idis	Irradiância solar média diária restrita ao período de insolação	$[kW/m^2]$
I_H	Irradiância solar média horária	$[kW/m^2]$
Ihis	Irradiância solar média horária restrita ao período de insolação	$[kW/m^2]$
ICC	Custo capital indireto	[U\$]
i	Taxa de juros	[%]
l	Largura das lacunas	[m]
п	Velocidade angular	[rpm/rps]
n qA	Rotação específica	
N	Vida útil dos equipamentos	[anos]
Npá	Número de pás do concentrador	
Npá_p	Número de pás de projeto do concentrador	
Nlac	Número de lacunas do concentrador híbrido	
Nper	Número de elementos periódicos aplicados ao CFD	
Katt	Constante de atenuação	

xiii

K_S	Constante Stirling	
Q	Vazão de ar que atravessa o concentrador híbrido	$[m^3/s]$
p	Pressão	[Pa]
P_E	Potência de eixo	[kW]
P_{EC}	Potência de eixo desenvolvida pelo concentrador híbrido	[kW]
P_{ED}	Potência eólica disponível	[kW]
P_{EDC}	Potência eólica disponível ao concentrador híbrido	[kW]
P_{ELS}	Potência elétrica líquida gerada pelo sistema Dish-Stirling	[kW]
PEmáx	Potência de eixo máxima	[kW]
P_{SD}	Potência solar disponível ao concentrador	[kW]
$P_{ heta}$	Potência desenvolvida pelo concentrador híbrido em função de seu	
	ângulo de elevação	[kW]
R	Raio das pás eólicas	[m]
Re	Número de Reynolds	
r	Raio do elemento de pá	[m]
Sij	Taxas de deformação	
Т	Temperatura	[K]
t	Tempo	[s]
T_A	Temperatura ambiente	[K]
T_C	Torque desenvolvido pelo concentrador híbrido	[N m]
TCC	Custo de investimentos	[U\$]
TCCe	Custo específico de investimentos	[U\$/kW]
Tdir	Período de irradiação solar médio diário	[h/dia]
TDIS	Período médio diário de insolação	[h/dia]
T_E	Período anual de geração de eletricidade inerente a conversão	
	autônoma de energia eólica	[h]
T_{EH}	Período de geração híbrida anual de eletricidade pela conversão de energia	
	eólica	[h]
T_{EP}	Torque desenvolvido pelo elemento periódico	[N m]
T_R	Temperatura do receptor	[K]
Ts	Período anual de geração de eletricidade inerente a conversão	
	energia solar	[h]
U_c	Velocidade do ar que atravessa o concentrador	[m/s]

U_R	Velocidades dos ventos à altura R	[m/s]
Uz	Velocidades dos ventos à altura Z	[m/s]
U_∞	Velocidade da corrente livre / vento	[m/s]
$U_{\infty M}$	Velocidade média anual do vento	[m/s]
$U_{\infty \theta c}$	Velocidade dos ventos na geração híbrida	[m/s]
VOC	Custo operacional variável	[U\$ /kWh]
W	Velocidade relativa	[m/s]
W_r	Velocidade relativa inerente ao elemento de pá	[m/s]
Y	Energia específica	$[m^2/s^2]$
y^+	y plus	

LETRAS GREGAS

α	Ângulo de ataque	[°]
α_P	Fator de correlação da lei da potência	
α_{abs}	Absortância	
β	Ângulo de passo	[°]
β_r	Ângulo de passo no elemento de pá	[°]
Г	Fator de interceptação	
δ_D	Coeficiente de diâmetro	
δ_R	Reflexibilidade	
δr	Espessura do elemento de pá	
З	Emissividade	
η_C	Rendimento do concentrador	
η_G	Rendimento global	
η_{GE}	Rendimento do gerador elétrico	
η_R	Rendimento do receptor	
ηs	Rendimento do motor Stirling	
θ_{C}	Posição angular do concentrador híbrido	[°]
θ_I	Erro na incidência solar	[mrad]
λ	Razão de velocidades na ponta da pá	
λr	Razão de velocidades no elemento de pá	
μ	Viscosidade dinâmica	[Pa·s]

μ_{ar}	Massa específica do ar	$[kg/m^3]$
μ_r	Posição radial adimensional relativa ao elemento de pá	
μ_{var}	Viscosidade absoluta do ar	[Pa·s]
ρ	Densidade	[kg/m ³]
σ	Solidez	
σ_B	Constante de Stefan-Boltzmann	$[W/m^2K^4]$
σ_L	Coeficiente de ligeireza	
σ_{SCh}	Solidez do concentrador híbrido	
σ_{SCr}	Solidez da corda	
σ_{SCrCh}	Solidez da corda do concentrador híbrido	
σ SmCrCh	Solidez média das cordas dos elementos de pá do concentrador	
τ	Transmitância	
$ au_{ij}$	Tensão viscosa	
ϕ	Propriedade física	
arphi	Ângulo de fluxo	[°]
φc	Ângulo de curvatura do concentrador híbrido	[rad]
φ_r	Ângulo de fluxo intrínseco ao elemento de pá	[°]
Ψ	Coeficiente de pressão	
Ω	Velocidade angular	[rad/s]

LISTA DE ABREVIATURAS

- AGs Algoritmos Genéticos
- BEM Blade Element Momentum
- CFD Computational Fluid Dynamics
- CRF Capital recovery factor
- DCC Direct capital cost
- DOE Design Of Experiments
- GDO Goal Driven Optimization
- ICC Indirect capital cost
- LCOE Levelized Cost of Energy
- MOGA Multi-Objective Genetic Algorithm
- RSM Response Surface Methodology
- SST Shear Stress Transport
- TCC Total capital cost

SUMÁRIO

1. INTRO	DUÇÃO	1
1.1.OBJET	TIVOS	3
1.2.ESTRU	JTURA DA TESE	4
2. REVISĂ	ĂO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1.SISTE	MAS DISH-STIRLING	5
211	CONCENTRADOR SOLAR TIPO DISCO PARABÓLICO	7
2.1.1. 2.2.HIBRI	DIZAÇÃO PROPOSTA DE SISTEMAS DISH-STILING	9
2.3.CONC	ENTRADOR HÍBRIDO CONCEITUAL TIPO DISCO PARABÓLICO	12
2.4.SISTE	MA HÍBRIDO SOLAR EÓLICO CONCEITUAL	13
2.5.CONC	ENTRADOR HÍBRIDO TIPO DISCO PARABÓLICO	15
2.6.SISTE	MA HÍBRIDO SOLAR EÓLICO	17
2.7.TEOR	A DO MOMENTO DO ELEMENTO DE PÁ	19
2.7.1.	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E EQUACIONAMENTO DO BEM	20
2.8.DINÂN	1ICA DOS FLUIDOS COMPUTACIONAL (CFD)	23
2.8.1.	ESCOAMENTOS TURBULENTOS	25
2.8.1.1.	MODELO DE TURBULÊNCIA k-ω SST	26
2.9.MÉTO	DOS DE OTIMIZAÇAO	28
2.9.1.	ALGORITMOS GENÉTICOS (<i>AGs</i>)	29
2.9.1.1.	MOGA ("Multi-Objective Genetic Algorithm")	
2.10.ANÁI	ISE ECONÔMICA	33
3. METOI	DOLOGIA	36
3.1.REVIS	ÃO DE PROJETO DO CONCENTRADOR HÍBRIDO	36
3.2.OTIMI	ZAÇÃO DO CONCENTRADOR HÍBRIDO	36
3.2.1	ESPECIFICAÇÕES DE PROJETO DO CONCENTRADOR HÍBRIDO	38
3.2.1.1.	PARÂMETROS DE PROJETO DO CONCENTRADOR HÍBRIDO	
3.2.1.2.	VARIÁVEIS GEOMÉTRICAS APLICADAS NA OTIMIZAÇÃO	42
3.2.1.2.1.	ÂNGULO DE CURVATURA DOS REFLETORES	42
3.2.1.2.2.	RAZÃO DE CUBO ("Hub-To-Tip Ratio")	43
3.2.1.2.2.1.	DIMENSÕES DAS LACUNAS	45
3.2.1.2.3.	GEOMETRIA DAS PÁS DO CONCENTRADOR HÍBRIDO	45
3.2.2.	GERAÇÃO DE GEOMETRIAS	46
3.2.2.1.	PARAMETRIZAÇÃO DA GEOMETRIA DO CONCENTRADOR	49
3.2.3.	GERAÇÃO DAS MALHAS	49
3.2.4.	DINÂMICA DOS FLUIDOS COMPUTACIONAL (CFD)	52
3.2.5.	GERAÇÃO DE ELETRICIDADE	54
3.2.5.1.	GERAÇÃO ORIUNDA DA CONVERSÃO DE ENERGIA EÓLICA	55
3.2.5.2.	GERAÇÃO ORIUNDA DA CONVERSÃO DE ENERGIA SOLAR	56
3.2.5.3.	GERAÇÃO HÍBRIDA (CONVERSÃO DE ENERGIA SOLAR E EÓLICA)	59
3.2.6.	OTIMIZAÇÃO MULTIOBJETIVO	65
3.2.6.1.	DESIGNXPLORER	65

3.2.6.2.	PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTOS ("Design of Experiments")	67
3.2.6.3.	SUPERFÍCIE DE RESPOSTA ("Response Surface Methodology")	68
3.2.6.4.	OTIMIZAÇÃO ORIENTADA A OBJETIVOS ("Goal Driven Optimization")	70
3.3.CURV	AS CARACTERÍSTICAS DO CONCENTRADOR OTIMIZADO	74
3.4.ANÁI	LISE ECONÔMICA DO SISTEMA HÍBRIDO OTIMIZADO	76
4. RESU	LTADOS	80
4.1.REVI	SÃO DE PROJETO DO CONCENTRADOR HÍBRIDO	80
4.1.1.	IMPLEMENTAÇÃO DO CONJUNTO RECEPTOR NO CFD	80
4.1.2.	IMPLEMENTAÇÃO DE ABERTURA NO REFLETOR CENTRAL	82
4.1.3.	MELHORIAS AERODINÂMICAS NO ANEL EXTERNO	83
4.1.4.	IMPLEMENTAÇÃO DO SUPORTE DO CONCENTRADOR HÍBRIDO	85
4.1.5.	IMPLEMENTAÇÃO DE CARENAGEM NO CONJUNTO SUPORTE	86
4.2.DOE	- OTIMIZAÇÃO DO CONCENTRADOR HÍBRIDO	89
4.3.RSM	- GERAÇÃO DE ELETRICIDADE DO SISTEMA HÍBRIDO	90
4.3.1.	ANÁLISE DE SENSIBILIDADE	93
4.3.1.1.	GERAÇÃO ORIUNDA DA CONVERSÃO DE ENERGIA EÓLICA	94
4.3.1.2.	GERAÇÃO ORIUNDA DA CONVERSÃO DE ENERGIA SOLAR	95
4.3.1.3.	GERAÇÃO DE ELETRICIDADE DO SISTEMA HÍBRIDO PROPOSTO	97
4.3.2.	SUPERFÍCIES DE RESPOSTA	99
4.3.2.1.	GERAÇÃO ORIUNDA DA CONVERSÃO DE ENERGIA EÓLICA	99
4.3.2.2.	GERAÇÃO ORIUNDA DA CONVERSÃO DE ENERGIA SOLAR	101
4.3.2.3.	GERAÇÃO DE ELETRICIDADE DO SISTEMA HIBRIDO PROPOSTO	102
4.4.OTIN	IIZAÇAO GEOMETRICA MULTIOBJETIVO	103
4.5.ANAI	LISE ECONÔMICA	105
5. CONC	LUSÕES	108
5.1.CON	FRIBUIÇÕES	108
5.2.RECO	OMENDAÇÕES AOS ESTUDOS FUTUROS	109
APÊNDI	СЕ А	111
APÊNDI	СЕ В	119
APÊNDI	СЕ С	127
APÊNDI	CE D	129
APÊNDI		150
	CE E	150
	UL F	131
U. KEFE	KLIVLIAD	152

1.INTRODUÇÃO

A conversão de energia estabelecida sob fontes não-renováveis é veementemente questionada no âmbito ambiental, em relação aos seus custos e ao esgotamento dos combustíveis fósseis (Zayed et al. 2021a). A aplicação de fontes não-renováveis é a solução para esta conjuntura, obtendo uma conversão de energia limpa e sustentável (Zayed et al., 2021a).

Os sistemas híbridos de conversão de energia renovável são constituídos por combinações de fontes de energia renováveis(Shboul et al. 2021).Os sistemas compostos por combinações de duas fontes de energia renováveis, sendo estas a eólica e a solar, são denominados sistemas híbridos de conversão de energia renovável eólico solar (Shboul et al. 2021).

Os sistemas Dish-Stirling realizam conversão de energia solar fundamentada em tecnologia de concentração solar, aplicando especificamente o concentrador solar do tipo disco parabólico (Shboul et al. 2021). O concentrador híbrido do tipo disco parabólico promove a concentração solar e a geração de torque durante a ocorrência de ventos, oportunizando a implementação de conversão de energia eólica em tradicionais sistemas Dish-Stirling. Sendo assim, o concentrador híbrido do tipo disco parabólico parabólico parabólico parabólico portuniza a hibridização de sistemas Dish-Stirling.

A hibridização de sistemas Dish-Stirling mediante aplicação do concentrador híbrido do tipo disco parabólico é primariamente viabilizada pela disponibilidade de energia eólica usualmente presente nos típicos locais de instalação destes sistemas de conversão de energia. Entretanto, a motivação desta hibridização é fundamentada na ampliação de sua geração de eletricidade.

Precedentemente ao desenvolvimento do concentrador híbrido do tipo disco parabólico, Su et al. (2011) e Tao et al. (2011) desenvolveram o concentrador híbrido do tipo funil. No entanto, ambos estudos apresentam objetivos comuns;a definição de novos conceitos de concentradores híbridos e sistemas de conversão de energia solar eólico. Apesar da semelhança conceitual (associação de concentrador solar a rotor eólico), estes concentradores apresentam configurações distintas (tipo disco parabólico e funil) e aplicações de diferentes rotores eólicos (rotor eólico comercial e o novo conceito de rotor o qual associa pás eólicas diretamente ao concentrador).

Os resultados obtidos em ambos os desenvolvimentos de concentradores híbridos (tipo disco parabólico e funil) comprovaram a viabilidade técnica do projeto de sistemas híbridos de conversão de energia solar eólica fundamentados na aplicação de concentradores híbridos.

As análises desenvolvidas na geração de eletricidade do sistema hibridizado proposto em seu projeto inicial e na geração de eletricidade de sistemas de conversão de energia análogos demonstraram a efetividade da hibridização proposta. Ratificando esta efetividade, um estudo econômico fundamentado na análise do LCOE do sistema Dish-Stirling hibridizado e de outros

sistemas de conversão de energia análogos demonstra que o sistema proposto apresenta o menor o custo líquido de geração de eletricidade dentre os sistemas avaliados.

Em suma, o projeto inicial do concentrador híbrido do tipo disco parabólico foi executado por Silva (2019) e sua aplicação no sistema híbrido proposto analisada mediante estudo comparativo estabelecido nas gerações de eletricidade e nos custos líquidos de geração de eletricidade (LCOE) por Silva et al. (2022). Entretanto, estes estudos foram fundamentados no projeto inicial do concentrador híbrido, o qual foi executado pela aplicação de tradicional metodologia de dimensionamento de sistemas Dish-Stirling e pela aplicação de metodologia proposta para o projeto das pás eólicas. A metodologia proposta foi aplicada devido ao novo conceito do concentrador híbrido do tipo disco parabólico, o qual posiciona pás eólicas entre refletores solares. Aplicação da metodologia proposta foi validada através de tradicionais diagramas de avaliação de projeto de rotores, entretanto não há investigações sobre a capacidade desta metodologia de estabelecer pontos de projetos próximos ao ponto de máxima eficiência. Logo, torna-se inconclusivo que o ponto de projeto inicial do concentrador híbrido esteja efetivamente próximo ao ponto de maior eficiência na conversão de energia eólica. Esta questão, fundamenta uma real oportunidade de obter-se um ponto de projeto com sensível aumento de eficiência em relação ao ponto de projeto inicial e fomentou as análises iniciais deste estudo.

A análise inicial deste estudo, baseada unicamente na metodologia proposta ao projeto inicial das pás eólicas do concentrador híbrido, concluiu que a aplicação de qualquer outra metodologia de projeto de pás eólicas resultaria numa nova metodologia proposta e apresentaria a mesma incerteza em relação ao ponto de máxima eficiência na conversão de energia eólica. Portanto, a aplicação de métodos de otimização para o projeto das pás eólicas consiste numa solução para a obtenção do ponto de projeto de maior eficiência na conversão de energia eólica. Esta conclusão é ratificada por Jaluria (2020), o qual postula que os projetos de engenharia desenvolvidos sob metodologias tradicionais e próprias para sua aplicação, quando submetidos a estudos de otimização, apresentam sensível aumento de eficiência. Deste modo, o projeto das pás eólicas do concentrador híbrido, desenvolvido por meio de metodologia proposta, apresenta real oportunidade de melhoria em sua eficiência na conversão de energia eólica.

O estudo de otimização para a determinação do ponto de máxima eficiência na conversão de energia eólica do concentrador híbrido resulta, por conseguinte, na maximização da geração de eletricidade pela conversão de energia eólica. Entretanto, este estudo de otimização não pode se limitar apenas a conversão de energia eólica e sim abranger a conversão de energia solar para que a maximização de eletricidade do sistema híbrido seja realmente efetiva. Deste modo,

define-se o objetivo deste estudo de otimização, o qual é ratificado por Eriksson e Gray (2019) que postulam que otimizações de sistemas híbridos solares eólicos geralmente objetivam a maximização de sua geração de eletricidade.

Eriksson e Gray (2019) também postulam que otimizações de sistemas híbridos solares eólicos são usualmente fundamentados em suas características técnicas (dimensionamento e construtivas). Estabelecido neste postulado elementar de otimizações de sistemas híbridos solares eólicos e no objetivo de otimizar tanto a conversão de energia eólica quanto a solar, foi realizada uma análise do projeto inicial do concentrador híbrido fundamentada no método de dimensionamento de seus principais componentes. O resultado desta análise, demonstra que o estudo de otimização geométrica de determinados componentes do concentrador consiste numa oportunidade promissora de maximização da geração de eletricidade do sistema hibridizado proposto. Esta análise demonstra que o estudo proposto consiste essencialmente na otimização geométrica de dois componentes do concentrador que efetivamente determinam as conversões de energia solar e eólica; os refletores e as pás eólicas

Após a definição dos componentes do concentrador híbrido que efetivamente determinam as conversões de energia (premissa técnica primária de otimização), este estudo desenvolveu a análise minuciosa de identificação e sobretudo, especificação de variáveis geométricas do concentrador híbrido que efetivamente determinam (direta ou indiretamente) a geometria das pás eólicas e dos refletores. O resultado deste análise concluiu que três variáveis geométricas de projeto que determinam toda a geometria das pás e dos refletores.

Após a definição destas três variáveis geométricas de projeto, foi realizada uma extensa revisão bibliográfica objetivando estruturar uma metodologia robusta a otimização geométrica do concentrador híbrido do tipo disco parabólico.

1.1. OBJETIVOS

O objetivo primário da tese consiste no desenvolvimento de uma metodologia robusta para a otimização geométrica multiobjetivo do concentrador híbrido do tipo disco parabólico, estabelecendo a maximização da geração de eletricidade do sistema híbrido proposto.

Os objetivos secundários são enunciados a seguir:

- Realizar a revisão de projeto do concentrador híbrido do tipo disco parabólico;
- Levantar as curvas de comportamento da conversão de energia eólica do concentrador híbrido revisado e otimizado;
- Realizar análise econômica comparativa entre os custos líquidos de geração de eletricidade (LCOE) do sistema híbrido otimizado e de sistemas análogos;

1.2.ESTRUTURA DA TESE

A tese foi estruturada em cinco capítulos compostos pela introdução, revisão bibliográfica, metodologia, resultados e conclusões. Os conteúdos destes capítulos serão descritos a seguir.

O capítulo 1, introdução, apresenta as considerações iniciais inerentes à temática elementar ao desenvolvimento do tema da tese. Concomitantemente, relevâncias, justificativas referentes à temática e a proposta são fundamentadas neste tópico. Subsequentemente, os objetivos desta tese são apresentados seguidos pela presente estrutura da tese.

O capítulo 2 apresenta a revisão bibliográfica fundamental ao desenvolvimento da tese. Este capítulo é estruturado em dez seções compreendidas por sistemas Dish-Stirling, hibridização proposta de sistemas Dish-Stirling, concentrador híbrido conceitual tipo disco parabólico, sistema híbrido solar eólico conceitual, concentrador híbrido tipo disco parabólico, sistema híbrido solar eólico, teoria do momento do elemento de pá, dinâmica dos fluidos computacional, métodos de otimização e análise econômica.

O Capítulo 3 demonstra a metodologia e as formulações matemáticas aplicadas ao desenvolvimento da tese. Este capítulo é estruturado em quatro seções; revisão de projeto do concentrador híbrido, otimização do concentrador híbrido, curvas características do concentrador otimizado e análise econômica do sistema híbrido otimizado.

O Capítulo 4 apresenta os resultados obtidos, sendo estes analisados sobretudo pela premissa de elucidá-los e validá-los. Este capítulo é estruturado em cinco seções; revisão de projeto do concentrador híbrido, DOE - otimização do concentrador híbrido, RSM - geração de eletricidade do sistema híbrido, otimização geométrica multiobjetivo e análise econômica.

O Capítulo 5 apresenta as conclusões obtidas pelas análises dos resultados evidenciados no Capítulo 4, as contribuições estabelecidas pelo desenvolvimento da tese e as recomendações para os estudos futuros.

2.REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 2.1.SISTEMAS DISH-STIRLING

Os sistemas Dish-Stirling, apresentados na Figura 2.1, são compostos por superfície refletora disposta em estrutura metálica parabólica que, associada ao sistema de rastreamento solar, coleta radiação solar numa grande área e concentram-na numa pequena área no receptor (Zayed et al. 2020; Allouhi et al. 2022). A energia solar térmica concentrada no receptor é transferida na forma de calor ao motor Stirling que, acoplado ao gerador elétrico, promove a geração de eletricidade deste sistema (Zayed et al. 2020; Allouhi et allouhi et al. 2020; Allouhi et





(a) (b) Figura 2.1 - Sistemas Dish-Stirling Fonte: Adaptado de Coventry e Andraka (2017) (a) e Caballero (2017) (b)

A Figura 2.2 apresenta os principais componentes de um sistema Dish-Stirling típico.



Figura 2.2 - Principais componentes de sistemas Dish-Stirling Fonte: Adaptado de Malik et al. (2022)

Os sistemas Dish-Stirling têm demonstrado ser a tecnologia em concentradores solares mais eficientes na conversão de energia solar em eletricidade (Singh e Kumar, 2018; Zayed et al. 2020). Portanto, estes sistemas de conversão de energia solar têm se apresentado como uma tecnologia promissora na geração de eletricidade, sendo uma temática atualmente abordada por pesquisadores e departamentos governamentais (Zayed et al. 2021a). Recentemente, diversos sistemas Dish-Stirling estão consolidados no mercado comercial e outros, em desenvolvimento por diferentes empresas em todo o mundo (Zayed et al. 2021a).

Os sistemas Dish-Stirling são caracterizados por apresentarem significantes vantagens em relação a outros sistemas de geração de eletricidade. Quando comparado a grupos geradores compostos por motores de combustão interna, os sistemas Dish-Stirling são extremamente vantajosos, apresentando operação mais silenciosa com alto rendimento e sem a utilização de combustível fóssil, sendo, por conseguinte, livres de emissão de CO₂. Considerando a aplicação em pequena escala (para atendimento de baixas demandas), quando comparado aos sistemas fotovoltaicos, os sistemas Dish-Stirling são menos eficientes em termos de custo e geração de energia, entretanto mais promissores em termos de eficiência de conversão de energia solar em eletricidade. Em aplicações de larga escala (para atendimento de grandes demandas) a aplicação de sistema Dish-Stirling apresenta maior viabilidade que sistemas fotovoltaicos.

Os sistemas Dish-Stirling são objeto de diversas pesquisas fundamentadas em propostas de modificações de sua composição elementar, simulações que objetivam a definição de modelos preditivos para a proposição de melhorias objetivando o aumento de desempenho e viabilidade de aplicação (Zayed et al. 2021b).

Em Zayed et al. (2021a) é desenvolvido a modelagem ótica, geométrica e térmica de um sistema Dish-Stirling para a determinação de sua geração de eletricidade e eficiência geral. No estudo, diferentes parâmetros como o diâmetro do concentrador, a temperatura do receptor, a radiação solar, a velocidade do vento e a temperatura ambiente foram analisados parametricamente para determinar seu efeito na potência de saída e na eficiência total do sistema Dish-Stirling. Posteriormente, sistemas Dish-Stirling foram projetados a partir dos resultados obtidos no estudo paramétrico e seu comportamento térmico foi avaliado nas condições meteorológicas de Tianjin, China. Os resultados mostraram que sistemas Dish-Stirling compostos por concentrador de diâmetros de 10 a 17,5 metros apresentam grandes potências elétricas(18,6 a 58,1 kW) com pequenas variações de eficiência geral(23,7 a 24,25%). Os sistemas Dish-Stirling com diâmetros de 2,5 a 8,5 metros apresentam pequenas potências elétricas (0,735 a 11,7kW) com uma variação notável de eficiência global (11 a 23,4%). Os resultados demostraram que a viabilidade da aplicação de um sistema Dish-Stirling de potência

de 23,11 kW com uma eficiência de 23,05%, em Tianjin, considerando o solstício de verão. Este estudo sugere que futuros trabalhos devem ser realizados para maximizar o desempenho óptico e térmico dos sistemas Dish-Stirling analisados através da aplicação de métodos de otimização.

Em Sandoval et al. (2019) é desenvolvido uma metodologia para avaliar o desempenho de sistemas Dish-Stirling. A metodologia é composta por modelo matemático proposto que consiste efetivamente numa modificação do modelo clássico modelagem de motores Stirling de Iwamoto associado ao software brasileiro Sonda de modelagem de sistemas Dish-Stirling. Esta metodologia foi aplicada, comparada e validada num estudo de caso em Natal - RN.

Em Khosravi et al. (2019) é desenvolvida uma metodologia fundamentada em inteligência artificial para modelar sistemas Dish-Stirling e apresentar o efeito de determinadas variáveis de projeto na geração de eletricidade e eficiência. Os métodos de inteligência artificial são rede neural GMDH, sistema neuro-fuzzy adaptativo (ANFIS) e rede neural MLP. O MLP e o ANFIS são otimizados pela aplicação associada de algoritmo genético (GA) e de enxame de partículas (PSO). As variáveis de projeto (parâmetros de entrada) são a relação entre o ponto focal e o diâmetro do concentrador, hora do dia, radiação solar e razão de concentração geométrica. Os parâmetros de saída (objetivos) são a geração de eletricidade, eficiência global, calor aplicado no motor Stirling assim como a sua velocidade e a temperatura do receptor. Os resultados demonstram que os métodos fundamentados em inteligência artificial operam com sucesso para a modelagem térmica de sistemas Dish-Stirling e as análises comparativas corroboram que o método proposto tem desempenho melhor que os outros métodos matemáticos tradicionais.

Antes da apresentação do conceito do concentrador híbrido, na seção 2.1.1 são descritas as principais características do típico concentrador solar do tipo disco parabólico; componente base do novo conceito de concentrador proposto.

2.1.1.CONCENTRADOR SOLAR TIPO DISCO PARABÓLICO

Os concentradores solares do tipo disco parabólico são aplicados no aproveitamento da energia solar para diversas finalidades, como o fornecimento de calor a fornos, sistemas de ciclo vapor, sistemas de refrigeração, sistemas de dessalinização e destilação de água (Lovegrove e Stein, 2020). Entretanto, a principal aplicação destes concentradores solares é estabelecida em sistemas Dish-Stirling para a geração de eletricidade (Allouhi et al. 2022).

Os concentradores solares do tipo disco parabólico apresentam as mais altas eficiências ópticas, as maiores razões de concentração geométrica e as maiores eficiências entre todas as tecnologias de concentradores solares parabólicos (Lovegrove e Stein, 2020).

A geometria do concentrador solar do tipo disco parabólico consiste efetivamente num paraboloide truncado gerado através da rotação da parábola em torno de seu eixo, sendo este o formato ideal de concentradores solares (Allouhi et al. 2022).

Os concentradores solares do tipo disco parabólico são constituídos essencialmente por dois componentes: a estrutura e o refletor (Lovegrove e Stein, 2020).

A estrutura, demonstrada na Figura 2.3 (a), é constituída por material leve e resistente, apresentando a função primordial de garantir a integridade estrutural sob cargas gravitacionais e eólicas aplicadas em diferentes orientações (Graham et al. 2024; Lovegrove e Stein, 2020).

O refletor pode ser único ou constituído por múltiplos refletores associados a estrutura do concentrador (Allouhi et al. 2022). O refletor consiste no componente do concentrador solar que promove em sua superfície a reflexão da radiação solar, sendo este constituído por material espelhado, contínuo ou facetado (Allouhi et al. 2022; Hafez et al.2017). A Figura 2.3 (b) mostra um refletor facetado aplicado em concentradores solares do tipo disco parabólico.



Figura 2.3 - Estrutura (a) e refletor (b) de concentradores solares do tipo disco parabólico Fonte: Coventry e Andraka, (2017) e Li e Dubowsky (2011)

A especificação do material do refletor consiste num fator primordial em concentradores solares (Allouhi et al. 2022). Este material deve apresentar propriedades mecânicas apropriadas para a manufatura dos refletores e a posterior montagem na estrutura do concentrador solar (Lovegrove e Stein, 2020). Este material deve apresentar alta reflexibilidade, estabelecendo alta porcentagem de reflexão de radiação solar no receptor, sendo estes submetidos a tratamentos, os quais estabelecem propriedades mecânicas para resistir a altas temperaturas (Allouhi et al. 2022; Lovegrove e Stein, 2020). O alumínio e aço inoxidável são exemplos de materiais de alta reflexibilidade e amplamente aplicados em refletores (Hafez et al.2017). O espelho de prata apresenta propriedades mecânicas as quais o confere à denominação de material constituinte de refletores de maior durabilidade (Hafez et al.2017).

2.2. HIBRIDIZAÇÃO PROPOSTA DE SISTEMAS DISH-STILING

Os sistemas Dish-Stirling são usualmente instalados em localidades geograficamente remotas e isoladas, portanto sujeitos a frequente incidência de ventos (Graham et al. 2024). A incidência de ventos em sistema Dish-Stirling é uma temática amplamente estudada, visto que influencia na eficiência de receptores e, por conseguinte na conversão de energia solar, assim como estabelece a aplicação de cargas na estrutura dos concentradores solares do tipo disco parabólico (Graham et al. 2024). Diversos estudos recentes apresentados em Malik et al. (2022) apresentaram modelos para a determinação da influência dos ventos na eficiência de receptores e soluções para minimizar este efeito. Entretanto, as empresas que projetam e fabricam sistemas Dish-Stirling enfrentam dificuldades em garantir que seus sistemas suportem as forças aerodinâmicas impostas em seu funcionamento, devido sobretudo a caracterização limitada deste carregamento aerodinâmico (Graham et al. 2024).

As cargas aplicadas na estrutura de sistemas Dish-Stirling provenientes dos ventos podem gerar deformações na superfície do refletor ocasionando perdas de rendimento na conversão de energia solar (Graham et al. 2024). A velocidade crítica consiste no valor máximo da velocidade do vento incidente no concentrador solar o qual não acarreta dano ao mesmo (Graham et al. 2024). Diversos fabricantes de sistemas Dish-Stirling consideram que os concentradores solares do tipo disco parabólico podem ser expostos a ventos de até 16m/s durante sua operação sem que haja danos (Graham et al. 2024; Innova, 2017). Deste modo, a velocidade crítica do vento adotada em concentradores solares do tipo disco parabólico é de 16 m/s. Logo, a ocorrência de ventos a velocidades superiores a 16 m/s durante a operação de sistemas Dish-Stirling determina que o mesmo interrompa seu funcionamento, assumindo a posição de recolhimento ("*stow*") de seu concentrador. Nesta posição, o concentrador solar do tipo disco parabólico é posicionado com a sua face para baixo conforme mostrado na Figura 2.4 (b).



Figura 2.4 - Sistema Dish-Stirling em operação (a) e na posição "*stow*" (b) Fonte: Adaptado de Innova (2017)

Na posição "*stow*" não há conversão de energia, entretanto o concentrador solar do tipo disco parabólico apresenta maior resistência aos ventos incidentes (Graham et al. 2024). Diversos fabricantes de sistemas Dish-Stirling consideram que os concentradores solares do tipo disco parabólico na posição "*stow*" podem ser expostos a ventos de até 44 m/s sem que haja danos (Graham et al. 2024; Innova, 2017).

Fundamentado na temática da incidência de ventos em concentradores solares do tipo disco parabólico, Graham et al. (2024) desenvolveu um estudo tridimensional minucioso pela aplicação da dinâmica dos fluídos computacional. Este estudo foi realizado no *Ansys Fluent*, considerando as seguintes variáveis; ângulos de incidência dos ventos (0 a 90°) e inclinação do concentrador no rastreamento solar (0 a 180°), ambos em incremento de 15°, assim como a altura do pedestal. A análise desenvolvida demonstrou que a inclinação do concentrador e o ângulo de incidência dos ventos são as variáveis preponderantes nas cargas provenientes da disponibilidade eólica. Os resultados demonstraram que a altura do pedestal foi determinante ao momento do sistema analisado. Este estudo foi de grande relevância para a análise de cargas e momentos em sistemas Dish-Stirling sob incidência de ventos, pois promoveu o mapeamento do comportamento destas estruturas nesta condição de contorno. Os resultados deste estudo consistem efetivamente numa ferramenta analítica para que projetistas determinem as cargas provenientes dos ventos em sistemas Dish-Stirling e avaliem as forças e os momentos em seus principais componentes.

A temática de incidência de ventos em concentradores solares fomentou a hibridização proposta através da observação de duas limitações operacionais no sistema Dish-Stirling do laboratório de energia heliotérmica da Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI).

A primeira limitação operacional consiste na incidência de ventos no concentrador solar a elevadas velocidades, determinando que o sistema seja desativado. Esta condição de contorno, fundamentada na disponibilidade eólica e extensivamente discutida nesta seção, estabelece uma limitação operacional no período de operação deste sistema de conversão de energia solar.

A segunda limitação operacional é fundamentada no período de operação intrínseco aos sistemas de conversão de energia solar, que impreterivelmente, são limitados ao período diurno. Por conseguinte, a segunda limitação operacional determina a ausência de conversão de energia em sistemas Dish-Stirling no período noturno.

A proposta de hibridização de sistemas Dish-Stirling consiste no aproveitamento da energia eólica, a qual estabelece a primeira limitação operacional, para a geração de eletricidade. Esta proposta determina a hibridização, adicionando a conversão de energia eólica ao sistema de conversão de energia solar. Por conseguinte, a proposta estabelece a supressão da segunda limitação operacional mediante conversão de energia eólica em períodos noturnos e nublados.

A proposta técnica de hibridização consiste na integração da conversão de energia eólica ao sistema Dish-Stirling através do desenvolvimento de um novo conceito de concentrador híbrido do tipo disco parabólico. Esta proposta técnica fomentou a realização de revisão bibliográfica de projetos fundamentados na premissa de integração de conversão de energia eólica ao sistema de conversão de energia solar através do desenvolvimento de um novo conceito de concentrador. Os resultados desta revisão evidenciaram o projeto de um sistema híbrido de conversão de energia solar e eólica, o qual foi estabelecido a partir do conceito de concentrador funil desenvolvido por Su et al. (2011) e Tao et al. (2011). A geometria singular desenvolvida no concentrador funil possibilitou a associação deste ao módulo fotovoltaico e a turbina eólica Rutland 503, originando o sistema híbrido eólico solar CSCWA demonstrado na Figura 2.5.



Figura 2.5 - Sistema híbrido CSCWA (a) e seu desenho esquemático (b) Fonte: Tao et al. (2011)

Os estudos desenvolvidos por Su et al. (2011) e Tao et al. (2011) sobre o sistema híbrido CSCWA demonstram a viabilidade técnica do desenvolvimento de um sistema híbrido de conversão de energia solar e eólica a partir da definição de um novo conceito de concentrador solar. O CSCWA, quando aplicado em locais caracterizados por grande disponibilidade eólica, proporciona aumento de 50% em sua capacidade de geração de eletricidade em comparação ao sistema de conversão de energia solar análogo (concentrador funil associado ao módulo fotovoltaico). Esta conclusão é ratificada por Eriksson e Gray (2019), o qual afirma que sistemas híbridos obtêm eficiências superiores às alcançadas em sistemas de conversão análogos que aplicam apenas uma fonte de energia.

2.3.CONCENTRADOR HÍBRIDO CONCEITUAL TIPO DISCO PARABÓLICO

O conceito do concentrador híbrido proposto consiste fundamentalmente num tradicional concentrador solar do tipo disco parabólico composto por pás eólicas associadas à sua estrutura. A Figura 2.6 (a) apresenta o modelo conceitual desenvolvido exclusivamente sob a finalidade de elucidar a proposta técnica, desconsiderando quaisquer metodologias de projeto e número de pás definido de maneira arbitrária.



Figura 2.6 - Modelo conceitual do concentrador híbrido (a) e seus componentes (b)

A Figura 2.6 (b) demonstra os principais componentes do concentrador híbrido proposto: os refletores e o rotor eólico/estrutura do concentrador.

Os concentrador híbrido do tipo disco parabólico é composto por múltiplos refletores externos e um refletor interno, conforme Figura 2.6 (b). Os refletores externos estão localizados entre os anéis externo e interno do concentrador híbrido (Figura 2.6), sendo quantitativamente determinados pelo número de pás eólicas. O refletor interno é caraterizado por ser único e apresentar formato circular, sendo alocado no anel interno do concentrador híbrido, conforme Figura 2.6 (b). A forma e a disposição dos refletores externos no concentrador híbrido estabelecem a região destinada ao escoamento de ar e posicionamento de pás eólicas; as lacunas, as quais são demonstradas na Figura 2.6 (b).

As lacunas (região compreendida entre os refletores externos) apresentam uma característica geométrica e operacional fundamental do concentrador híbrido do tipo disco parabólico. As lacunas determinam simultaneamente a área livre ao escoamento de ar através do concentrador híbrido e sob as pás, assim como a área de reflexão do concentrador. A área livre ao escoamento de ar através do concentrador e pás determina a vazão de ar aplicada ao projeto. A área relativa aos refletores compreende a área de reflexão do concentrador solar, determinante na potência disponível ao receptor (Hafez et al. 2016). Portanto, as dimensões das lacunas determinam concomitantemente a conversão de energia solar e eólica.

O rotor eólico / estrutura do concentrador é constituído por pás eólicas e anéis externo e interno, conforme Figura 2.6 (b). Os anéis externo e interno apresentam função estrutural, visto que associados ao conjunto de pás, formam uma estrutura rígida que suporta os refletores (exceto o refletor circular interno). O refletor circular interno não apresenta qualquer tipo de união ou engaste ao anel interno.

2.4. SISTEMA HÍBRIDO SOLAR EÓLICO CONCEITUAL

A hibridização de sistemas Dish-Stirling proposta consiste essencialmente na aplicação do concentrador híbrido em substituição ao tradicional concentrador solar do tipo disco parabólico, conforme demonstrado na Figura 2.7.



Figura 2.7 - Sistema Dish-Stirling (a) e sistema hibridizado (b)

Esta proposta estabeleceu um novo conceito de sistema híbrido, sendo demonstrado através do modelo conceitual da Figura 2.8 (a e b). O modelo conceitual proposto foi fundamentado no sistema Dish-Stirling do laboratório de energia heliotérmica da Universidade Federal de Itajubá (Figura 2.1-b), sendo seu modelo 3D apresentado na Figura 2.8 (c).



Figura 2.8 - Modelo conceitual do sistema híbrido (a) (b) e sistema Dish-Stirling (c) Fonte: Adaptado de Innova (2020) (c)

O sistema híbrido é composto por dois conjuntos, sendo estes o estrutural / rastreamento e geração de eletricidade.

O conjunto estrutural / rastreamento, mostrado na Figura 2.9 (a), é constituído por elementos mecânicos aplicados a sustentação do sistema e movimentação do concentrador híbrido no rastreamento solar e eólico. Este conjunto é comum aos sistemas Dish-Stirling e híbrido proposto, exceto pela sua aplicação, a qual apresenta-se abrangente no sistema híbrido (rastreamento solar e eólico) e restrita no sistema Dish-Stirling (rastreamento solar).



Figura 2.9 - Conjunto estrutural / rastreamento (a) e conjunto geração de eletricidade (b)

O conjunto geração de eletricidade, demonstrado na Figura 2.9 (b), consiste no conceito primordial do sistema híbrido proposto, pois estabelece as conversões de energia solar e eólica, assim como a geração de eletricidade. Os componentes do conjunto geração de eletricidade são descritos detalhadamente na Figura 2.10, mediante vista explodida.



Figura 2.10 - Vista explodida do conjunto geração de eletricidade

O conjunto geração de eletricidade estabelece o princípio de funcionamento do sistema híbrido proposto. Este conjunto foi subdividido em dois subconjuntos baseados em suas premissas operacionais; estática ou dinâmica durante a conversão de energia eólica.

A Figura 2.11 (a) apresenta o subconjunto dinâmico, o qual é constituído pelos componentes 3, 4, 6 e 7 do conjunto geração de eletricidade, enumerados na Figura 2.10. Este subconjunto realiza movimento de rotação durante a conversão de energia eólica.



Figura 2.11 - Subconjunto dinâmico (a) e subconjunto estático (b)

A definição do subconjunto dinâmico foi fundamentada no princípio de funcionamento do componente rotor eólico / estrutura do concentrador híbrido, o qual apresenta movimento de rotação durante a conversão de energia eólica, transmitindo torque ao gerador.

O subconjunto estático, demonstrado na Figura 2.11 (b), é constituído pelos componentes 1, 2, 5, 8, 9 e 10 do conjunto geração de eletricidade, enumerados na Figura 2.10. Este subconjunto não apresenta movimento de rotação durante a conversão de energia eólica.

A conceituação do subconjunto estático foi fundamentada na premissa da imprescindibilidade do conjunto receptor permanecer livre de movimento de rotação na conversão de energia eólica.

O conceito do sistema híbrido proposto oportuniza a conversão de energia eólica e solar de modo autônomo (operando ora conversão de energia solar, ora conversão de energia eólica) ou concomitante (operando simultaneamente as conversões de energia solar e eólica).

2.5.CONCENTRADOR HÍBRIDO TIPO DISCO PARABÓLICO

Após sua conceituação, o projeto inicial do concentrador híbrido foi desenvolvido. Estudos atribuíram valores aos parâmetros do projeto inicial, como o diâmetro externo, razão de cubo e números de pás, as quais foram especificadas em 6 metros, 0,33 e 20, respectivamente.

O projeto do concentrador, assim como todo o sistema de conversão de energia solar, foi fundamentado na metodologia de dimensionamento geométrico e térmico de sistemas Dish-Stirling propostos por Hafez et al. (2016) e Castellanos et al. (2017). O projeto das pás eólicas foi desenvolvido sob metodologia proposta fundamentada na aplicação associada das teorias de dimensionamento de pás de turbinas eólicas horizontais (BEM) e pás de ventiladores axiais. Isto porque não há em referências bibliográficas metodologias próprias para o desenvolvimento de pás eólicas que operem segundo as características intrínsecas do concentrador híbrido. A metodologia proposta é fundamentada na determinação do fator de indução axial e solidez do concentrador híbrido, sendo o projeto validado através da verificação do ponto de projeto em tradicionais diagramas de projetos turbinas eólicas e ventiladores axiais.

A Figura 2.12 demonstra o concentrador híbrido em seu projeto inicial, o qual consiste no modelo base da otimização geométrica proposta.



Figura 2.12 - Vista frontal (a), lateral (b) e isométrica (c) do concentrador híbrido

O projeto inicial do concentrador híbrido oportunizou através do CFD a determinação do torque e a potência gerada pelo concentrador híbrido na conversão de energia eólica no ponto de projeto. A aplicação da fluidodinâmica computacional possibilitou também o levantamento das curvas típicas de comportamento do concentrador híbrido na conversão de energia eólica. Estas curvas típicas obtidas foram comparadas, analisadas e validadas através de curvas de turbinas eólicas de eixo horizontal multipás descritas em referências bibliográficas.

As três curvas típicas do concentrador híbrido em seu projeto inicial (coeficiente de potência vs razão de velocidade na ponta da pá, coeficiente de potência vs velocidade angular e potência de eixo vs velocidade angular) são apresentadas na Figura 2.13.



Figura 2.13 - Diagramas de comportamento do concentrador híbrido

2.6.SISTEMA HÍBRIDO SOLAR EÓLICO

O desenvolvimento e validação do projeto inicial do concentrador híbrido oportunizou a realização de estudos comparativos entre o sistema hibridizado proposto e seus sistemas análogos, baseados nos custos líquidos de geração de eletricidade. Estes estudos econômicos foram fundamentalmente desenvolvidos através da metodologia do LCOE. Primeiramente, este índice econômico foi determinado tanto para o sistema híbrido proposto quanto para seus
sistemas análogos. Posteriormente, os resultados de LCOE foram comparados e aplicados numa análises de sensibilidade estabelecidas nos investimentos para a hibridização proposta (os investimentos foram somados aos custos diretos do sistema proposto). A Figura 2.14 apresenta as análises de sensibilidade desenvolvidas no projeto inicial.



Sistema híbrido proposto e sistema Dish-Stirling análogo

Sistema híbrido proposto e sistema híbrido análogo



Figura 2.14 - Análise de sensibilidade (LCOE vs investimentos)

O diagrama da Figura 2.14 (a) demonstra que o sistema híbrido proposto apresenta menor custo líquido de geração de eletricidade que seu análogo não hibridizado, desde que o investimento necessário a hibridização proposta esteja abaixo de 12.090 U\$/kW. No diagrama da Figura 2.14 (b) é evidenciado que o sistema híbrido proposto apresenta menor custo líquido de geração de eletricidade, contanto que o investimento necessário a hibridização proposta seja inferior a 1.110 U\$/kW.

2.7. TEORIA DO MOMENTO DO ELEMENTO DE PÁ

A literatura cientifica contêm diversas metodologias para o desenvolvimento de projeto de pás eólicas ou para a predição de desempenho aerodinâmico de turbinas eólicas, como o método de vórtices livres, o método de potencial de aceleração assintótica e a técnica de interação viscoso-invíscido tridimensional (Dehouck et al. 2018). Entretanto, a teoria do momento do elemento da pá (BEM) consiste num método simples e de maior aplicação ao desenvolvimento de turbinas eólicas, pois através deste obtém-se o projeto das pás eólicas e predições de suas condições elementares de operação e eficiência (Dehouck et al. 2018). A teoria BEM, que consiste na combinação das teorias do momento e do elementos da pá, foi originalmente aplicada ao projeto de hélices marítimas como uma extensão da teoria de Rankine-Froude e, posteriormente, aplicada ao projeto de rotores eólicos (Dehouck et al. 2018).

Recentemente, a aplicação de turbinas eólicas de eixo horizontal para geração de eletricidade tem apresentado aumento sensível, ampliando a participação deste sistema de conversão de energia eólica na matriz energética de diversos países (Dehouck et al. 2018). Deste modo, estudos fundamentados no BEM também têm apresentado sensível aumento, sobretudo na proposição de melhorias da teoria BEM para expandir suas aplicações e melhorar sua precisão (Dehouck et al. 2018). Pinto e Gonçalves (2017) apresentaram uma análise teórica revisada de projetos aerodinâmicos de turbinas eólicas de eixo horizontal fundamentada no BEM. Em Kavari et al. (2019), é realizada a aplicação associada da lei de potência e o BEM para o desenvolvimento da análise do efeito do cisalhamento do vento em toda a extensão da pá. Em Abutunis e Chandrashekhara (2019) é realizada a integração entre o BEM e técnicas de otimização de redes neurais para a obtenção do aumento de eficiência de projetos de rotores. Em Kim et al. (2020), considerando diferentes níveis de turbulência, o desempenho do BEM é avaliado em distintas abordagens e submetido a análise comparativa entre os resultados obtidos e a fluidodinâmica computacional. Em Fritz et al. (2022) é proposto um eficiente modelo de correção que permite a extensão do BEM para pás eólicas projetadas com deslocamento dihedral ou tipo "sweep". O BEM é uma metodologia fundamentada em pás eólicas retas estabelecidas no plano do rotor, desconsiderando quaisquer variações no fator de indução axial introduzidas pela configuração da pá do tipo "sweep". Portanto, Fritz et al. (2022) propõe a correção do fator de indução axial em dois aspectos; o deslocamento azimutal do sistema de vorticidade e a indução dos vórtices gerados pelo arrasto da pá do tipo "sweep". Fundamentado na conjectura que o BEM fornece resultados de cargas imprecisas para fluxo constante e uniforme, Boatto et al. (2023) desenvolveu uma análise descritiva dos mecanismos físicos não abordados nas correções de Prandtl para perdas na ponta da pá e o efeito de atraso de estagnação ("*stall delay*"), sendo complementarmente proposto melhorias no modelo de Prandtl.

Na otimização geométrica multiobjetivo do concentrador híbrido do tipo disco parabólico, a teoria do momento do elemento de pá é não unicamente aplicada em sua formulação clássica. Assim como em Pinto e Gonçalves (2017), Abutunis e Chandrashekhara (2019), Kavari et al. (2019) Kim et al. (2020), Fritz et al. (2022) e Boatto et al. (2023), esta metodologia é aplicada sob uma nova abordagem para o desenvolvimento do estudo proposto, sendo por conseguinte, aplicável a otimização de rotores eólicos de turbinas de eixo horizontal.

Na seção 2.6.1 é apresentado a fundamentação teórica e o equacionamento clássico da teoria do momento do elemento de pá, o qual consiste no embasamento teórico fundamental da abordagem proposta neste estudo.

2.7.1.FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E EQUACIONAMENTO DO BEM

A teoria do momento do elemento de pá é fundamentada na premissa que as pás das turbinas eólicas são constituídas por elementos de espessura (δr) e área de seção transversal, conforme demonstrado na Figura 2.15 (b) (Burton et al. 2021).



Figura 2.15 - Turbina eólica, pá, elemento de pá e velocidade tangencial, axial e angular Fonte: Burton et al. (2021)

A teoria despreza em sua análise os efeitos tridimensionais, considerando apenas os efeitos bidimensionais das seções transversais da pá (Burton et al. 2021). Deste modo, a teoria do

momento do elemento de pá considera que a espessura tende a zero ($\delta r \rightarrow 0$) e sua análise se restringe exclusivamente a seções transversais do rotor (Burton et al. 2021).

A Figura 2.15 (a) apresenta uma turbina eólica de eixo horizontal, o elemento de pá situado num dado raio (r), sua espessura, a direção e sentido de incidência dos ventos em seu rotor. A Figura 2.15 (b) apresenta em detalhe uma das pás desta turbina eólica; demonstrando o elemento de pá em seu raio, discriminando a velocidade angular do rotor (Ω), a velocidade da corrente livre no rotor ($U_{\infty}(1-a)$), a velocidade tangencial (Ωr) e a velocidade tangencial induzida ($\Omega ra'$), ambas inerentes ao elemento de pá. Através de uma análise estritamente bidimensional, esta teoria desconsidera a componente de velocidade na direção longitudinal da pá (Burton et al. 2021).

A variação da velocidade tangencial (Ωr) nos elementos de pá ao longo do rotor é expressa em termos do fator de indução tangencial (a'), estabelecendo a velocidade tangencial induzida no rotor ($\Omega ra'$) (Burton et al. 2021). Esta velocidade induzida é oposta ao movimento do rotor, visto que é produzida em reação ao torque (Burton et al. 2021). A velocidade tangencial líquida do fluxo de ar que atravessa o rotor é expressa por ($\Omega r (1+a')$) (Burton et al. 2021).

O fator de indução tangencial (a') é determinado pela Equação (2.1).

$$a' = \frac{a(1-a)}{\lambda^2 \mu_r^2} = \frac{a(1-a)}{\lambda_r^2}$$
(2.1)

O rotor induz variação na velocidade da corrente livre (U_{∞}) , a qual é expressa em termos do fator de indução axial (*a*) (Burton et al. 2021). Deste modo, a velocidade da corrente livre induzida no rotor é estabelecida por $(-aU_{\infty})$, sendo, por conseguinte, a velocidade da corrente livre líquida é expressa por $(U_{\infty}(1-a))$ (Burton et al. 2021).

A teoria do momento do elemento de pá propõe que o projeto de pás eólicas seja constituído por elementos, estabelecidos em perfis aerodinâmicos e fundamentalmente especificados a partir da corda (*c*) e ângulo de passo (β) (Burton et al. 2021). O ângulo de passo consiste no ângulo de montagem ou torção estabelecido sob os elementos de pá (Burton et al. 2021). A corda consiste no comprimento da linha formada entre o bordo de ataque e o bordo de fuga de um perfil aerodinâmico (Manwell et al. 2010). A corda e o ângulo de passo apresentam variações ao longo da pá (Burton et al. 2021), logo a corda e ângulo de passo associados ao elemento de pá são expressos respectivamente por (*cr*) e (βr).

O ângulo de ataque (α) é especificado através do diagrama polar do perfil aerodinâmico aplicado aos elementos de pás. Este ângulo deve permanecer constante ao longo da pá eólica,

mantendo a melhor relação entre os coeficientes de sustentação (C_L) e arrasto (C_D). Assim sendo, o ângulo de ataque apresenta valor único em todos os elementos de pá.

O ângulo de fluxo (φ) é definido pela soma do ângulo de ataque e o ângulo de passo (Burton et al. 2021). Portanto, o ângulo de passo associado ao elemento de pá (βr) somado ao ângulo de fluxo, constante ao longo da pá, determina o ângulo de fluxo associados ao elemento de pá (φr). A variação do ângulo de passo associado ao elemento de pá é diretamente proporcional a variação do ângulo de fluxo associado ao elemento de pá (Burton et al. 2021).

A análise da seção transversal do elemento de pá fundamentada na velocidade tangencial líquida ($\Omega r (1+a')$), velocidade da corrente livre líquida ($U_{\infty}(1-a)$), ângulos de fluxo (φ), ângulo de passo (β) e ângulo de ataque (α), origina o triângulo de velocidades mostrado na Figura 2.16.



Figura 2.16 - Triângulo de velocidades associado ao elemento de pá Fonte: Burton et al. (2021)

O triângulo de velocidades introduz a velocidade relativa (W) na análise do elemento de pá (Burton et al. 2021). A velocidade relativa intrínseca ao elemento de pá (Wr) é determinada através Equação (2.2) (Burton et al. 2021).

$$W_r = \sqrt{U_\infty^2 (1-a)^2 + r^2 \Omega^2 (1+a')^2}$$
(2.2)

A razão de velocidades no elemento de pá (λ_r) é definida pela Equação (2.3) através da razão entre a velocidade tangencial no elemento de pá e a velocidade do vento (Burton et al. 2021).

$$\lambda_r = \frac{\Omega r}{U_{\infty}} \tag{2.3}$$

$$\mu_r = \frac{r}{R} \tag{2.4}$$

O ângulo de fluxo do elemento de pá em um dado raio (φ_r) é determinado pela Equação (2.5) (Burton et al. 2021).

$$\varphi_r = \arctan\left(\frac{1-a}{\lambda_r(1+a')}\right)$$
(2.5)

A geração da geometria dos elementos de pá é estabelecida pela especificação de um perfil aerodinâmico, do ângulo de passo e da corda (Burton et al. 2021).

O ângulo de passo do elemento de pá sob determinado raio (β_r) é obtido pela Equação (2.6) (Burton et al. 2021).

$$\beta_r = \varphi_r - \alpha \tag{2.6}$$

A corda do elemento de pá em um determinado raio (c_r) é determinado pela Equação (2.7) (Burton et al. 2021).

$$c_r = \frac{8\pi a (1-a)\mu_r R U_{\infty}^2}{N_{P\dot{A}_L P} W_r^2 (C_L \cos(\varphi_r) + C_D \sin(\varphi_r))}$$
(2.7)

2.8.DINÂMICA DOS FLUIDOS COMPUTACIONAL (CFD)

A dinâmica dos fluidos computacional, CFD ou fluidodinâmica computacional consiste em uma metodologia que, por meio de simulação computacional, realiza a análise numérica de fenômenos físicos e/ou físico-químicos (escoamento de fluidos, transferências de calor, reações químicas e outros fenômenos relacionados) de sistemas (Versteeg e Malalasekera, 2007). Estes fenômenos são complexos e, em sua maioria, não podem ser analisados através de métodos analíticos. Logo, a fluidodinâmica computacional é aplicada para obter-se uma aproximação realista do sistema analisado (Versteeg e Malalasekera, 2007).

Na fluidodinâmica computacional é essencial que seja realizada a correta caracterização do sistema, sendo esta fundamentada na definição da apropriada geometria da região analisada (domínio), na aplicação ou negligenciamento de condições de contorno, na especificação dos

fenômenos físicos e/ou físico-químicos pertinentes, assim como nas propriedades dos materiais envolvidos (Versteeg e Malalasekera, 2007). A caracterização do sistema é fundamentada no objetivo de redução de complexidade a níveis gerenciáveis, e concomitantemente, preservar características físicas/ou físico-químicos essenciais a fluidodinâmica computacional (Versteeg e Malalasekera, 2007).

A geração de malha consiste numa atividade preponderante à fluidodinâmica computacional, visto que é determinante para a obtenção de simulações bem-sucedidas (convergentes), as quais apresentam resultados que descrevem de modo fidedigno o fenômeno simulado (Versteeg e Malalasekera, 2007). Este procedimento consiste na subdivisão do domínio computacional em subdomínios menores e não sobrepostos denominados elementos de malha (Versteg e Malalasekera, 2007). A solução numérica é obtida através da fluidodinâmica computacional é determinada em nós dos elementos de malha (Versteeg e Malalasekera, 2007). A precisão da solução CFD é estabelecida pelo número de elementos da malha, portanto o refinamento de malha eleva a precisão da solução e a demanda computacional (Versteeg e Malalasekera, 2007). As malhas otimizadas não são uniformes, apresentando-se refinadas (elementos de malha de pequenas dimensões) em regiões onde ocorrem grandes variações nos fenômenos estudados e mais grossas (elementos de malha de grandes dimensões) em regiões sob baixas variações destes fenômenos (Versteeg e Malalasekera, 2007).

A metodologia aplicada à fluidodinâmica computacional do concentrador híbrido consiste na técnica de solução numérica dos volumes finitos.Este método apresenta ampla aplicabilidade, pois é abrangente a análises CFD de geometrias simples e complexas, assim como permite a utilização irrestrita de todos os tipos de malhas (Versteeg e Malalasekera, 2007).

O método dos volumes finitos consiste fundamentalmente numa formulação singular das diferenças finitas (Versteeg e Malalasekera, 2007). A principal característica que distingue o método dos volumes finitos de outras técnicas aplicadas ao CFD é a integração do volume de controle analisado (Versteeg e Malalasekera, 2007). Assim sendo, o algoritmo deste solver promove primeiramente a integração das equações associadas ao estudo com relação a todos os volumes finitos do domínio (Versteeg e Malalasekera, 2007). Posteriormente, promove a discretização das equações integrais em algébricas (Versteeg e Malalasekera, 2007). A discretização das equações integrais gera um sistema de equações algébricas lineares, que apresentam número e complexidade fundamentada nos fenômenos físicos analisados / malha aplicada, assim como a metodologia de discretização adotada(Versteeg e Malalasekera, 2007). A discretização estabelece tratamento adequado das equações associadas aos principais fenômenos de transporte, aos termos fonte e a taxa de variação em relação ao tempo (Versteeg

e Malalasekera, 2007). Por fim, o algoritmo numérico promove a solução das equações algébricas pela aplicação de métodos diretos e métodos indiretos / iterativos (Versteeg e Malalasekera, 2007).

A metodologia da fluidodinâmica computacional é composta por um conjunto de equações, sendo sua formulação matemática fundamental demonstrada no Apêndice A.

2.8.1.ESCOAMENTOS TURBULENTOS

O regime de escoamento dos fluidos consiste num conceito fundamental da mecânica dos fluidos, pois classifica o comportamento dos escoamentos fluidos em variadas condições de contorno (Schaffarczyk, 2014; White, 2015). O regime de escoamento dos fluidos pode ser classificado em permanente, não permanente ou estacionário, uniforme ou variado, rotacional ou irrotacional e laminar ou turbulento (Schaffarczyk, 2014; White, 2015). Na fluidodinâmica computacional do concentrador híbrido, sobretudo na análise da conversão de energia eólica, o regime de escoamento turbulento é preponderante.

O regime de escoamento laminar é caracterizado por movimentos de partículas de fluido de baixa viscosidade (geralmente considerados não viscosos) em camadas ordenadas, paralelas e com fluxo suave (Schaffarczyk, 2014; White, 2015). Entretanto, o regime turbulento é observado nos escoamentos de fluidos viscosos, onde as partículas do fluido se movem de maneira caótica e desordenada. Neste regime de escoamento, as trajetórias das partículas fluidas são complexas e imprevisíveis (Schaffarczyk, 2014; White, 2015).

A classificação do regime de escoamento em laminar ou turbulento é determinado sobretudo pelo número de Reynolds, o qual considera a dimensão do sistema e a velocidade, densidade e viscosidade do fluido (Schaffarczyk, 2014; White, 2015). Escoamentos estabelecidos sob baixos números de Reynolds são denominados laminares e escoamentos caracterizados por altos números de Reynolds são denominados turbulentos (Schaffarczyk, 2014; White, 2015).

As equações aplicados ao modelamento matemático de escoamentos laminares são usualmente resolvidas analiticamente devido sua simplicidade (Versteeg e Malalasekera, 2007). Entretanto, escoamentos turbulentos são complexos e frequentemente abordados através da fluidodinâmica computacional mediante aplicação do método dos volumes finitos (Versteeg e Malalasekera, 2007). A maioria dos escoamentos intrínsecos a aplicações em engenharia são turbulentos, portanto, este regime de escoamento não se restringe exclusivamente ao interesse teórico (Versteeg e Malalasekera, 2007).

A visualização de escoamentos turbulentos demonstra a presença de estruturas de fluxo rotacional, denominados vórtices (Versteeg e Malalasekera, 2007). Escoamentos turbulentos,

sobretudo vórtices, apresentam movimentação caótica, aleatória e instável das partículas do fluido (Versteeg e Malalasekera, 2007). Esta movimentação de partículas intrínseca ao escoamento turbulento determina maior eficiência na transferência de calor e difusão de massa, quando comparado ao escoamento laminar (Versteeg e Malalasekera, 2007).

Os grandes vórtices extraem energia do escoamento médio por meio de um processo denominado alongamento de vórtice (Versteeg e Malalasekera, 2007). Conclusivamente, este processo fornece a energia que mantém a turbulência (Versteeg e Malalasekera, 2007).

Os grandes vórtices são determinados pelos efeitos inerciais, sendo os efeitos viscosos insignificantes (Versteeg e Malalasekera, 2007). Portanto, grandes vórtices são efetivamente invíscidos, sendo conservado o momento angular durante o processo de alongamento de vórtice (Versteeg e Malalasekera, 2007).

Os pequenos vórtices são alongados predominantemente pelos grandes vórtices e infimamente pelo escoamento médio (Versteeg e Malalasekera, 2007). Logo, a energia dos grandes vórtices é transferida aos pequenos vórtices através do processo denominado cascata de energia. (Versteeg e Malalasekera, 2007).

Os vórtices apresentam sua energia expressa através de uma ampla gama de frequências (Versteeg e Malalasekera, 2007). Os grandes vórtices apresentam sua energia expressa nas baixas frequências, condição que denota altos níveis de energia. (Versteeg e Malalasekera, 2007). Logo, os pequenos vórtices apresentam sua energia expressa em altas frequências, condição esta que denota baixos níveis de energia (Versteeg e Malalasekera, 2007).

As menores escalas de movimento em um escoamento turbulento são determinadas pelos efeitos viscosos (Versteeg e Malalasekera, 2007). Nestas escalas, o movimento contrapõe a ação das tensões viscosas, de modo que a energia associada aos movimentos é dissipada e convertida em energia interna térmica (Versteeg e Malalasekera, 2007). Esta dissipação resulta em maiores perdas de energia associadas a fluxos turbulentos (Versteeg e Malalasekera, 2007).

2.8.1.1.MODELO DE TURBULÊNCIA k-ω SST

A fluidodinâmica computacional aplicada ao estudo de otimização do concentrador híbrido foi desenvolvida pela utilização do modelo de turbulência k- ω SST (*Shear Stress Transport*). Fundamentado no modelo k- ω (proposto por David C. Wilcox) e k- ε (proposto por Brian Edward Launder e Dudley Brian Spalding), o modelo k- ω SST de Florian R. Menter teve seu desenvolvido orientado pelo objetivo de unir as principais características destes dois modelos de turbulência (Versteeg e Malalasekera, 2007). O modelo k- ε apresenta boa precisão e robustez em regiões afastadas da parede (Versteeg e Malalasekera, 2007). O modelo k- ω apresenta bons resultados em regiões próximas às paredes (através da utilização de funções de amortecimento) e bom desempenho na presença de gradientes de pressão adverso (Versteeg e Malalasekera, 2007). Deste modo, o modelo de turbulência k- ω SST consiste num modelo híbrido que, mediante função de acoplamento, aplica o modelo k- ε nas camadas de cisalhamento livre e o modelo k- ω próximo a superfícies e paredes (Versteeg e Malalasekera, 2007).

A simples combinação dos modelos k- ω e k- ε resulta em um modelo impreciso na região do ponto de separação do escoamento numa superfície lisa. Objetivando corrigir essa deficiência, Menter propôs a adoção de um limitador para o valor da viscosidade turbulenta (Versteeg e Malalasekera, 2007).

O modelo k- ω SST é fundamentado no transporte da tensão de cisalhamento turbulento (*Shear Stress Transport*), introduzindo um limite superior de tensão de cisalhamento na camada limite (Versteeg e Malalasekera, 2007). Deste modo, é adequado em aplicações caracterizadas por turbulência de alta intensidade de cisalhamento, fornecendo resultados precisos (Versteeg e Malalasekera, 2007). A tensão de Reynolds no modelo de turbulência k- ω SST é igualmente estabelecida pelo modelo k- ω original de David C. Wilcox (Versteeg e Malalasekera, 2007).

O modelo proposto por Florian R. Menter consiste numa abordagem mais precisa para simulação de fluxos turbulentos recorrentes em análises de engenharia (Versteeg e Malalasekera, 2007). A aplicação deste modelo é adequada em todo o campo de escoamentos, visto que o modelo k- ω é apropriado em simulações numéricas de escoamentos na subcamada viscosa e o modelo k- ε é eficaz na predição do comportamento de fluxos em regiões afastadas da parede (Versteeg e Malalasekera, 2007). Este modelo é capaz de reproduzir de forma mais precisa os efeitos da turbulência na transferência de calor, na mistura de fluidos e na formação de vórtices, resultando em simulações mais realistas e confiáveis (Versteeg e Malalasekera, 2007). Entretanto, devido a suas características intrínsecas, o modelo k- ω SST é particularmente aplicado em regiões de fluxo separado e transição laminar turbulento de forma mais precisa do que outros modelos de turbulência, estabelecendo resultados altamente precisos nas condições de separação de fluxo em gradientes de pressão adversos (Versteeg e Malalasekera, 2007).

Conclusivamente, o modelo de turbulência k- ω SST consiste numa importante ferramenta para a simulação de turbulência na fluidodinâmica computacional (Versteeg e Malalasekera, 2007). Sua concepção, fundamentada em dois modelos de turbulência atribui a este a capacidade de apresentar resultados precisos para uma ampla gama de condições de fluxo, tornam este modelo altamente aplicável na fluidodinâmica computacional (Versteeg e Malalasekera, 2007).

2.9.MÉTODOS DE OTIMIZAÇÃO

Os métodos de otimização são fundamentados em técnicas matemáticas, estatísticas e em algoritmos específicos para a determinação de uma ou mais soluções que proporcionem o melhor resultado sob restrições, objetivos e espaço de busca (Martins e Ning, 2021; Sharma et al. 2021, Rao, 2020). A otimização apresenta ampla aplicabilidade, abrangendo diversas áreas como engenharia, medicina, economia, computação e logística (Martins e Ning, 2021; Sharma et al. 2021, Rao, 2020). Os objetivos da otimização comumente consistem na maximização de resultados desejados (lucro, produtividade, qualidade e eficiência) ou minimização de resultados indesejados (custos, refugos e perdas) (Martins e Ning, 2021; Sharma et al. 2021, Rao, 2020).

Os objetivos da otimização são expressos através da função objetivo, a qual é composta por uma ou mais variáveis que se pretende otimizar; portanto, minimizando-a ou maximizando-a (Martins e Ning, 2021; Sharma et al. 2021, Rao, 2020). As soluções viáveis ou pontos ótimos consistem nos resultados ou pontos de projeto em um determinado espaço de busca que minimizam ou maximizam a função objetivo e concomitantemente satisfazem as restrições préestabelecidas (Martins e Ning, 2021; Sharma et al. 2021, Rao, 2020). As restrições são funções de igualdade ou desigualdade que descrevem situações consideradas não desejáveis ou não aceitáveis (Martins e Ning, 2021; Sharma et al. 2021, Rao, 2020). O espaço de busca consiste na região delimitada pelas funções de restrição onde a otimização é efetivamente realizada (Martins e Ning, 2021; Sharma et al. 2021, Rao, 2020). O valor ótimo consiste no valor da função objetivo no ponto ótimo, ou seja, no ponto de projeto otimizado (Martins e Ning, 2021; Sharma et al. 2021, Rao, 2020).

Estudos de otimização que compreendem um único objetivo são chamados simples objetivo ou mono-objetivo (Pereira et al. 2022; Cui et al. 2022; Rao, 2020). Contudo, estudos compostos por dois ou mais objetivos são denominados multiobjetivo("*MOO-Multiobjective Optimization*") ou multicritério (Pereira et al. 2022; Cui et al. 2022; Rao, 2020).

A otimização multiobjetivo consiste geralmente num estudo de alta complexidade, composto por objetivos conflitantes entre si que resultam em um conjunto de soluções não dominadas (Pereira et al. 2022; Cui et al. 2022; Rao, 2020). As soluções não dominadas apresentam a singular característica de ser intangível qualquer evolução de desempenho em relação a todos os objetivos simultaneamente sem ocasionar a involução em pelo menos um dos objetivos (Pereira et al. 2022; Cui et al. 2022; Rao, 2020). Uma solução é não dominada se esta não for dominada por nenhuma outra solução, ou seja, se não houver outra solução que seja igual ou melhor em todos os critérios (Pereira et al. 2022; Cui et al. 2020). O conjunto de soluções não dominadas compõe a denominada fronteira de Pareto, a qual consiste no conjunto

de soluções que representam a melhor relação entre os objetivos da otimização (Pereira et al. 2022; Cui et al. 2022; Rao, 2020).

A otimização de projetos de engenharia consiste num processo fundamental à garantia de projetos eficientes, econômicos e sobretudo, que apresentem desempenho otimizado (Pereira et al. (2022); Martins e Ning, 2021; Rao, 2020). Os estudos de otimização de projetos de engenharia são usualmente realizados na etapa de desenvolvimento de "*design*" (geometria), gerando "*trade-offs*" entre diferentes variáveis geométricas para a obtenção de soluções que maximizem o desempenho do produto otimizado (Pereira et al. (2022); Martins e Ning, 2021; Rao, 2020). Os estudos de otimização de projetos de engenharia são comumente estabelecidos em múltiplos objetivos conflitantes, maximizando e/ou minimizando simultaneamente numerosas funções (Pereira et al. 2022; Martins e Ning, 2021; Rao, 2020). Portanto, os estudos de otimização de projetos de engenharia são comumente, os estudos de otimização de projetos de engenharia são comumente et al. (2022); Martins e Ning, 2021; Rao, 2020).

O estudo de otimização geométrica multiobjetivo do concentrador híbrido aplicou o algoritmo genético evolutivo (*AGs*) MOGA ("*Multi-Objective Genetic Algorithm*"). Nas seções 2.9.1e 2.9.1.1 serão descritos os algoritmos genéticos e o algoritmo genético evolutivo MOGA, respectivamente.

2.9.1.ALGORITMOS GENÉTICOS (AGs)

A análise estabelecida sob as pesquisas fundamentadas em estudos de otimização demonstra que os métodos clássicos foram amplamente aplicados no passado (Pereira et al. 2022; Martins e Ning, 2021; Rao, 2020). Entretanto, o recente avanço na computação oportunizou o desenvolvimento de poderosos algoritmos capazes de solucionar otimizações compostas por grandes números de variáveis, objetivos e não linearidades (Pereira et al. 2022). Dentre estes desenvolvimentos, os algoritmos metaheurísticos têm se destacados para a determinação de soluções ótimas nas condições propostas nas quais poucos dados são disponibilizados (Pereira et al. 2022). Estes algoritmos empregam um certo grau de aleatoriedade na determinação das soluções candidatas, sendo estas posteriormente testadas para que sua otimalidade seja averiguada (Pereira et al. 2022). Os algoritmos metaheurísticos Lichtenberg e colônias de formigas/abelhas têm se destacado pela significante aplicação em estudos de otimizações complexas (Pereira et al. 2022). Entretanto, atualmente, os algoritmos genéticos consistem na classe metaheurística de maior aplicabilidade na engenharia, sobretudo no aproveitamento de energia, em projetos, processos de fabricação e no monitoramento estrutural (Pereira et al. 2022; Cui et al.2022).

Os algoritmos genéticos (AGs) foram concebidos por John Holland entre as décadas de 1960 e 1970, sendo fundamentados na teoria da adaptação das espécies e seleção natural (Oliver, 2018; Sivanandam e Deepa, 2008). Estes algoritmos compõe a área da computação evolutiva, que constitui uma família de métodos computacionais inspirados na evolução natural das espécies (Oliver, 2018; Sivanandam e Deepa, 2008).

Os AGs consistem numa classe de métodos de otimização estocástica que através de modelos matemáticos reproduzem os mecanismos de evolução natural das espécies propostos por Darwin(Oliver,2018;Sivanandam e Deepa,2008).Portanto, estes algoritmos são fundamentados nos conceitos de genes, cromossomos, cruzamento, mutação e seleção natural (Oliver,2018; Sivanandam e Deepa, 2008). A seguir são apresentados os conceitos fundamentais dos algoritmos genéticos:

- População inicial: Consiste no conjunto inicial de soluções candidatas que são geradas aleatoriamente ou pelo método heurístico a fim de iniciar o processo de otimização. A população inicial deve ser diversificada e representativa, garantindo exploração adequada do espaço de busca (Katoch et al. 2022; Oliver, 2018; Sivanandam e Deepa, 2008; Coello et al. 2006).
- Função de aptidão: A função de aptidão é essencialmente a função objetivo, sendo aplicada na avaliação da solução candidata. Esta função atribui valor numérico a cada indivíduo da população. Em relação ao objetivo de maximizar, as soluções candidatas que apresentam altos valores estão mais próximas da solução ótima. Sob objetivo de minimizar, as soluções candidatas que apresentam baixos valores estão mais próximas da solução étima (Katoch et al. 2022; Oliver, 2018; Sivanandam e Deepa, 2008; Coello et al. 2006).
- Representação cromossômica: Consiste numa codificação (binária, números inteiros ou *"strings"*)que representa os cromossomos, permitindo ao algoritmo genético a manipulação da sequência de genes (códigos) pela aplicação de operadores genéticos (recombinação, seleção e mutação), gerando novas soluções candidatas evoluídas (Katoch et al. 2022; Oliver, 2018; Sivanandam e Deepa, 2008; Coello et al. 2006).
- Seleção: Consiste no processo de escolha de soluções candidatas da população atual para a reprodução fundamentada em sua aptidão. A seleção consiste numa etapa crucial ao processo de evolução, determinando quais indivíduos serão responsáveis por transmitir suas cargas genéticas (soluções) as próximas gerações (Katoch et al. 2022; Oliver, 2018; Sivanandam e Deepa, 2008; Coello et al. 2006).
- Cruzamento (Crossover): Consiste em um importante operador genético que introduz o processo de recombinação genética observado na reprodução, onde o material genético

dos pais é combinado para produzir descendentes com características herdadas de ambos. Portanto, o cruzamento oportuniza a geração de novas soluções candidatas a partir de soluções existentes na população atual, combinando partes dos cromossomos (soluções) de dois indivíduos selecionados para gerar novos indivíduos (Katoch et al. 2022; Oliver, 2018; Sivanandam e Deepa, 2008; Coello et al. 2006).

- Substituição: Consiste no processo de seleção de soluções candidatas da população atual que serão substituídos por descendentes. Existem diversos métodos de substituição em algoritmos genéticos (geracional, elitismo, truncamento, estocástica, universal e torneio) sendo que a aplicação do método é fundamentada nas características do estudo proposto e de sua população (Katoch et al. 2022; Oliver, 2018; Sivanandam e Deepa, 2008; Coello et al. 2006).
- Mutação: Consiste num operador genético intrínseco de algoritmos genéticos que introduz aleatoriedade ao processo de evolução, permitindo que a população explore regiões do espaço de busca que podem não ser alcançadas unicamente pelo cruzamento e seleção de indivíduos. A mutação em algoritmos genéticos simula o processo de mutação genética que ocorre naturalmente na reprodução biológica, onde pequenas alterações aleatórias podem surgir nos genes de um organismo (Katoch et al. 2022; Oliver, 2018; Sivanandam e Deepa, 2008; Coello et al. 2006).
- Critério de parada: Consiste na condição pré-estabelecida a qual determina quando o algoritmo deve encerrar a execução dos processos de seleção, cruzamento, substituição e mutação. O critério de parada é fundamentado no número de gerações, na convergência, na estagnação, na solução satisfatória e no tempo de execução (Katoch et al. 2022; Oliver, 2018; Sivanandam e Deepa, 2008; Coello et al. 2006).

Os algoritmos genéticos realizam a simulação da evolução natural de uma população inicial de soluções candidatas, sendo que cada solução é caracterizada como um "indivíduo" dotado de representação cromossômica e aptidão (Oliver, 2018; Sivanandam e Deepa, 2008; Coello et al. 2006). Esta população de soluções candidatas é submetida a múltiplos processos de evolução genética (seleção, cruzamento, substituição e mutação) (Oliver, 2018; Sivanandam e Deepa, 2008; Coello et al. 2006). Estes processos são realizados até seja satisfeito o critério de parada, obtendo a solução ótima (Oliver, 2018; Sivanandam e Deepa, 2008; Coello et al. 2006).

Os algoritmos genéticos estabelecem soluções de alta acuracidade em estudos complexos de otimização sob baixa demanda computacional (Oliver, 2018; Sivanandam e Deepa, 2008; Coello et al. 2006). Estes algoritmos são comumente aplicados a estudos compostos por espaços de busca complexos e de alta dimensionalidade, apresentando robustez na determinação do

ponto ótimo global e no descarte de ótimos locais (Oliver, 2018; Sivanandam e Deepa, 2008; Coello et al. 2006). Os AGs são essencialmente de simples aplicação, apresentando interface com o usuário que dispensa conhecimento detalhado da modelagem envolvida (Oliver, 2018; Sivanandam e Deepa, 2008; Coello et al. 2006).

A inexequibilidade da determinação de soluções ótimas pela aplicação de métodos clássicos torna os algoritmos genéticos uma das opções mais eficientes na otimização multiobjetivo (Oliver, 2018; Sivanandam e Deepa, 2008; Coello et al. 2006). A representação cromossômica consiste numa estrutura essencial a otimização multiobjetivo, pois nesta pode ser codificada múltiplos objetivos simultaneamente (Oliver, 2018; Sivanandam e Deepa, 2008; Coello et al. 2006). A função de aptidão permite a avaliação da qualidade das soluções candidatas de todos objetivos simultaneamente, sendo uma solução considerada melhor que outra se for superior em pelo menos um objetivo e não pior em nenhum outro (Oliver, 2018; Sivanandam e Deepa, 2008; Coello et al. 2006). No processo de reprodução, os algoritmos genéticos utilizam técnicas de seleção multiobjetivo, como o método da roleta ponderada ou seleção por torneio. (Oliver, 2018; Sivanandam e Deepa, 2008; Coello et al. 2006). Em operadores genéticos, como no cruzamento, as trocas de partes dos cromossomos dos indivíduos selecionados são realizadas com base em sua proximidade na frente de Pareto (Oliver, 2018; Sivanandam e Deepa, 2008; Coello et al. 2006). A manutenção da diversidade em otimizações multiobjetivo é vital, visto que oportuniza a exploração eficiente da fronteira de Pareto e evita convergências prematuras (Oliver, 2018; Sivanandam e Deepa, 2008; Coello et al. 2006).

Em suma, os algoritmos genéticos consistem numa técnica poderosa de otimização que aplica conceitos da biologia evolutiva para encontrar soluções para problemas complexos.

2.9.1.1.MOGA ("Multi-Objective Genetic Algorithm")

O algoritmo genético de otimização multiobjetivo ("*Multi-Objective Genetic Algorithm*" - MOGA) desenvolvido por Fonseca e Fleming em 1993 consiste numa abordagem para a determinação de soluções ótimas de Pareto (Gupta e Gupta, 2020; Bagchi, 1999). As soluções ótimo de Pareto estabelecem aos múltiplos objetivos da otimização um estado no qual torna-se impossível melhorar um dos objetivos sem piorar pelo menos um outro (Gupta e Gupta, 2020; Bagchi, 1999). As soluções ótimas de Pareto consistem num conjunto de soluções não dominadas que compõem as denominadas frente ou fronteira de Pareto (Gupta e Gupta, 2020; Bagchi, 1999). Em suma, as soluções do algoritmo MOGA são expressas pelas frente ou fronteira de Pareto (Gupta e Gupta, 2020; Bagchi, 1999).

O MOGA, disponível no módulo de otimização GDO (*Goal Driven Optimization*) do *Ansys DesignXplorer*, consiste em uma derivação híbrida do algoritmo NSGA-II (*Non-Dominated Sorted Genetic Algorithm-II*) (Ansys, 2021). Este algoritmo genético explora as regiões do espaço de solução, buscando um conjunto diversificado de soluções compostas por diversas variáveis que podem ser otimizados ao mesmo tempo (Ansys, 2021).

O MOGA é fundamentado em conceitos de elitismo controlado (Ansys, 2021). O elitismo consiste essencialmente na preservação das melhores soluções encontradas ao longo das iterações do algoritmo, garantindo que elas sejam mantidas na próxima geração, independentemente dos operadores genéticos aplicados (Sivanandam e Deepa, 2008; Bagchi, 1999). O elitismo acentuado pode gerar a estagnação na busca, enquanto o elitismo diminuto pode resultar no descarte de soluções ótimas ao longo das iterações (Sivanandam e Deepa, 2008; Bagchi, 1999). Embora o elitismo seja essencial para garantir a qualidade das soluções encontradas, é importante seu controle a fim de preservar as soluções não dominadas e introduzir novas soluções (Sivanandam e Deepa, 2008).

No MOGA, as soluções constituintes da fronteira de Pareto são segregadas das soluções em evolução, garantindo a exclusão de padrões estabelecidos pela fronteira de Pareto em iterações anteriores(Ansys,2021).Portanto,o MOGA realiza o controle do elitismo evitando convergências errôneas ou prematuras do estudo de otimização (Ansys, 2021). Conclusivamente, o MOGA consiste num algoritmo adequado a aplicação da otimização geométrica multiobjetivo do concentrador híbrido.

2.10.ANÁLISE ECONÔMICA

A análise econômica de sistemas de conversão de energia é comumente fundamentada na aplicação de índices financeiros, que consistem efetivamente em indicadores de desempenho econômico de empreendimentos (Shen et al. 2020). Existem variados índices que fundamentam as análises econômicas de sistemas de conversão de energia para a geração de eletricidade, como o método de análise do sistema de energia (*"energy system costs"*), que apresenta significante aplicação na literatura científica (Hansen et al. 2019). Entretanto, o índice financeiro de maior aplicabilidade entre pesquisadores, investidores, gerentes de projetos e departamentos governamentais consiste no custo nivelado da eletricidade ou LCOE (*"Levelized cost of electricity"*) (Shen et al. 2020). O LCOE expressa o custo unitário de geração de eletricidade de um empreendimento ou de um sistema de conversão de energia ao longo de sua vida util. Este índice financeiro determina o custo unitário fundamentalmente pelo somatório dos custos

de investimentos e operação de um empreendimento ou sistema de conversão de energia dividido pela sua produção de energia.

O LCOE é aplicado de modo geral em análises econômicas estabelecidas sob o comparativo financeiro de diferentes tecnologias de geração de eletricidade, sendo estas fotovoltaicas, concentradores e torres solares, nucleares, geotérmicas, eólicas, hidráulicas, maremotriz, biomassa, híbridos e cogeração (Hansen et al. 2019). Aplicações características fundamentadas neste índice financeiro são descritas nos tópicos a seguir:

• Departamentos governamentais estabelecem em leilões preços em LCOE para a compra de eletricidade especificando a tecnologia aplicada para que investidores, mediante avaliação de custos de seus empreendimentos, possam estabelecer lances (Hansen et al. 2019).

• Fundamentado no preço de mercado de eletricidade expresso em LCOE, pesquisadores, investidores e gestores de projeto avaliam a competitividade de diferentes tecnologias para a estabelecer a viabilidade de investir ou não nos empreendimentos propostos, utilizando o LCOE para determinar o preço no qual um empreendimento é lucrativo (Hansen et al. 2019).

• Pesquisadores utilizam este índice financeiro para avaliar a viabilidade de implementação de sistemas propostos de geração de eletricidade através de análises comparativas com tradicionais tecnologias estabelecidas no mercado (Hansen et al. 2019).

Conclusivamente, o custo nivelado da eletricidade consolidou-se como principal índice financeiro para a análise econômica de sistemas de conversão de energia para a geração de eletricidade. A literatura apresenta vasto conteúdo recente da aplicação do índice financeiro LCOE na análise de viabilidade de implementação de fazendas eólicas, novos conceitos de turbinas eólicas, usinas solares Dish-Stirling, novos sistemas de conversão de energia solar fundamentados em concentradores solares e sistemas híbridos compostos por turbinas eólicas.

Em Zayed et al. (2020), o desempenho diário, mensal e anual de um sistema Dish-Stirling comercial de potência nominal de 25 kW em Tianjin (China) é analisado experimentalmente e por meio de simulação de seu modelo termodinâmico. Os resultados desta análise determinaram a realização de uma análise econômica fundamentado no LCOE para avaliar o custo da eletricidade produzida no ciclo de vida deste sistema. Os resultados demonstram que o sistema Dish-Stirling proposto produz 28,75 MWh anualmente, com uma eficiência global líquida anual de 19,55% e LCOE de 0,2565 U\$/kWh.

Em Ghaithan et al. (2024) é analisado por meio de simulações no System Advisor Model (SAM) o potencial de produção de eletricidade na Arábia Saudita pela aplicação de quatro tecnologias de concentradores solares (calhas parabólicas, torres solares, concentradores solares do tipo prato parabólico e lentes Fresnel). Nesta pesquisa são avaliados o rendimento dos sistemas de conversão de energia e a viabilidade de sua aplicação pelo custo nivelado da energia. A análise concluiu que todos os locais considerados são adequados para a aplicação de tecnologias de conversão de energia solar fundamentados em concentradores solares. Os resultados da simulação revelaram que uma usina solar composta por sistemas Dish-Stirling apresenta 1561 (kWh ano/kW) de razão de eletricidade e potência ("*Energy yield*"), capacidade instalada de 156 GWh/ano, fator de capacidade de 17,8 e LCOE 0,2120 U\$/kWh.

Em Her et al. (2021) foi desenvolvido um estudo de viabilidade de aplicação de turbina eólica de eixo horizontal de 100 kW de potência numa vila no sudoeste do Alasca. O estudo concluiu que este sistema de conversão de energia eólica é adequado para a aplicação proposta, operando sob fator de capacidade de 0,167. O custo nivelado de energia (LCOE) para esta aplicação é de 1,15 U\$/kWh, sendo que o decréscimo deste índice econômico é obtido a partir do aumento de potência da turbina eólica especificada.

Em Mostafaeipour et al. (2020) é desenvolvido no software HOMER uma análise técnica, econômica e ambiental da aplicação de turbinas eólicas para a geração de eletricidade em edifícios residenciais na África do Sul. Os resultados demonstraram que em Port Elizabeth pela aplicação da turbina eólica comercial EOLO de potência de 3kW e geração anual de eletricidade de 7,3 MWh obteve-se o menor custo nivelado de eletricidade; 0,363 U\$/kWh. Em Bloemfontein, a aplicação da turbina eólica comercial Turby de potência de 2,5 kW e geração anual de eletricidade de 1,5 MWh determinou a obtenção do maior LCOE; 1,601 U\$/kWh.

Em Shboul et al. (2021), um novo sistema híbrido de conversão de energia renovável para a produção de eletricidade é proposto, projetado e analisado tecnicamente / economicamente. Este sistema, que consiste num contraponto ao típico sistema híbrido constituído por painéis fotovoltaicos e turbinas eólicas, é composto por sistemas Dish-Stirling e turbinas eólicas de eixo horizontal integradas ao banco de baterias. A proposta deste estudo apresenta os sistemas Dish-Stirling como a fonte primária de geração de eletricidade e as turbinas eólicas associada a um banco de baterias, fornecendo eletricidade quando a fonte primária não está operando. Este sistema foi modelado e simulado em duas localidades na Jordânia, composto por sistemas Dish-Stirling desenvolvendo potência de 1.500 kW e turbinas eólicas operando sob coeficiente de potência de 0,2 a 0,24 e potência total de 100 kW. O custo nivelado da eletricidade destas usinas híbridas foram de 0,13 e 0,15 U\$/kWh.

3.METODOLOGIA

3.1.REVISÃO DE PROJETO DO CONCENTRADOR HÍBRIDO

Os estudos iniciais de desenvolvimento do concentrador híbrido foram fundamentalmente executados para o atendimento de seu principal objetivo; a definição de um novo conceito de concentrador que promovesse a conversão de energia solar e eólica. Deste modo, considerando a metodologia do processo de desenvolvimento de produtos, o projeto inicial do concentrador híbrido foi estabelecido na fase de projeto conceitual (Rozenfeld et al. 2006).

Precedentemente ao estudo de otimização geométrica multiobjetivo, o projeto inicial do concentrador híbrido deve ser submetido a uma revisão, conforme metodologia de gestão de desenvolvimento de produtos (GDP), a qual determina que a revisão de projeto seja realizada antes da otimização (Rozenfeld et al. 2006). A revisão de projetos consiste em uma sistemática e abrangente análise de projeto, objetivando a identificação de problemas e solução dos mesmos (Rozenfeld et al. 2006). A revisão de projetos e o estudo de otimização são procedimentos intrínsecos da fase do projeto detalhado, conforme metodologia GDP.

A revisão de projeto será estabelecida a partir da geometria inicial do concentrador híbrido do tipo disco parabólico. Esta revisão foi fundamentada no estudo do escoamento da corrente livre através do concentrador e na análise da incidência / reflexão da irradiância solar em seus refletores, objetivando identificar possíveis correções na geometria conceitual e estabelecendo, portanto, conversão de energia mais eficiente.

A revisão de projeto foi desenvolvida através de estudos CFD, utilizando os mesmos softwares de geração de geometria, malha e simulação numérica aplicados ao estudo de otimização.

3.2.OTIMIZAÇÃO DO CONCENTRADOR HÍBRIDO

A otimização geométrica do concentrador híbrido do tipo disco parabólico é fundamentada no estudo parametrizado estabelecido em determinadas variáveis de projeto (dados de entrada) e na eficiência do sistema híbrido em termos de geração de eletricidade (resposta de projeto), orientado pelo objetivo da determinação do ponto de projeto que estabeleça a maximização da geração de eletricidade do sistema híbrido proposto.

A otimização proposta foi desenvolvida pela aplicação do *Ansys Workbench*, o qual consiste numa plataforma de gerenciamento de ferramentas computacionais aplicada a diversos tipos de análises, sobretudo, em dinâmica dos fluidos computacional (Ansys, 2021). Este gerenciamento, o qual é realizado pelo autor da análise, consiste na especificação de softwares adequados e de

fluxo de operações/dados a serem executados(Ansys,2021). Após estas especificações, o *Ansys Workbench* promoverá a realização sequencial das operações para que a análise proposta seja efetuada (Ansys, 2021).

A tabela de parâmetros do *Ansys Workbench* ("*Parameters Set*") consiste num recurso vital que viabilizou tecnicamente a otimização geométrica do concentrador híbrido, pois através deste foi possível parametrizar as variáveis geométricas do concentrador híbrido.Este recuso, aplicado em estudos parametrizados, permite ao autor da análise ou aos softwares associados ao *Ansys Workbench* a modificação de parâmetros a cada análise realizada demonstrando, portanto, os impactos desta alteração nos resultados obtidos(Ansys,2021).

A otimização geométrica do concentrador híbrido foi estruturada pela integração entre os softwares de geração de geometria (*Design Modeler*), malha (*Meshing*), dinâmica dos fluidos computacional (*Fluent*) e a otimização (*DesignXplorer*). A Figura 3.1 apresenta a integração entre softwares aplicados na otimização do concentrador híbrido, promovida pelo *Ansys Workbench*.



Figura 3.1 - Integração entre softwares no Ansys Workbench estabelecida a otimização.

Estudos fundamentados em parametrizações geométricas associadas ao CFD (Moreira et al. 2020) são metodologias robustas e amplamente aplicadas a otimização de projetos de engenharia (Ansys 2021). Logo, a metodologia aplicada na obtenção dos pontos de projeto aplicados a otimização do concentrador híbrido é robusta, sendo integralmente realizada através de ferramentas computacionais *Ansys*.

O estudos de otimização paramétrico consiste em uma das principais funcionalidades do *DesignXplorer* (Ansys, 2021). Este módulo, em um número significativo de variáveis de projeto e sob objetivo(s) de otimização definidos, determina o ponto ótimo do projeto através de processo autônomo de execução das simulações em diferentes combinações de variáveis de projeto (Ansys, 2021).

Na Figura 3.2 é demonstrado o fluxo de operações e dados estabelecido no *Ansys Workbench* para o estudo da otimização geométrica do concentrador híbrido.



Figura 3.2 - Fluxo estruturado no Ansys Workbench para a realização da otimização.

O fluxo da Figura 3.2 demonstra que a otimização do concentrador híbrido foi fundamentada no estudo parametrizado de variáveis geométricas mediante geração de geometrias e malhas associadas ao CFD, o qual oportuniza a obtenção do torque e reflexão solar para cada ponto de projeto. A tabela de parâmetros do *Ansys Workbench* permite que sejam aplicadas equações de alta complexidade, determinado a utilização deste recurso para o modelamento térmico do sistema de conversão de energia solar e o equacionamento da geração de eletricidade do sistema híbrido. Neste mesmo fluxo, é demonstrado que o *Ansys Workbench*, a partir da parametrização das variáveis geométricas e da geração automática de geometrias e malhas, oportunizou que fossem realizadas simulações CFD para cada ponto de projeto especificado pelo *DesignXplorer*. Os resultados das simulações CFD alimentam o software de otimização para obtenção da geometria otimizada do concentrador híbrido. Em suma, este fluxo descreve o estudo de otimização proposto ao concentrador híbrido do tipo disco parabólico.

3.2.1.ESPECIFICAÇÕES DE PROJETO DO CONCENTRADOR HÍBRIDO

O projeto inicial do concentrador híbrido e a otimização geométrica proposta são estudos orientados na conversão de energia, não abordando análises estruturais.Logo, as especificações de projetos do concentrador híbrido foram estabelecidas exclusivamente numa perspectiva de conversão de energia solar e eólica.

As especificações de projeto do concentrador híbrido foram definidas, sobretudo, em seu projeto inicial e complementadas neste estudo de otimização. A análise desenvolvida sob as especificações de projeto demonstra que algumas destas são parâmetros de projeto e outras são variáveis geométricas que influenciam ou não na conversão de energia. Nas seções 3.2.1.1 e 3.2.1.2, as especificações de projeto são descritas e classificadas em parâmetros de projeto ou variáveis geométricas efetivas na conversão de energia do concentrador.

3.2.1.1.PARÂMETROS DE PROJETO DO CONCENTRADOR HÍBRIDO

Algumas especificações de projeto do concentrador híbrido são efetivamente parâmetros de projeto devido a estes serem estabelecidos segundo demandas requeridas (potência / geração de eletricidade), condições de contorno (disponibilidade das fontes de energia renováveis) e recomendações de referências bibliográficas.

As condições de contorno conferentes as disponibilidades das fontes de energia renováveis são parâmetros de projeto preponderantes ao estudo de otimização do concentrador híbrido, pois determinam seu principal objetivo; a geração de eletricidade do sistema híbrido proposto.

Os parâmetros de projeto relacionados as disponibilidades das fontes de energia renováveis foram estabelecidos a partir de dados obtidos no estudo desenvolvido sob o projeto inicial do concentrador híbrido. Este estudo, detalhado no Apêndice B, especificou a instalação do sistema híbrido proposto em Aracati-CE, em virtude de a localidade apresentar alta irradiância solar associada a alta potência eólica sob frequente ocorrência de ventos. A Tabela 3.1 apresenta os valores atribuídos aos parâmetros de projeto das fontes de energia renováveis em Aracati-CE.

Parâmetros	Simbologia	Unidade	Valor numérico
Velocidade média anual do vento	(U_{∞})	[m/s]	6
Fator de capacidade eólico	(FCE)	-	0,402
Potência eólica média anual disponível	(P_{ED})	$[W/m^2]$	217
Irradiância solar média anual	(I)	$[kW/m^2]$	0,575
Font	e: Apêndice B		

Tabela 3.1 - Parâmetros de projeto relativos as fontes de energia renováveis.

Os parâmetros de projeto compreendidos pelo atendimento de demandas, limitações físicas e especificações recomendadas consistem no diâmetro do concentrador (D_c), material do refletor e especificação do perfil aerodinâmico aplicado as pás eólicas.

O diâmetro do concentrador consiste num parâmetro de projeto de grande relevância, pois é determinante na potência disponível ao receptor de sistemas Dish-Stirling, sendo comumente especificado entre três e quinze metros (Hafez et al. 2017). Estudos estabelecidos na otimização

de custos de concentradores solares do tipo disco parabólico demonstraram que o diâmetro máximo a ser aplicado varia entre 10 e 12 metros (Enteria e Akbarzadeh, 2014). Estes mesmos estudos concluíram que a especificação ótima de diâmetro de concentradores solares do tipo disco parabólico, considerando o aspecto técnico-econômico, está entre quatro e oito metros (Enteria e Akbarzadeh, 2014). Por conseguinte, no projeto inicial foi aplicado o diâmetro médio deste intervalo (seis metros) para a especificação do concentrador híbrido.

O material do refletor consiste num dos parâmetros de projeto de maior importância ao projeto de concentradores solares, pois assim como o diâmetro do concentrador, é determinante na potência disponível ao receptor de sistemas Dish-Stirling(Hafez et al. 2016). As propriedades intrínsecas dos materiais aplicados a refletores são a reflexibilidade (δ_R) e a emissividade (ε) (Hafez et al. 2016). A reflexibilidade determina a porcentagem de irradiância solar disponível ao receptor, portanto, é efetiva no rendimento de sistemas Dish-Stirling (Hafez et al. 2016). O alumínio foi o material especificado ao refletor do concentrador híbrido, sendo este comumente aplicado em concentradores solares do tipo disco parabólico, apresentando reflexibilidade de 0,96 e emissividade de 0,04, conforme Hafez et al. (2016).

O perfil aerodinâmico aplicado a seção transversal das pás eólicas do concentrador híbrido consiste no NACA 4415, especificação fundamentada na análise realizada no projeto inicial do concentrador híbrido. Esta análise foi estabelecida sobretudo na premissa de que a especificação do perfil aerodinâmico aplicado à seção transversal das pás do concentrador híbrido deveria ser restrita a perfis NACA de quatro dígitos. Isto porque estes perfis NACA são comumente aplicados ao projeto de pás de rotores eólicos de turbinas de eixo horizontal (Manwell et al., 2010). A alta aplicabilidade do perfil aerodinâmico NACA 4415 em projetos de rotores eólicos constitui numa característica amplamente reconhecida na literatura científica (Burton et al., 2011). Logo, esta característica atribuída ao perfil aerodinâmico NACA 4415 consolidou sua especificação à seção transversal das pás do concentrador híbrido sua projeto inicial.

Os coeficientes de arrasto e sustentação de projeto das pás eólicas consistem em grandezas adimensionais de grande relevância a eficiência da conversão de energia eólica, sendo determinados pelo perfil aerodinâmico aplicado, ângulo de ataque e número de Reynolds do escoamento(Manwell et al. 2010).O ângulo de ataque consiste na variação angular estabelecida entre a direção da velocidade da corrente livre e a corda do perfil aerodinâmico (Manwell et al. 2010).

O ângulo de ataque e os coeficientes de sustentação e arrasto aplicados ao projeto inicial do concentrador híbrido foram especificados a partir do Reynolds de projeto e pela utilização do

Parâmetros	Simbologia	Unidade	Valor numérico
Ângulo de ataque	(α)	[°]	4,75
Coeficiente de sustentação	(C_L)	-	0,99
Coeficiente de arrasto	(<i>C</i> _{<i>D</i>})	-	0,01
Coenciente de arrasto	(CD) Fonte: Apêndice C	-	0,01

Tabela 3.2 - Projeto das pás eólicas; ângulo de ataque, coeficientes de sustentação e arrasto

Estes três parâmetros de projeto são determinantes na geometria das pás eólicas concebidas pela aplicação da teoria do momento do elemento de pá (Manwell et al. 2010), afirmação a qual é indubitavelmente verificada através das equações (2.6) e (2.7).

O número de pás (N_{Pa}) consiste num parâmetro de projeto do concentrador híbrido o qual foi especificado segundo análise desenvolvida no projeto inicial do concentrador híbrido. Uma análise preliminar em CFD demonstrou que a aplicação de número de pás reduzidos resulta em grande estagnação da corrente livre no concentrador e, por conseguinte, sensível diminuição de torque. Deste modo, a análise descrita no Apêndice D fundamentada no conceito de solidez, na tradicional relação entre velocidade na ponta da pá / números de pás e na geometria do concentrador híbrido, concluiu que o número de pás ideal ao concentrador híbrido consiste em vinte, sendo este especificado a otimização. Neste mesmo estudo, verificou-se que a aplicação do número real de pás no equacionamento do BEM geram perfis aerodinâmicos de dimensões que impossibilitam o posicionamento dos refletores entre as pás. Portanto, criou-se um novo parâmetro aplicado ao equacionamento do BEM denominado número de pás de projeto $(N_{PA/p})$, o qual é especificado em 50% do número real de pás, permitindo a aplicação dos refletores no concentrador híbrido. Este estudo também oportunizou a especificação preliminar da velocidade angular do concentrador em 20 RPM, sendo esta validada através da metodologia proposta no Apêndice D. Logo, esta velocidade angular foi aplicada ao concentrador híbrido na otimização proposta.

O número de elementos de pá (*b*) consiste num parâmetro de projeto intrínseco ao BEM, sendo este especificado em dez, conforme recomendação de Tossas e Leonardi (2012).

O rendimento do gerador elétrico (η_{GE}) aplicado aos sistemas de conversão de energia solar e eólica foi especificado em 0,9; conforme Castellanos et al. (2017) e Burton et al. (2011).

3.2.1.2.VARIÁVEIS GEOMÉTRICAS APLICADAS NA OTIMIZAÇÃO

O projeto do concentrador híbrido é composto por grande número de variáveis geométricas. A maioria destas não influenciam na conversão de energia solar e eólica realizada pelo sistema híbrido. Entretanto, algumas destas, são determinantes para as conversões de energia.

Deste modo, foi realizada uma análise baseada nos resultados e conclusões do projeto inicial do concentrador híbrido para a identificação das variáveis geométricas do concentrador híbrido preponderantes nas conversões de energia solar e eólica. Nas seções de 3.2.1.2.1 a 3.2.1.2.3 são discriminadas estas variáveis geométricas e as justificativas técnicas para que fossem aplicadas ao estudo de otimização. Nestas seções serão especificados e justificados os valores dos limites inferior e superior de cada variável aplicados sobretudo no planejamento de experimentos (*design of experiments* - DOE).

3.2.1.2.1. ÂNGULO DE CURVATURA DOS REFLETORES

Os refletores de concentradores do tipo disco parabólico apresentam superfície estabelecida por paraboloides de revolução, sendo o ângulo de curvatura (φc) uma característica geométrica de grande relevância na conversão de energia solar (Hafez et al. 2016) (Coventry e Andraka, 2017), O ângulo de curvatura determina a área de reflexão e, consequentemente, a potência disponível para a conversão de energia solar (Hafez et al. 2016). Portanto, a conversão de energia solar é determinada pela curvatura do concentrador do tipo disco parabólico.

As pás de rotores eólicos comumente não apresentam curvatura, apenas em determinadas aplicações são dotadas de pequena curvatura radial e passam a ser denominadas "*swept blades*" (Kaya et al. 2021). O conceito do concentrador híbrido estabelece que suas pás apresentem a mesma curvatura de seus refletores, ou seja, uma curvatura axial que, de fato, consiste numa configuração não relatada em referências bibliográficas. A Figura 3.3 demonstra esta condição construtiva através de concentradores híbridos projetados em diferentes ângulos de curvatura.



Figura 3.3 - Concentradores híbridos projetados em ângulos de curvatura 22°(a) e 30°(b)

Na seção 2.7, a Figura 2.16 apresenta o triângulo de velocidades aplicado ao projeto de pás eólicas segundo a metodologia do BEM. Conclusivamente, esta figura demonstra que as pás eólicas são projetadas a partir da premissa de que cada elemento de pá esteja posicionado axialmente e paralelo em relação a corrente livre. A implementação de ângulos de curvatura estabelecerá que a direção da corrente livre não esteja axial e paralela ao elemento de pá, determinado que o vetor velocidade da corrente livre seja decomposto para que apenas um de seus componentes seja aplicado ao triângulo de velocidades. Deste modo, quanto maior for o ângulo de curvatura, menor será o modulo do componente do vetor velocidade da corrente livre aplicado ao triângulo de velocidades.

A teoria do momento do elemento de pá estabelece que o torque gerado pela pá é resultante do somatório dos torques gerados pelos elementos de pá, oriundos da conversão de energia fundamentada pelos triângulos de velocidades (Burton et al. 2021). Por conseguinte, variações no módulo do componente do vetor velocidade da corrente livre devido a especificações do ângulo de curvatura dos refletores impactam diretamente na conversão de energia eólica. Portanto, a conversão de energia eólica é determinada pela curvatura do concentrador híbrido do tipo disco parabólico.

Estudos realizados mediante análise numérica (CFD) e analítica demonstraram que ângulos de curvatura de refletores superiores a $30^{\circ} (\cong 0,525 \text{ rad})$ prejudicam sensivelmente a conversão de energia eólica. Os ângulos de curvatura inferiores a $22^{\circ} (\cong 0,375 \text{ rad})$ resultam em grandes distâncias entre o conjunto receptor e o concentrador híbrido, sendo esta dimensão determinada pela posição do ponto focal. Logo, foi especificado ao ângulo de curvatura do concentrador híbrido o intervalo de $22^{\circ} (\cong 0,375 \text{ rad})$ a $30^{\circ} (\cong 0,525 \text{ rad})$ para a otimização proposta.

A análise realizada nesta seção demonstra que o ângulo de curvatura dos refletores consiste numa variável de projeto de grande relevância ao estudo de otimização proposto, determinando concomitantemente a curvatura das pás e área de reflexão do concentrador, os quais impactam diretamente na conversão de energia eólica e solar.

3.2.1.2.2. RAZÃO DE CUBO ("Hub-To-Tip Ratio")

A razão de cubo ("*hub-to-tip ratio*") consiste no resultado da divisão entre os diâmetros das pás e do cubo de um rotor (Bran e Souza, 1969). Esta variável é de vital importância em projetos de rotores de ventiladores, bombas, turbinas hidráulicas (Bran e Souza, 1969) e turbinas eólicas (Ying e Chen, 2015).

O concentrador híbrido apresenta razão de cubo estabelecida pelo resultado da divisão entre raios de seus anéis interno e externo. Esta é uma variável de projeto de grande relevância ao estudo da otimização do concentrador híbrido, determinando simultaneamente a área de seus refletores e o comprimento de suas pás eólicas. A Figura 3.4 demonstra a sensível modificação de configuração dos refletores determinada pelas alterações na variável razão de cubo. Uma análise desenvolvida no *Ansys Design Modeler* demonstrou que a variação de área de reflexão devido exclusivamente pelas alterações da razão de cubo podem chegar a 7%.

Conforme já descrito na seção anterior, a teoria do momento do elemento de pá demonstra que o torque desenvolvido pelas pás consiste no resultado da integração dos torques de seus elementos de pá (Burton et al. 2021). Logo, quanto maior for o comprimento da pá eólica, maior será o torque desenvolvido. Conclusivamente, sendo a razão de cubo uma variável de projeto que efetivamente determina o comprimento das pás eólicas, têm-se, por conseguinte, que a mesma também é determinante ao torque gerado e na conversão de energia eólica.



Figura 3.4 - Concentradores híbridos especificados sob razão de cubo de 0,2 (a) e 0,5 (b)

A razão de cubo de rotores eólicos semelhantes ao concentrador híbrido é comumente estabelecida em valores entre 0,35 e 0,27, conforme análise detalhada no Apêndice E relativa a especificação da razão de cubo do concentrador híbrido em seu projeto inicial. Para o estudo de otimização, o limite superior do intervalo recomendado foi ampliado em 40%, resultando em um valor de razão de cubo de 0,5. A aplicação deste valor foi fundamentada em pesquisa bibliográfica, onde foi verificado rotores eólicos com alta solidez com razão de cubo de 0,5 (Ying e Chen, 2015). O limite inferior do intervalo recomendado foi diminuído para 0,2, pois nesta razão de cubo, tem-se o diâmetro próximo da área sombreada pelo receptor. Nesta condição, pode-se substituir o refletor central por uma ogiva, promovendo uma melhoria na conversão de energia eólica.

A aplicação dos limites inferior e superior da razão de cubo especificadas nesta seção serão associadas as dimensões das lacunas do concentrador e a geometria das pás na seção 3.2.1.2.2.1.

3.2.1.2.2.1. DIMENSÕES DAS LACUNAS

As lacunas do concentrador híbrido consistem em um parâmetro geométrico de grande relevância ao estudo de otimização proposto, determinando concomitantemente a conversão de energia eólica e solar no concentrador híbrido, conforme análise desenvolvida na seção 2.3.

A parametrização da geometria do concentrador híbrido estabelece a aplicação da dimensão máxima das lacunas, fundamentado no propósito de manter a dimensão mínima do refletor na região do anel interno de modo a garantir o engaste entre refletor e anel. Deste modo, as dimensões das lacunas são estabelecidas em função da razão de cubo. A Figura 3.4 evidência, em seu detalhe, a variação das dimensões das lacunas em diferentes razões de cubo.

A dimensões das lacunas não foram especificadas diretamente neste estudo de otimização, entretanto foram aplicadas de modo indireto através da razão de cubo.

3.2.1.2.3.GEOMETRIA DAS PÁS DO CONCENTRADOR HÍBRIDO

A geometria das pás consiste em uma das variáveis de maior relevância ao estudo da otimização do concentrador híbrido, pois é determinante na eficiência da conversão de energia eólica. A metodologia aplicada ao projeto das pás eólicas no estudo de otimização consiste na teoria do momento do elemento de pá. Logo, a geometria das pás é fundamentalmente gerada a partir de elementos de pá estabelecidos sob perfil aerodinâmico, dimensões de cordas e ângulos de passo (Burton et al. 2021).

O perfil aerodinâmico NACA 4415, especificado na seção 3.2.1.1, foi aplicado a todos os elementos de pá. Portanto, considerando o número de elementos de pás especificados na seção 3.2.1.1, as cordas e ângulos de passo para cada elemento de pá resultariam em um montante de 20 variáveis de projeto a serem analisados no estudo de otimização. Somente estes dois parâmetros geométricos (corda e ângulo de passo), caso fossem aplicados a otimização, gerariam um número de amostragem que inviabilizaria o estudo. A fim de se viabilizar o estudo da otimização da geometria das pás do concentrador híbrido, as cordas e os ângulos de passo foram parametrizados em função do fator de indução axial, culminando na aplicação de apenas um parâmetro na geração da geometria das pás.

A parametrização do ângulo de passo foi estabelecida incialmente através do ângulo de fluxo (φ_r) , mediante substituição das equações (2.1) e (2.3) em (2.5), resultando na Equação (3.1).

$$\varphi_r = \arctan\left(\frac{1-a}{\left(\frac{\Omega r}{U_{\infty}} + \frac{aU_{\infty}(1-a)}{\Omega r}\right)}\right)$$
(3.1)

Substituindo na Equação (3.1) as velocidades do vento e angular do concentrador híbrido especificadas na seção 3.2.1.1, obtém-se a Equação (3.2).

$$\varphi_r = \arctan\left(\frac{1-a}{0,346r + \frac{2,884a(1-a)}{r}}\right)$$
 (3.2)

Substituindo a Equação (3.2) em (2.6) e aplicando o ângulo de ataque especificado na seção 3.2.1.1, obtém-se a Equação (3.3) do ângulo de passo (β_r) parametrizado em função do fator de indução axial e do raio do elemento de pá.

$$\beta_r = \arctan\left(\frac{1-a}{0,346r + \frac{2,884a(1-a)}{r}}\right) - 4,75$$
(3.3)

A parametrização as cordas foi estabelecida pela substituição das equações (2.1), (2.2), (2.3), (2.4) e (3.2) em (2.7), resultando na Equação (3.4).

$$c_r = \frac{8\pi a(1-a)r \ U_{\infty}^2}{N_{P\dot{A}_{-}P} \left(U_{\infty}^2(1-a)^2 + \frac{(\Omega^2 r^2 + U^2 a(1-a))^2}{\Omega^2 r^2}\right) \left(C_L \cos\left(\frac{1-a}{0,346r + \frac{2,884a(1-a)}{r}}\right) + Cd \ \sin\left(\frac{1-a}{0,346r + \frac{2,884a(1-a)}{r}}\right)\right)} (3.4)$$

Substituindo na Equação (3.4) as velocidades do vento e angular do concentrador híbrido, assim como o número de pás de projeto especificado na seção 3.2.1.1, obtém-se a Equação (3.5) das cordas (c_r) parametrizadas em função do fator de indução axial e do raio do elemento de pá.

$$c_r = \frac{904,32a(1-a)r}{\left(36(1-a)^2 + \frac{\left((4,32r^2 + 36a(1-a)\right)^2}{4,32r^2}\right) \left(0,99\cos\left(\frac{1-a}{0,346r + \frac{2,884a(1-a)}{r}}\right) + 0,01\sin\left(\frac{1-a}{0,346r + \frac{2,884a(1-a)}{r}}\right)\right)} \quad (3.5)$$

O fator de indução axial foi estabelecido pela aplicação da metodologia apresentada na seção 2.5.1. A especificação do fator de indução axial será estabelecida na seção 3.2.1.2.5.

3.2.2. GERAÇÃO DE GEOMETRIAS

As geometrias aplicadas ao estudo de otimização proposto foram geradas pela aplicação do *Ansys Design Modeler*, o qual consiste num software de modelamento geométrico parametrizado.

As geometrias aplicadas ao estudo de otimização foram desenvolvidas sob a metodologia da periodicidade. Este método é amplamente empregado nos estudos CFD de turbinas eólicas de eixo horizontal (Tossas e Leonardi, 2012), aplicabilidade verificada pelos estudos de Mansi e

Aydin (2022) e Alkhabbaz et al. (2021). A periodicidade estabelece uma significativa redução na demanda de recurso computacional, pois a geometria analisada não é integralmente aplicada na fluidodinâmica computacional, sendo considerada apenas uma seção periódica (Ansys, 2021). Na periodicidade, as condições aerodinâmicas e termodinâmicas que atravessam a seção periódica são reproduzidas nas demais seções da geometria analisada (Ansys, 2021). Então, para que seja aplicado este método, as condições aerodinâmicas e termodinâmicas devem ser impreterivelmente idênticas em todas as seções periódicas.

O estudo de otimização foi desenvolvido a partir da geometria do concentrador híbrido definida na revisão de projeto. A análise fluidodinâmica computacional da conversão de energia eólica do concentrador híbrido demanda a caracterização de duas regiões de domínio fluído. Estas regiões fluidas são denominadas domínio geral e domínio rotativo.

O domínio geral foi desenvolvido no formato cilíndrico, sendo este comumente adotado em estudos CFD de turbinas eólicas de eixo horizontal, sendo verificada em Mansi e Aydin (2022), Li et al. (2020) e Moussa (2020). As dimensões do domínio geral foram especificadas em função do diâmetro externo do concentrador híbrido, segundo proposta de Alkhabbaz et al (2021). O domínio geral foi elaborado em seis regiões adjacentes entre si, devido metodologia aplicada na geração de malha.

Inicialmente, o domínio rotativo foi arquitetado em formato puramente cilíndrico, abrangendo todo o concentrador híbrido. Entretanto, em simulações CFD realizadas na revisão de projeto, verificou-se que a aplicação do domínio rotativo em formato cilíndrico de anel seria uma melhor aproximação do fenômeno físico analisado. Isto porque o domínio rotativo no formato cilíndrico de anel abrange exclusivamente a região do concentrador sob movimento de rotação durante a conversão de energia eólica.

O concentrador híbrido, conjunto receptor e seus domínios (geral e rotativo) apresentam eixo de simetria em seus raios iguais a zero.Por conseguinte, a seção periódica foi estabelecida neste eixo. Os domínios geral e rotativos, assim como o conjunto receptor, permanecem simétricos em qualquer número de seções transversais aplicadas, apresentando número infinito de seções periódicas possíveis. O concentrador híbrido é geometricamente limitado pelo máximo de vinte seções transversais simétricas entre si, pois é constituído por vinte pás e refletores. Diante desta condição restritiva do concentrador, foi especificado o número de seções periódicas (*N*_{PER}) em vinte, a fim de obter-se o maior número de seções e a menor demanda computacional.

As geometrias aplicadas a otimização foram obtidas mediante operações "*booleanas*" de subtração estabelecidas entre o domínio geral, conjunto receptor e subconjunto estático do concentrador híbrido, entre o domínio rotativo e subconjunto dinâmico do concentrador híbrido

e por fim, entre o domínio geral e domínio rotativo. A Figura 3.5 demonstra a geometria da seção periódica e a Figura 3.6 demonstra as geometrias das seções periódicas geral e rotativa.



Figura 3.5 - Seção periódica aplicada ao estudo de otimização.



Figura 3.6 - Seções periódicas geral (a) e periódica rotativa (b) (c).

O *Ansys Design Modeler* associado a tabela de parâmetros do *Ansys Workbench* oportuniza que variáveis geométricas do concentrador híbrido sejam parametrizadas. Este procedimento, fundamental na otimização proposta, é descrito na seção 3.2.2.1.

3.2.2.1. PARAMETRIZAÇÃO DA GEOMETRIA DO CONCENTRADOR

O estudo de otimização proposto demanda que seja executado um processo autônomo de atribuição de valores numéricos a variáveis geométricas do concentrador híbrido a fim de obterse resultados de geração de torque e irradiância solar refletida para cada ponto de projeto especificado no DOE. Portanto, torna-se impreterível que determinadas variáveis geométricas do concentrador híbrido estejam parametrizadas.

A parametrização geométrica requerida ao estudo proposto foi realizada mediante integração do *DesignModeler* (ferramenta Ansys de modelagem paramétrica) e o *Workbench* (ferramenta Ansys de gerenciamento de softwares). A maior parte das variáveis geométricas do concentrador híbrido especificadas no *DesignModeler* foram parametrizadas, resultando num total de 234 variáveis especificadas na tabela de parâmetros do *Ansys Workbench*. Esta parametrização compreendeu desde a aplicação de simples sentenças de igualdades entre variáveis até fórmulas complexas, como as equações (3.3) e (3.5) referentes a geração da geometria das pás eólicas.

A parametrização geométrica do concentrador híbrido consiste num elemento notório da metodologia aplicada na obtenção dos pontos de projeto do concentrador híbrido, devido a sua complexidade e, sobretudo, unicidade em relação abordagem desenvolvida na utilização da ferramenta computacional. Uma revisão bibliográfica identificou pesquisas fundamentadas em parametrizações geométricas semelhantes, como em Fan et al. (2020), porém de complexidade baixa e fazendo uso elementar da ferramenta computacional.

A parametrização do posicionamento do conjunto receptor foi estabelecida no ponto focal dos refletores do concentrador híbrido, sendo esta variável óptica determinada sobretudo pelo ângulo de curvatura dos refletores.

3.2.3.GERAÇÃO DAS MALHAS

A malha aplicada ao estudo de otimização proposto foi desenvolvida no *Ansys Meshing*, o qual consiste numa ferramenta computacional de pré-processamento de simulações numéricas. Este software desempenha papel fundamental no CFD, pois realiza a geração de malhas; etapa crítica da simulação numérica, determinando efetivamente a precisão dos resultados obtidos do fenômeno físico / físico-químico analisado.

A Figura 3.7 (a) e (b) apresentam a malha da seção periódica. O domínio geral periódico, durante a geração de sua geometria, foi dividido em seis regiões distintas, no intuito de obterse malha constituída por diferentes tipos de elementos; hexaédricos (malha estruturada) e tetraédricos (malha não estruturada), conforme Figura 3.7 (c). Esta condição construtiva foi aplicada objetivando obter-se melhor convergência na fluidodinâmica computacional. A Figura 3.7 (c) demonstra que apesar do domínio geral periódico ser composto por três regiões de malha estruturada e três regiões de malha não estruturada, o maior volume deste domínio é constituído por malha estruturada. Os nós das paredes adjacentes as seis regiões foram integralmente associados entre si, gerando um domínio geral periódico constituído por malha conforme.

O domínio rotativo periódico, mostrado na Figura 3.7 (d), não foi submetido a divisões, pois este foi desenvolvido para a aplicação de elementos tetraédricos, gerando malha não estruturada. Não foi realizada associação entre nós das faces adjacentes dos domínios periódico e rotativo, logo a malha da seção periódica é não conforme, apresentando região de contato entre domínios. As metodologias de geração de malha e dimensões de elementos foram especificadas localmente para cada parede / região dos domínios periódicos (geral e rotativo), com o objetivo de obterse a melhor convergência no CFD.



Figura 3.7 - Malhas: seção periódica (a) (b), domínios periódicos geral (c) e rotativos (d)

A malha adjacente a parede da pá eólica do domínio rotativo periódico foi desenvolvida pela aplicação de tratamento de malha local, oportunizando simulações precisas e, por conseguinte, de alta acuracidade de resultados de torque. Este tratamento de malha consiste na aplicação de camadas prismáticas (*"layers"*) na parede da pá eólica que são efetivamente "infladas", criando elementos alinhados de alta qualidade que são eficazes na resolução da camada limite. A Figura 3.8 mostra a malha adjacente a parede da pá eólica constituída por quinze camadas prismáticas.



Figura 3.8 - Malha adjacente a parede da pá eólica

A distribuição de Y⁺ na parede da pá eólica é demonstrada na Figura 3.9. O valor máximo conferido a esta grandeza adimensional consiste em dois, o qual é adequado a fluidodinâmica computacional proposta.



Figura 3.9 - Distribuição de Y⁺ no intradorso (a) e extradorso (b) da pá eólica.

Nas demais paredes do concentrador e no conjunto receptor foram igualmente aplicados tratamentos de malha local compostos por seis camadas prismáticas, obtendo simulações precisas que são caracterizadas por baixos valores de Y⁺.

As simulações realizadas em diversos pontos do espaço de busca durante o estudo do critério de convergência demonstraram que as malhas apresentaram variações entre quatorze e dezesseis milhões de elementos, assim como uma variação entre sete e oito milhões de nós.

O estudo de otimização proposto compreende a análise CFD de múltiplas geometrias do concentrador híbrido, estabelecendo, por conseguinte, a geração de malhas distintas para cada ponto de projeto analisado. As malhas foram efetivamente parametrizadas através da aplicação de configurações locais, garantindo deste modo que apesar de suas variações de geométricas (concentrador e seus domínios), as principais paredes da geometria analisada permaneceriam com as mesmas configurações em todos os pontos de projeto, assegurando a convergência das simulações. Esta condição ocasionou a geração de malhas de distintos números de elementos e nós para cada ponto de projeto. A independência de malha foi realizada em um ponto de projeto, pois a configuração local aplicada assegura que as principais paredes da geometria analisada permanecam com as mesmas configurações em todos os pontos de projeto.

3.2.4. DINÂMICA DOS FLUIDOS COMPUTACIONAL (CFD)

A fluidodinâmica computacional aplicada ao estudo de otimização do concentrador híbrido foi desenvolvida no *Ansys Fluent* em regime permanente, sendo este usualmente adotado nas simulações CFD de turbinas eólicas de eixo horizontal (Bakırc e Yılmaz, 2018). Neste estudo foi aplicada uma premissa essencial a dinâmica dos fluidos computacional de turbinas eólicas; o escoamento incompressível (Bakırc e Yılmaz, 2018).

O modelo de turbulência k- ω SST, descrito detalhadamente na seção 2.8.1.1, foi aplicado a fluidodinâmica computacional do concentrador híbrido. Este modelo de turbulência é adequado e amplamente aplicado na dinâmica dos fluidos computacional de rotores eólicos de eixo horizontal, conforme aplicação realizada em Alkhabbaz et al (2021) e Bakırc e Yılmaz (2018).

O modelo de radiação aplicado ao estudo de reflexão solar do concentrador híbrido ("*solar ray tracing*") é comumente utilizado em estudos de irradiância solar desenvolvidos em CFD, conforme Abdelrazik et al. (2023).

As condições de contorno inerentes as fontes de energia renováveis aplicadas a dinâmica dos fluidos computacional do estudo proposto (irradiância solar média anual e velocidade média anual do vento) foram especificadas conforme dados da seção 3.2.1.1.

O ar foi especificado ao meio fluído constituinte dos domínios periódicos (geral e rotativo) e o material das paredes frontais dos refletores foi especificado em alumínio. As propriedades físicas do ar aplicadas ao CFD foram especificadas na CNTP e as propriedades ópticas do alumínio (refletividade e emissividade) foram especificadas segundo os dados da seção 3.2.1.1.

A velocidade angular de 20 RPM (especificada na seção 3.2.1.1) foi atribuída ao domínio rotativo periódico pela aplicação do solver apropriado a simulações em regime permanente.

A velocidade da corrente livre (U_{∞}) de projeto foi especificada na parede entrada. A pressão na parede de saída foi especificada em termos de pressão relativa, com o valor de 0 Pa. A Figura 3.10 apresenta as superfícies de entrada, saída e borda da seção periódica.



Figura 3.10 - Seção periódica - entrada, saída e borda

A especificação atribuída ao algoritmo de solução aplicado ao acoplamento de velocidade e pressão caracterizou a simulação em pseudo-transiente. Os parâmetros e configurações de discretização espacial aplicados na fluidodinâmica computacional do concentrador híbrido estão descritos na Tabela 3.3.

células)	
Segunda ordem	
Segunda ordem	
Segunda ordem	
-	

Tabela 3.3 - Parâmetros / configurações de discretização espacial aplicados ao CFD

A especificação do método dos mínimos quadrados (baseados em células) para o gradiente consiste numa configuração recomendada para simulações semelhantes a desenvolvida neste trabalho, conforme Ansys, (2021). A aplicação de segunda ordem para os parâmetros de
pressão, momento, energia cinética turbulenta, taxa de dissipação especifica e energia determinam resultados com maior acurácia. Os fatores de relaxamento pseudo-transiente não foram alterados na dinâmica dos fluídos computacional do concentrador híbrido, permanecendo seus valores numéricos padrão, garantindo a previsão dos resultados obtidos.

O critério de convergência aplicado nas simulações numéricas do estudo de otimização do concentrador híbrido foi estabelecido em três premissas: convergência de torque, convergência de reflexão solar e convergência dos resíduos das equações da continuidade, k, ω , energia e velocidades (x, y e z). As convergências de torque e reflexão solar ocorrem a partir da iteração onde estes não apresentam variações significativas, sendo menores que 1 %. A convergência dos resíduos das equações foi estabelecida pelo critério do próprio software, sendo adotado em diversos artigos publicados, num valor de 10⁻³. Antes da execução do estudo de otimização, foram realizadas quinze simulações fundamentadas em diversos pontos do espaço de busca. A partir destas simulações, observou-se que as convergências da reflexão solar, do torque e da equação dos resíduos eram respectivamente obtidas em até 100 iterações, em até 500 iterações e em até 900 iterações. Portanto, foi aplicado como critério de convergência a execução de 1.200 iterações, já que este critério garante a convergência dos três critérios aplicados.

3.2.5.GERAÇÃO DE ELETRICIDADE

A geração de eletricidade do sistema híbrido proposto é dada pelo somatório das gerações provenientes das conversões de energia solar e eólica. O sistema híbrido opera conversões de energia eólica e solar autônomas (ora operando conversão de energia solar, ora eólica) e concomitante ou híbrida (operando simultaneamente as conversões de energia solar e eólica).

A conversão de energia autônoma é estabelecida no período noturno, nublado ou chuvoso sob ocorrência de ventos (conversão autônoma de energia eólica) e no período ensolarado do dia (enquanto a irradiância é superior a potência mínima requerida ao funcionamento do sistema - "*cut in irradiance*") associada a ausência de ventos na direção coincidente ao posicionamento azimutal do concentrador (conversão autônoma de energia solar).

A conversão de energia concomitante ou híbrida é realizada no período ensolarado do dia (sendo a irradiância superior ao "*cut in irradiance*") associado à ocorrência de ventos na direção coincidente ao posicionamento azimutal do concentrador (condição detalhada na seção 3.2.5.3).

O estudo de otimização proposto foi desenvolvido pela premissa de conversão de energia autônoma e concomitante, pois estas associadas estabelecem o máximo potencial de geração de eletricidade do sistema híbrido e o melhor aproveitamento das fontes de energia renováveis.

A determinação da geração de eletricidade do sistema híbrido foi integralmente realizada no *Ansys Workbench* mediante aplicação dos softwares descritos na seção 3.2 e de sua tabela de parâmetros. Os softwares Ansys de geração de geometria e malha oportunizam ao *Ansys Fluent* (CFD) a determinação do torque gerado e a irradiância solar refletida pelos refletores do concentrador. Na tabela de parâmetros do *Ansys Workbench* foram implementados equacionamentos que, pelos resultados obtidos no *Ansys Fluent*, determinaram a geração de eletricidade do sistema híbrido pelas conversões de energia solar e eólica. Estes equacionamentos são detalhados nas seções 3.2.5.1 e 3.2.5.2.

O objetivo da otimização geométrica do concentrador consiste na maximização da geração de eletricidade do sistema híbrido proposto. Portanto a equação da geração de eletricidade anual do sistema híbrido consiste na função a ser maximizada por este estudo.

3.2.5.1.GERAÇÃO ORIUNDA DA CONVERSÃO DE ENERGIA EÓLICA

As gerações autônomas de eletricidade provenientes da conversão de energia eólica foram determinadas algebricamente pelos resultados de torque obtidos no CFD e pela resolução das equações de (3.6) a (3.11). Estas equações foram propostas por Nelson e Starcher (2019), Burton et al. (2021) e Manwell et al. (2010).

O torque desenvolvido pelo concentrador híbrido (T_C) é determinado pela Equação (3.6).

$$T_C = N_{PER} \ T_{EP} \tag{3.6}$$

A potência de eixo desenvolvida pelo concentrador híbrido (P_{EC}) é obtida pelo produto entre seu torque e sua rotação através da Equação (3.7) (Burton et al. 2021).

$$P_{EC} = T_C \Omega \tag{3.7}$$

A área "varrida" (*Av*) pelas pás do concentrador híbrido é obtida através da Equação (3.8) (Manwell et al. 2010).

$$A_V = \frac{\pi (D_c^2 - D_{ai}^2)}{4}$$
(3.8)

A potência eólica disponível ao concentrador híbrido (P_{EDC}) é determinada através da Equação (3.9) (Manwell et al. 2010).

$$P_{EDC} = \left(\frac{\mu_{AR}A_V U_{\infty}^{3}}{2}\right) \tag{3.9}$$

O coeficiente de potência (C_P) do concentrador híbrido é obtido pela aplicação da Equação (3.10). (Burton et al. 2021).

$$C_P = \frac{P_{EC}}{P_{EDC}} \tag{3.10}$$

O período anual de geração de eletricidade em horas inerente a conversão autônoma de energia eólica (T_E) é determinado através do período anual de geração de eletricidade em horas proveniente da conversão de energia solar (T_s). Esta afirmação é fundamentada na premissa de projeto do sistema híbrido proposto a qual estabelece que a geração autônoma proveniente da conversão de energia eólica ocorrerá somente quando a conversão de energia solar não ocorrer.

O período anual de geração de eletricidade em horas proveniente da conversão de energia solar consiste em 1.752, conforme demonstrado no Apêndice B. Por conseguinte, o período anual de geração de eletricidade em horas proveniente da conversão de energia eólica autônoma consiste em 7.008.

A geração anual de eletricidade proveniente da conversão de energia eólica autônoma (G_{AEE}) é obtida pela Equação (3.11) (Nelson e Starcher, 2019).

$$G_{AEE} = P_{ED} A_V C_P T_E F_{CE} \eta_{GE}$$
(3.11)

3.2.5.2.GERAÇÃO ORIUNDA DA CONVERSÃO DE ENERGIA SOLAR

A geração de eletricidade autônoma e concomitante proveniente da conversão de energia solar foi determinada pela aplicação dos resultados de irradiância solar refletida obtidos no CFD e a resolução das equações de (3.12) à 3.20 estabelecidas na metodologia de dimensionamento geométrico e térmico de sistemas Dish-Stirling, proposta por Hafez et al. (2016) e Castellanos et al. (2017). A Tabela 3.4 apresenta os fatores, constantes e coeficientes do dimensionamento térmico do sistema de conversão de energia solar do sistema híbrido proposto.

Simbolo	Unidade	Valor numérico		
(σ_B)	$[W/m^2 K^4]$	5,6697 x 10 ⁻⁸		
(F_D)		0,9		
(F_R)		0,5		
(α_{abs})		0,96		
(T_{aabs})		0,9		
(Ks)		0,5		
(θ_I)	[mrad]	0,009		
	(σ_B) (F_D) (F_R) (α_{abs}) (T_{aabs}) (K_S) (θ_l)	(σ_B) $[W/m^2 K^4]$ (F_D) (F_R) (α_{abs}) (T_{aabs}) (K_S) (θ_l) $[mrad]$		

Tabela 3.4 - Fatores, constantes e coeficientes aplicados ao dimensionamento térmico

Fonte: Castellanos et al. (2017)

A geração anual de eletricidade proveniente da conversão de energia solar (G_{AES}) é obtida pela Equação (3.12) (Nelson e Starcher, 2019).

$$G_{AES} = P_{ELS} T_S F_{CE}$$
(3.12)

A potência elétrica líquida (P_{ELS}) gerada pelo sistema de conversão de energia solar é determinada pela Equação (3.13) (Castellanos et al.2017).

$$P_{ELS} = \eta_G P_{SD} \tag{3.13}$$

A potência solar disponível ao concentrador (P_{SD}) para a conversão de energia é obtida pela Equação (3.14) (Castellanos et al.2017).

$$P_{SD} = I A_C \tag{3.14}$$

O rendimento global (η_G) da conversão de energia solar é determinado pela Equação (3.15) (Castellanos et al.2017).

$$\eta_G = \eta_C \eta_R \eta_S \eta_{GE} \tag{3.15}$$

O rendimento do motor Stirling (η_s) é obtido pela Equação (3.16) (Castellanos et al.2017).

$$\eta_S = \left(1 - \sqrt{\frac{T_A}{T_R}}\right) K_S \tag{3.16}$$

A temperatura do receptor (T_R) é obtida pela Equação (3.17) (Castellanos et al.2017).

$$T_R = \sqrt[4]{\left(\frac{I \, C_G \, \alpha_{ABS}}{\sigma_B \, \varepsilon}\right)} K_{ATT}$$
(3.17)

A constante de atenuação (K_{ATT}) é obtida pela Equação (3.18) (Castellanos et al.2017).

$$K_{ATT} = \eta_C F_D F_R \tag{3.18}$$

A concentração geométrica (C_G) consiste na razão entre as áreas do concentrador e receptor (Hafez et al. 2016). O diâmetro do receptor (D_R) é obtido pela Equação (3.19) (Hafez et al. 2016).

$$D_R = \frac{f^2 \theta_I}{\cos \varphi_c \left(1 + \cos \varphi_c\right)} \tag{3.19}$$

A distância focal (f) em concentradores do tipo disco parabólico, compreendida pela dimensão entre o vértice do refletor e o seu ponto focal, é determinada pela Equação (3.20) (Hafez et al. 2016).

$$f = \frac{D_C}{4\tan\left(\frac{\varphi_C}{2}\right)} \tag{3.20}$$

O rendimento do receptor (η_R) é determinado pela Equação (3.21) (Castellanos et al.2017).

$$\eta_R = \tau \alpha_{abs} - \left(\frac{h_G(T_R - T_A) + \varepsilon \sigma_B(T_R^4 - T_A^4)}{\eta_C C_G I}\right)$$
(3.21)

O coeficiente de convecção global (h_G) aplicado na determinação do rendimento do receptor foi determinado pela metodologia de dimensionamento térmico de sistemas Dish-Stirling proposta por Castellanos et al. (2017). Esta metodologia apresenta o equacionamento para a determinação das perdas por convecção forçada (h_F) e natural (h_N) no receptor.

A estabilidade da velocidade dos ventos no local de instalação proposto ao sistema híbrido (apresentando pequenas e raras variações) permite que este parâmetro seja considerado constante, em seu valor de projeto (6 m/s). Deste modo, podemos considerar que o coeficiente de convecção forçada apresenta uma única variável que efetivamente apresenta variação no rastreamento solar; o ângulo do receptor. Este ângulo corresponde ao posicionamento angular do receptor durante o movimento estabelecido pelo sistema de rastreamento solar (Castellanos et al.2017). A posição horizontal e vertical corresponde respectivamente aos ângulos do receptor; 0° e 90° (Castellanos et al.2017). Igualmente a aplicação da irradiância solar média anual para a determinação da geração de eletricidade, adotou-se o valor médio angular do receptor de 45° para a determinação do coeficiente de convecção forçada.

O coeficiente de convecção natural apresenta uma variável preponderante que efetivamente determina variações neste coeficiente; a temperatura do receptor. Uma análise estabelecida entre os limites superior e inferior dos resultados de temperatura do receptor do DOE indicaram que a aplicação da temperatura do receptor nestes estes dois pontos de projeto resultou em variação no rendimento total inferior a 1%. Portanto, considerando o complexo algebrismo demandado na implementação do coeficiente de convecção natural correspondente a exata temperatura do receptor, uma simplificação foi adotada; aplicação única do coeficiente de convecção natural inerente a temperatura média do receptor.

A Tabela 3.5 apresenta os coeficientes de convecção forçada, natural e global aplicados na determinação do rendimento do receptor.

Coeficientes	Símbolo	Unidade	Valor numérico 2,72 1,30		
Convecção forçada	(h_F)	[W/(m ² K)]			
Convecção natural	(h_N)	[W/(m ² K)]			
Convecção global	(<i>hG</i>)	[W/(m ² K)]	4,02		
	Eonte: Castell	anos et al. (2017)			

Tabela 3.5 - Coeficientes de convecção

Fonte: Castellanos et al. (2017)

As equações (3.12) à (3.21) foram aplicadas na tabela de parâmetros do *Ansys Workbench* no campo de parâmetros de saída (*"Output parameters"*).

3.2.5.3.GERAÇÃO HÍBRIDA(CONVERSÃO DE ENERGIA SOLAR E EÓLICA)

A geração híbrida ou conversão de energia concomitante (energia solar e eólica) é realizada pelo sistema híbrido proposto na seguinte condição de contorno: período ensolarado do dia (durante o rastreamento solar) associado à ocorrência de ventos na direção coincidente ao posicionamento azimute de seu concentrador e sentidos opostos entre os ventos e a face côncava de seu refletor. A Figura 3.11 demonstra a condição de contorno requerida a geração híbrida no rastreamento solar.



Figura 3.11 - Condição de contorno requerida a geração híbrida no rastreamento solar. Fonte: Adaptado de Rahimoon et al. (2020).

A ocorrência da condição de contorno que oportuniza a geração híbrida pode ser verificada pelos dados fornecidos por Sun Earth Tools (2021) e Global Wind Atlas (2021) (Figura 3.11) para a cidade de Aracati no local estabelecido para instalação do sistema híbrido (especificação do local de instalação do sistema híbrido é demonstrada no Apêndice B).Os dados anteriormente citados consistem na trajetória solar obtida pela carta solar (Figura 3.12-a), assim como a frequência, sentido e direção dos ventos obtidos pela rosas dos ventos (Figura 3.12-b). Posteriormente ao levantamento dos dados, foi realizada a sobreposição da carta solar e rosas

dos ventos (Figura 3.12-c), obtendo-se concomitantemente informações de disponibilidade solar e eólica para o pressuposto local de instalação do sistema híbrido.



Figura 3.12 - Carta solar (a), rosas dos ventos (b) e sobreposição de ambas (c) para Aracati. Fonte: Adaptado de Sun Earth Tools (2021) e Global Wind Atlas (2021).

A análise realizada nas Figura 3.11 e Figura 3.12-c demonstra que as disponibilidades solares e eólicas para o local estabelecido para a instalação do sistema híbrido (Figura 3.12-c) oportunizam a ocorrência da condição de contorno necessária a geração híbrida (Figura 3.11) em cerca de 50% do rastreamento solar.

A Figura 3.11 demonstra que durante o rastreamento solar haverá desalinhamento entre a direção dos ventos e o eixo de simetria do concentrador. A Figura 3.13 demonstra em seu item (a) a condição de alinhamento entre a direção do ventos e o eixo de simetria do concentrador híbrido a qual é estabelecida durante a conversão exclusiva de energia eólica. Nos itens (b) e (c)verificam-se desalinhamentos entre a direção dos ventos e o eixo de simetria do concentrador estabelecido pela geração híbrida devido ao rastreamento solar no eixo de elevação.



Figura 3.13 - Alinhamento (a) e desalinhamento (b) (c); direção do vento e concentrador.

Este desalinhamento entre direção dos ventos e o eixo de simetria de rotores consiste numa prática verificada em turbinas eólicas de eixo horizontal, denominada de guinada ou alteração da posição angular do rotor em relação ao vento (*"tilted rotor"*) (Johlas et al. 2022; Nakhchi et

al. 2022; Hau, 2016). A aplicação deste desalinhamento ao rotor consiste de fato numa metodologia de limitar a potência disponível ao rotor, sendo aplicado em moinhos de vento e turbinas eólicas multipás americana ("*multiblade windmill*") (Hau, 2016).

A alteração da posição angular do rotor em relação ao vento estabelece uma decomposição do vetor velocidade do vento na entrada das pás eólicas. Portanto, após a alteração da posição angular do rotor, apenas uma componente do vetor velocidade do vento (perpendicular ao plano do rotor) irá atuar efetivamente no triângulo de velocidades, reduzindo o coeficiente de potência do rotor (Johlas et al. 2022; Nakhchi et al. 2022; Hau, 2016). A guinada do rotor em relação a direção do vento, quando realizada em elevados ângulos, culmina na separação da camada limite que, consequentemente, resulta em uma severa diminuição do coeficiente de potência do rotor (Johlas et al. 2022; Nakhchi et al. 2022; Hau, 2016). Ambos os efeitos combinados provocam uma redução efetiva no coeficiente de potência do rotor em ângulos de guinada acima de 15° (Hau, 2016). Esta redução efetiva pode ser verificada no diagrama da Figura 3.14, o qual apresenta curvas de desempenho gerais para rotores eólicos de eixo horizontal sob alteração da posição angular do rotor em relação ao vento.



Figura 3.14 - Curvas de coeficiente de potência para ângulos de incidência do vento Fonte: Adaptado de Hau, (2016)

Conclusivamente, a geração híbrida originou uma condição particular de conversão de energia eólica que resultará em diferentes torques a cada posição angular do concentrador híbrido durante o rastreamento solar. Estudos recentes sobre a análise particularizada do desempenho de um rotor eólico em especifico sob alteração da posição angular do rotor em relação ao vento são comumente verificados em trabalhos de Johlas et al. (2022) e Nakhchi et al. (2022). Portanto, será desenvolvido um estudo especifico para a determinação do torque gerado pelo concentrador híbrido em diferentes ângulos de incidência do vento.

Inicialmente, foi desenvolvido um equacionamento que determina analiticamente o torque e coeficiente de potência durante a geração híbrida, fundamentada na decomposição vetorial do vetor velocidade de incidência do vento em função da variação angular do concentrador híbrido durante o rastreamento solar. Deste modo, a velocidade dos ventos aplicada na geração híbrida $(U_{\infty, \theta c})$ em função da posição angular do concentrador (θc) é determinada pela Equação (3.23), fundamentada na Equação apresentada por Burton et al. (2021), oriunda do BEM.

$$U_{\infty\theta c} = U_{\infty}(1-a)\cos\theta_{c}$$
(3.22)

A aplicação do equacionamento da metodologia do momento do elemento de pá apresentado em Burton et al. (2021), associado a Equação proposta (3.23), oportunizou a determinação da potência desenvolvida pelo concentrador híbrido para cada ângulo de elevação (P_{θ}) através da Equação (3.24).

$$P_{\theta} = N_{P\dot{A}} \left(\frac{1}{2} \mu_{ar} U_{\omega\theta c}^2 \pi R^3 \lambda \Omega \int_0^R \mu_r^2 \left(8 a'(1-a) \mu_r - \frac{W_R}{U_{\omega\theta c}} \frac{N_{P\dot{A}} \frac{c}{R}}{\pi} C_D(1+a') \right) d\mu_r \right) \Omega$$
(3.23)

A determinação da potência oportuniza a obtenção do coeficiente de potência através da Equação (3.11), grandeza admissional fundamental ao modelamento matemático da geração híbrida. O equacionamento analítico proposto, constituído pelas equações fundamentais do BEM [(2.1) a (2.7)] associadas as Equações (3.22), (3.23) e (3.11), foi implementado num programa desenvolvido em Matlab para que os cálculos fossem efetuados. Deste modo, foram obtidos resultados de coeficiente de potência sob variações angulares analisadas em intervalos de 5°. Estes resultados numéricos foram obtidos para o ponto inicial de projeto do concentrador híbrido, entretanto, o estudo da geração híbrida requer que seja definida uma equação que seja aplicável a qualquer ponto de projeto do concentrador híbrido. Deste modo, primeiramente os resultados numéricos obtidos foram aplicados em termos percentuais do coeficiente de potência para a condição de alinhamento entre a direção dos ventos e o eixo de simetria do concentrador híbrido (ou seja 0°).Posteriormente, estes resultados percentuais de coeficiente de potência para cada ângulo do eixo de elevação foram aplicados num diagrama, obtendo a curva demonstrada na Figura 3.15.



Figura 3.15 - Diagrama do coeficiente de potência vs variação angular do eixo de elevação.

A curva de coeficiente de potência percentual gerado pelo método analítico apresentou apreciável correspondência com as curvas da Figura 3.14. Considerando na Figura 3.14 as curvas de ângulo de inclinação de 20° e 60°, obtém-se decréscimos de potência em torno de 20% e 90%, respectivamente. Para estas mesmas inclinações (20° e 60°) na Figura 3.15, obtém-se decréscimos de 22% e 94%.

O modelo matemático foi desenvolvido sob metodologia aplicada em rotores eólicos de eixo horizontal. Entretanto, o concentrador híbrido apresenta a singular configuração de refletores entre as pás eólicas demandando, consequentemente, validação através do CFD. Esta validação foi desenvolvida no *Ansys Workbench*, utilizando os mesmos softwares de geração de geometria, geração de malha e fluidodinâmica computacional aplicados ao estudo de otimização proposto. Entretanto, foram necessárias alterações na metodologia adotada na otimização. Na análise CFD da geração híbrida não foi possível aplicar o conceito de periodicidade, pois a direção dos ventos no concentrador não permaneceria a mesma em todas as seções periódicas. Portanto, uma metodologia foi proposta para a realização desta validação, que consiste na aplicação da variação angular do eixo de elevação do concentrador no domínio geral e mantendo o concentrador / domínio rotativo alinhados com o sistema de coordenadas do *Fluent*. Esta premissa é vital para que a condição de contorno fosse reproduzida de modo adequado no CFD, pois a aplicação de variação angular no concentrador e, por conseguinte, geraria resultados de geração de torque errôneos. A correção deste desalinhamento é possível,

entretanto deveria ser realizado para cada ângulo simulado, gerando um modulo de falha com alto potencial de ocorrência de erro severo (resultados errôneos). Esta metodologia é verificada pela Figura 3.16 (a), que apresenta a direção e sentido dos ventos atravessando o domínio geral e através da Figura 3.16 (b) que demonstra o alinhamento do domínio rotativo com o sistema de coordenadas.



Figura 3.16 - Malha (a) e direção/sentido de incidência dos ventos no domínio geral (b)

Este estudo aplicou o concentrador híbrido em seu projeto inicial, portanto considerou que o movimento de rotação é aplicado em todo o concentrador, conforme demonstrado na Figura 3.16 (b) através do domínio rotativo.

Foram realizadas quatro simulações CFD aplicando os desalinhamentos de 15°, 30°, 45° e 60°. Os resultados obtidos nas simulações numéricas apresentaram adequada correspondência de 15° à 45°, com variação máxima de -12% em relação aos valores obtidos pelo método analítico proposto (em desalinhamento de 45°). Entretanto, no desalinhamento de 60°, o torque resultante foi praticamente nulo. Deste modo, foi excluído da análise valores superiores a 45°.Conclusivamente, no intervalo de desalinhamento considerado (0 à 45°) foi verificada a correspondência de resultados entre o CFD e o método analítico, viabilizando a utilização da curva do diagrama da Figura 3.15 como base para a determinação da geração híbrida no estudo de otimização proposto. Portanto, a partir da curva da Figura 3.15 foi realizada uma regressão polinomial para a determinação da equação, que posteriormente foi integrada no intervalo de 0 à 45° para a determinação do coeficiente de potência percentual médio ($C_{Pm\%}$) de 0,69%.

A obtenção do coeficiente de potência percentual médio oportuniza que seja calculado a geração anual de eletricidade pela conversão de energia eólica híbrida (G_{AEEH}) através da Equação (3.24).

$$G_{AEEH} = P_{ED} A_V C_P C_{Pm\%} T_{EH} F_{CE} \eta_{GE}$$

$$(3.24)$$

Considerando a conclusão estabelecida no início desta seção (fundamentada na análise da Figura 3.12) que o período da geração hibrida é restrito a 50% do rastreamento solar associada a conclusão que a conversão de energia eólica é restrita a um desalinhamento máximo de 45°, tem-se que o período de geração hibrida anual de eletricidade pela conversão de energia eólica (T_{EH}) consiste em 25% do período anual de geração de eletricidade proveniente da conversão de energia solar.

3.2.6.OTIMIZAÇÃO MULTIOBJETIVO

3.2.6.1. DESIGNXPLORER

A otimização geométrica multiobjetivo do concentrador híbrido foi desenvolvida pela aplicação do *Ansys DesignXplorer*, o qual consiste numa ferramenta computacional aplicada ao mapeamento, compreensão e otimização de projetos de engenharia, oportunizando a obtenção de projetos otimizados ou apenas para o atendimento de requisitos de produto (Ansys, 2021). Esta ferramenta computacional é amplamente aplicada em recentes pesquisas, compondo a metodologia de Nishi et al. (2023), Elsakka et al. (2022) e Mahto e Chakravarthy, (2022).

O Ansys DesignXplorer disponibiliza o desenvolvimento de produto orientado por simulação ("simulation driven product development"), sendo este fundamentado na aplicação de softwares

de planejamento de experimentos ("*design of experiments*" - DOE) e superfície de resposta ("*response surface methodology*" - RSM) associados a simulações numéricas parametrizadas (Ansys, 2021). O desenvolvimento de produto orientado por simulação efetivamente determina a correlação/influência entre as variáveis e a resposta/eficiência do projeto, oportunizando a identificação dos pontos de projeto que atendem a requisitos de produto (Ansys, 2021).

A otimização multiobjetivo do concentrador híbrido foi desenvolvida no *DesignXplorer* pela aplicação associada de simulações numéricas parametrizadas aos softwares de desenvolvimento de produto orientado por simulação (planejamento de experimentos/superfície de resposta) e ao módulo de otimização orientada a objetivos ("*Goal Driven Optimization*"-GDO) (Ansys, 2021). Estes softwares organizados na configuração descrita (Figura 3.17) definem a metodologia de otimização de superfície de resposta do *Ansys DesignXplorer*.

O estudo proposto foi desenvolvido pela aplicação da otimização de superfície de resposta do *Ansys DesignXplorer*, pois este disponibiliza poderosos algoritmos genéticos e de busca aleatória para a otimização multiobjetivo de (Ansys, 2021).



Figura 3.17 - Fluxo estruturado à otimização e fluxo intrínseco ao DesignXplorer.

Em suma, analisando o fluxo da Figura 3.17, os pontos de projetos e resultados obtidos na simulação parametrizada são os dados fundamentais para a otimização do concentrador híbrido. Entretanto, para que estes sejam efetivos ao estudo, é necessário que estes sejam especificados adequadamente para que posteriormente sejam aplicados na obtenção de modelos matemáticos que descrevam a relação entre as variáveis geométricas e os resultados de torque e reflexão solar. A especificação adequada de pontos de projetos para a modelagem matemática consiste numa operação vital a otimização proposta, sendo esta realizada pela aplicação da metodologia do planejamento de experimentos (DOE). Igualmente, a modelagem matemática é outra operação vital pois esta é a partir deste modelo que o algoritmo irá realizar a otimização, sendo esta realizada pela aplicação da metodologia da superfície de resposta (RSM). A aplicação de ambas metodologias em recentes pesquisas pode ser verificada em Nishi et al (2023), Elsakka et al. (2022) e Mahto e Chakravarthy, (2022).

A otimização geométrica do concentrador híbrido é fundamentada no objetivo de obter-se a maximização da geração de eletricidade do sistema híbrido proposto. A geração de eletricidade do sistema híbrido consiste no somatório das gerações provenientes das conversões de energia solar e eólica, que são conflitantes entre si. Deste modo, o estudo proposto requer a aplicação de metodologia multiobjetivo, oportunizando a utilização de ferramenta computacional *Ansys* fundamentada no algoritmo genético MOGA. A metodologia e ferramenta computacional de otimização aplicada ao estudo proposto é largamente utilizada em pesquisas recentes, como em Nishi et al. (2023), Elsakka et al. (2022) e Mahto e Chakravarthy, (2022).

Segundo Sunanda e Chandel (2015), recentemente, diversas técnicas de otimização têm sido utilizadas por pesquisadores em projetos e desenvolvimentos de sistemas híbridos, abrangendo desde os métodos clássicos até algoritmos metaheurísticos ou fundamentados em inteligência artificial. Eriksson e Gray (2019) afirmam que otimizações de sistemas híbridos comumente requerem a aplicação de metodologia multiobjetivo e algoritmos genéticos ou fundamentados em inteligência artificial, pois apresentam maior efetividade na obtenção do ponto ótimo. Conclusivamente, a metodologia adotada na otimização do concentrador híbrido é ratificada.

3.2.6.2.PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTOS("*Design of Experiments*")

O planejamento de experimentos ("*design of experiments*" - *DOE*) consiste na metodologia aplicada na especificação de amostras de um determinado estudo fundamentado em dados amostrais (Jankovic et al. 2021). Através desta metodologia, determina-se quantitativamente e qualitativamente os dados amostrais aplicados a uma análise, objetivando obter as informações necessárias ao experimento com o mínimo de pontos de amostragem (Jankovic et al. 2021). Portanto, o DOE é utilizado em estudos de otimização desenvolvidos por meio de softwares, fundamentados no objetivo de minimizar a demanda computacional (Elsakka et al. 2022).

O *DesignXplorer* disponibiliza uma gama de modelos de DOE, sendo o "*Central Composite Design*" (CCD) o padrão deste software e o recomendado devido a suas vantagens que atribuem a este uma alta aplicação em pesquisas atuais (Elsakka et al. 2022; Ansys,2021). Este modelo de DOE consiste num fatorial fracionado de cinco níveis de maior aplicabilidade na determinação de amostras para obtenção de superfícies de resposta (Elsakka et al. 2022). Este fato está fundamentado em sua característica de ser um modelo DOE que oportuniza a obtenção de superfícies de resposta com bom ajuste aos dados de entrada (Elsakka et al. 2022). Outra vantagem é que este modelo DOE permite a aplicação de até 20 amostras (Ansys, 2021). Por estas vantagens, o CCD foi especificado ao DOE do estudo de otimização proposto.

O *DesignXplorer* disponibiliza uma ampla gama de modelos de CCD para a obtenção do melhor ajuste entre RSM e DOE. O software DOE disponibiliza a opção "*Auto Defined*" que procede a análise dos dados de entrada / saída, especificando o modelo CCD mais aquedado. Portanto, a configuração padrão "*Auto Defined*" foi aplicada ao estudo de otimização proposto.

No módulo DOE do *DesignXplorer* são especificadas as variáveis geométricas de projeto aplicados ao estudo de otimização proposto (ângulo de curvatura do refletor, razão de cubo do concentrador e fator de indução axial, descritos na seção 3.2.1.2). Adicionalmente, neste módulo DOE são especificados os limites superiores e inferiores de aplicação destes três parâmetros, os quais são descritos e justificados nas seções 3.2.1.2.1, 3.2.1.2.2 e 3.2.1.2.3.

Estes dados oportunizam ao software a geração da Tabela de pontos de projetos ("*design points*") aplicados ao estudo de otimização do concentrador híbrido. Esta Tabela apresenta quinze pontos de projeto, montante especificado em função do número de variáveis analisadas na otimização. Após especificados os pontos de projeto no DOE, o *DesignXplorer* associado ao *Workbench* irá proceder a aplicação de cada um destes pontos de projeto no *Design Modeler* (gerando geometrias), *Meshing*(gerando malhas) e *Fluent*(fluidodinâmica computacional) para obtenção das gerações de eletricidade anual, conforme fluxo descrito na Figura 3.18.

A determinação da Tabela dos pontos de projeto e resultados do CFD estabelecem a obtenção da superfície de resposta, desenvolvida no módulo do *DesignXplorer* que apresenta esta mesma denominação.



Figura 3.18 - Fluxo estabelecido entre o DOE e a simulação numérica parametrizada.

3.2.6.3. SUPERFÍCIE DE RESPOSTA ("Response Surface Methodology")

A metodologia da superfície de resposta ("*Response surface methodology*" - *RSM*) consiste no método de determinação de funções que expressam os parâmetros de saída em termos de seus parâmetros de entrada de um determinado fenômeno ou processo (Amaral et al. 2022). A obtenção da superfície de resposta é comumente fundamentada nos resultados de simulações numéricas estabelecidas nos pontos de projeto especificados pelo DOE (Amaral et al. 2022). A superfície de resposta oportuniza a obtenção de valores de parâmetros de saída em todo o espaço de projeto ou de busca sem a necessidade de executar simulações numéricas (Amaral et al. 2022).

A superfície de resposta estabelece o mapeamento completo dos resultados da dinâmica dos fluidos computacional através de curvas e superfícies, as quais podem ser aplicadas em diferentes análises, suprimindo a execução de simulações (Amaral et al. 2022). A superfície de resposta promove o gerenciamento de pontos de projeto por meios gráficos, estabelecendo o modelamento matemático entre os parâmetros de saída e entrada do processo analisado, possibilitando a realização de alterações de projeto fundamentadas em melhorarias de sua eficiência (Amaral et al. 2022). Portanto, a superfície de resposta consiste numa ferramenta computacional adequada ao estudo de otimização do concentrador híbrido.

O processo de geração de superfícies de resposta no *Ansys DesignXplorer* é composto essencialmente por duas etapas, as quais são descritas nos tópicos a seguir.

- Processamento dos parâmetros de saída (resultados CFD) nos pontos de projeto definidos pelo DOE.
- Ajuste dos parâmetros de saída em função dos parâmetros ou variáveis de entrada mediante aplicação de métodos de regressão.

O software RSM disponibiliza o algoritmo "Genetic Aggregation" aplicado na geração da superfície de resposta, sendo este especificado para a geração da RSM do estudo de otimização proposta. Este algoritmo automatiza o processo de seleção, configuração e geração do tipo de RSM mais adequada para cada parâmetro de saída da análise em desenvolvimento. A partir dos métodos de geração de superfície de resposta disponíveis neste software ("Full 2nd-Order Polynomials", "Non-Parametric Regression", "Kriging", e "Moving Least Squares"), este algoritmo promove a seleção automática do tipo de RSM que consiste na abordagem mais adequada para parâmetro de saída.

Este algoritmo demanda mais tempo para a geração da RSM e, consequentemente, maior recurso computacional quando comparado aos métodos clássicos de geração de superfícies de resposta. Isto porque processa múltiplas soluções de superfícies de resposta sob validação cruzada, obtendo RSM de maior precisão que as obtidas pela aplicação direta de modelos clássicos. A precisão da RSM depende fundamentalmente dos seguintes fatores.

- Complexidade nas variações dos parâmetros de entrada e saída.
- Adequado número de parâmetro ou variáveis de entrada especificados no DOE.
- Especificação do método de obtenção de RSM adequado ao estudo em desenvolvimento.

Este algoritmo apresenta o recurso de refinamento, fundamentado no erro máximo constatado entre os resultados obtidos no DOE e no RSM. Estes erros máximos referentes aos parâmetros ou variáveis de saída são apresentados numa tabela, e caso algum destes não seja adequado, é disponibilizado ao usuário a especificação do máximo erro aceitável. Deste modo, o algoritmo realiza o refinamento a partir da geração e simulação de novos pontos de projeto, denominados pontos de refinamento, até que se obtenha o erro máximo especificado.

O software de otimização de superfície de resposta desenvolve sua operação a partir dos dados extraídos da RSM. Portanto a qualidade da superfície de resposta gerada é imprescindível ao estudo de otimização. A análise da qualidade da RSM gerada é realizada pela tabela de avaliação de ajuste da RSM e DOE (*Goodness of fit table*) e o diagrama de parâmetros de saída normalizado obtidos pela RSM e DOE(*Predicted vs. observed chart*).

A tabela de avaliação de ajuste da RSM e DOE verifica a qualidade do ajuste entre os dados obtidos pela superfície de resposta e pelo DOE, mediante análise comparativa estabelecida em determinados critérios. Os critérios de avaliação da qualidade do ajuste entre RSM e DOE consistem no coeficiente de determinação, erro quadrático médio, máximo erro absoluto e erro absoluto médio. A qualidade do ajuste está intimamente relacionada a especificação do algoritmo aplicado na geração da superfície de resposta. Deste modo, caso a qualidade do ajuste não seja satisfatória, deve-se proceder alteração de especificação do algoritmo aplicado na obtenção da RSM.

O diagrama de parâmetros de saída normalizado verifica a qualidade da superfície de resposta num diagrama de dispersão que permite analisar graficamente a qualidade da superfície de resposta. A análise gráfica de qualidade da RSM é fundamentada na proximidade dos pontos da linha diagonal de referência; quanto mais próximos, melhor a qualidade da superfície de resposta.

3.2.6.4.OTIMIZAÇÃO ORIENTADA A OBJETIVOS("Goal Driven Optimization")

A otimização orientada a objetivos ("*Goal Driven Optimization*" - *GDO*) consiste numa ferramenta computacional do *Ansys DesignXplorer* a qual é comumente aplicada em pesquisas de estudos de otimizações.Em Shiri (2021) e Wang et al. (2019) foram desenvolvidas pesquisas fundamentadas na metodologia de otimização aplicada neste presente estudo. Em Shiri (2021) é desenvolvida uma otimização geométrica parametrizada aplicando o GDO de superfície de resposta. Em Wang et al. (2019) é desenvolvida uma otimização geométrica multiobjetivo pela aplicação do GDO de superfície de resposta e algoritmo MOGA.

O DesignXplorer apresenta dois softwares de otimização orientada a objetivos; direta ("Direct Optimization") e de superfície de resposta ("Response Surface Optimization").

Na otimização direta são realizados de estudos(mono ou multiobjetivo)fundamentados em amostras ou pontos de projetos ("*design points*") obtidos em simulações numéricas (Ansys, 2021). Neste software são desenvolvidos estudos de otimização pela aplicação dos algoritmos *Screening*,NLPQL,MISQP,"*Adaptive Single-Objective*" e "*Adaptive Multiple-Objective*".

Na otimização de superfície de resposta são desenvolvidos estudos (mono ou multiobjetivo) estritamente sob os dados extraídos da superfície de resposta (Ansys, 2021). Entretanto, esta superfície de resposta é gerada a partir de amostras ou pontos de projetos oriundos de simulações numéricas e especificados pelo DOE ("design of experiments") (Ansys, 2021). A otimização de superfície de resposta é realizada pela aplicação dos algoritmos *Screening*, NLPQL, MISQP e MOGA.

Conclusivamente, a otimização de superfície de resposta apresenta um conjunto de técnicas de otimização aplicadas na obtenção do projeto otimizado, sendo orientado pelos objetivos estabelecidos (funções objetivo), parâmetros de projeto (variáveis) e resultados obtidos na amostragem dos projetos (DOE)(Ansys, 2021).

A otimização geométrica multiobjetivo do concentrador híbrido foi realizada pela aplicação do módulo de otimização de superfície de resposta, sendo esta especificação fundamentada nas seguintes vantagens:

- Otimização fundamentada em modelos matemáticos os quais propiciam a exploração ampla e eficiente do espaço de busca em problemas complexos onde as relações entre as variáveis de entrada e as respostas do sistema são não triviais.
- A aplicação associada do DOE nesta metodologia oportuniza a redução do número de simulações necessárias para encontrar soluções ótimas e, consequentemente, redução dos custos computacionais e tempo necessário para chegar a uma solução ótima.

Em suma, a otimização geométrica multiobjetivo do concentrador híbrido foi realizada pela aplicação da metodologia de superfície de resposta, pois esta consiste numa abordagem flexível, sistemática e eficiente de otimização de projetos de engenharia de alta complexidade, sendo eficaz na busca de soluções ótimas sob respostas de sistema não triviais.

O DesignXplorer disponibiliza dois algoritmos multiobjetivo: Screening e MOGA.

O *Screening* consiste num algoritmo de geração de amostras direta estabelecida em objetivos e restrições (Ansys, 2021). Este algoritmo é comumente aplicado na determinação de múltiplos candidatos preliminares, os quais devem ser refinados pela aplicação de algoritmo baseado em gradientes (MISQP)(Ansys, 2021). Conclusivamente, a singular desvantagem deste algoritmo

consiste em apresentar resultados oriundos de ótimos locais (múltiplos candidatos preliminares). Esta caraterística origina uma nova desvantagem que consiste na necessidade de aplicação de outro algoritmo para avaliar os múltiplos candidatos preliminares (ótimos locais). A composição de algoritmos sugerida para viabilizar o uso do *Screening* consiste numa metodologia de menor robustez que a aplicação do algoritmo genético MOGA. Os algoritmos genéticos se apresentam como um contraponto ao *Screening*, sendo notórios em determinar o ponto ótimo global com ínfima possibilidade de apresentar resultados oriundos de pontos ótimos locais, caso configurado corretamente.

Em suma, o MOGA consiste num AGs adequado a determinação do ponto ótimo global de projetos, especificando múltiplos candidatos (Ansys, 2021). Portanto, este algoritmo, detalhado na seção 2.9.1, foi aplicado ao estudo de otimização do concentrador híbrido.

A Tabela 3.6 apresenta a parametrização intrínsecas aos *AGs* aplicada ao algoritmo genético MOGA para a realização do estudo de otimização proposto.

Configurações	Valores atribuídos			
Número inicial de amostras	500			
Número de amostras por iteração	500			
Porcentagem máxima de Pareto permitida	75			
Porcentagem de estabilidade de convergência	1			
Número máximo de iterações	500			
Número máximo de candidatos	10			

Tabela 3.6 - Configurações intrínsecas aos AGs aplicadas a otimização.

Esta parametrização foi fundamentada na teoria demonstrada na revisão bibliográfica da seção 2.9.1 e no Ansys, (2021). A efetividade da aplicação desta configuração será verificada através da análise dos resultados obtidos (pontos candidatos). Esta avaliação é realizada pelo próprio software, validando, consequentemente, a otimização realizada.

No campo objetivos, foi especificado a maximização da Equação (3.25) de geração anual de eletricidade pelas conversões de energia solar e eólica (G_{AESH}). Esta equação, composta por outras três equações [(3.11)(3.12) (3.24)], é demonstrada a seguir.

$$G_{AESH} = G_{AES} + G_{AEE} + G_{AEEH}$$
(3.25)

Deste modo, a metodologia proposta foi integralmente apresentada e detalhada. Encerrando esta seção, na Figura 3.19 é demonstrado o fluxograma da metodologia para a otimização geométrica multiobjetivo do concentrador híbrido.



figura 3.19 - fluxograma da metodologia proposta a otimização do concentrador híbrido.

3.3.CURVAS CARACTERÍSTICAS DO CONCENTRADOR OTIMIZADO

As curvas características ou curvas de comportamento em máquinas de fluxo podem ser definidas como representações gráficas que descrevem seu desempenho por meio de relações entre variáveis operacionais e/ou fundamentadas na potência (Dick, 2022; Bran e Souza, 1969). Estas curvas são preponderantes para a compreensão e análise do comportamento de máquinas de fluxo nas diversas condições operacionais e sobretudo, em seu ponto de operação (Dick, 2022; Bran e Souza, 1969). Do mesmo modo, as curvas de comportamento são vitais na aplicação e projeto destas máquinas, pois permitem a análise de seu desempenho em seu ponto de projeto e, por conseguinte, fornecem informações valiosas aos estudos de otimização (Dick, 2022; Li e Zheng, 2017). Estas curvas podem ser traçadas através de dados obtidos em ensaios de máquinas reais ou através de simulações numéricas (CFD) (Dick, 2022; Pinto, et al. 2016).

Os típicos diagramas de comportamento de turbinas eólicas são fundamentados na potência de eixo (*Pe*) ou coeficiente de potência em função de suas variáveis operacionais; velocidade angular (*n*), velocidade da corrente livre (U_{∞}) e razão de velocidades na ponta da pá (λ) (Jha, 2010;Hau, 2016). Estas curvas oportunizam o entendimento e análise do comportamento de turbinas eólicas em diferentes condições operacionais(Jha,2010;Hau, 2016).

O diagrama de coeficiente de potência *vs* razão de velocidades na ponta da pá apresenta a maior relevância dentre os típicos diagramas de comportamento de turbinas eólicas (Jha, 2010; Hau, 2016). Isto porque, além demonstrar o comportamento de turbinas eólicas sob duas variáveis preponderantes, este diagrama apresenta o comportamento característico de turbinas eólicas em função de seus aspectos construtivos, conforme mostrado na Figura 3.20 (Jha, 2010; Hau, 2016).



Figura 3.20 - Curvas características de (C_P) vs (λ) para os modelos de rotores eólicos Fonte: Adaptado de Jha (2010) e Hau (2016)

Este diagrama é vital na análise de viabilidade técnico-econômica de implantação de turbinas eólicas, pois através de dados fornecidos pelo diagrama associados a informações de custos e disponibilidade eólica, é possível verificar qual modelo apresenta maior viabilidade técnico-econômica para a aplicação desejada (Jha, 2010;Hau, 2016). A Figura 3.20 apresenta o diagrama de coeficiente de potência *vs* razão de velocidades na ponta da pá para variadas configurações construtivas de rotores.

O levantamento da curva característica de um rotor eólico recém-projetado pelo diagrama do coeficiente de potência *vs* razão de velocidades na ponta da pá consiste num procedimento imprescindível (Jha, 2010; Hau, 2016). Isto porque a curva obtida permite que a eficiência do rotor projetado seja comparada e analisada em relação a curva do rotor construtivamente similar descrito na Figura 3.20 (Jha, 2010; Hau, 2016). Complementarmente, o diagrama obtido para o rotor projetado permite a identificação da razão de velocidades na ponta da pá correspondente ao ponto de operação ótimo / ideal, sendo este o pico de eficiência onde o coeficiente de potência é máximo (Jha, 2010; Hau, 2016). A determinação do ponto de operação ótimo é imprescindível, pois oportuniza a máxima geração de eletricidade do rotor eólico projetado, estabelecendo o melhor aproveitamento da fonte renovável e aumentando assim a contribuição da energia eólica a matriz energética (Jha, 2010; Hau, 2016).

Dois diagramas complementam o mapeamento fundamental do comportamento de turbinas eólicas; potência de eixo (*Pe*) vs velocidade angular do rotor (*n*) e coeficiente de potência vs velocidade angular do rotor(*n*), sendo estes estabelecidos em distintas curvas de velocidades do ventos (Jha, 2010; Ganjefar e Ghasemi, 2014; Darwish et.al. 2019). Estes diagramas e suas respectivas curvas características são demonstradas na Figura 3.21 e na Figura 3.22.



Figura 3.21 - Curvas características de (T) vs (n) para cada (U_{∞}) e curva (P_{max}) Fonte: Adaptado de Jha (2010) e Darwish et.al. (2019).



Figura 3.22 - Curvas características de (C_P) vs (n) para cada (U_{∞}) Fonte: Adaptado de Ganjefar e Ghasemi (2014) e Darwish et.al. (2019).

Ambos os diagramas permitem o mapeamento do comportamento de rotores eólicos em diferentes condições do vento, gerando curvas características para cada velocidade de vento aplicada ou simulada (Jha, 2010; Ganjefar e Ghasemi, 2014; Darwish et.al. 2019). Deste modo, em ambos diagramas para cada velocidade de vento analisada, a velocidade angular constituise como a variável preponderante na determinação dos pontos de operação de máxima eficiência (Jha, 2010; Ganjefar e Ghasemi, 2014; Darwish et.al. 2019). Conclusivamente, estes diagramas oportunizam a determinação dos pontos de operação de máxima eficiência para variadas condições de disponibilidade da fonte de energia eólica (Jha, 2010; Ganjefar e Ghasemi, 2014; Darwish et.al. 2019).

O projeto otimizado do concentrador híbrido oportuniza o levantamento de suas curvas de comportamento na conversão de energia eólica. Estes diagramas permitem o mapeamento completo do comportamento do concentrador híbrido na conversão de energia eólica. Portanto, fundamentado nos tradicionais diagramas de comportamento de rotores eólicos descritos na Figura 3.20, Figura 3.21 e Figura 3.22, este estudo levantará as três principais curvas características do concentrador otimizado na conversão de energia eólica.

3.4. ANÁLISE ECONÔMICA DO SISTEMA HÍBRIDO OTIMIZADO

Após a obtenção da geometria otimizada do concentrador híbrido e determinado a geração de eletricidade anual maximizada do sistema híbrido proposto, será realizada a análise econômica

do sistema otimizado fundamentada na metodologia aplicada em Shboul et al. (2021), Allouhi et al. (2022) e Stehly e Duffy (2020). Nesta análise são determinados e comparados os custos nivelados de energia (LCOE) de três sistemas de conversão de energia, conforme descrito na Figura 3.23:

- Sistema proposto equipado com o concentrador híbrido otimizado (Figura 3.23-a);
- Sistema Dish-Stirling não hibridizado análogo (Figura 3.23-b);
- Sistema híbrido composto por sistema Dish-Stirling análogo e turbina eólica de eixo horizontal (Figura 3.23-c).



Figura 3.23 - Sistemas de conversão de energia aplicados a análise econômica.

A taxa de juros (*i*) e a vida útil dos equipamentos (*N*) aplicados na análise econômica são de 0,05% e 30 anos, respectivamente (Shboul et al. 2021). O fator de recuperação de capital (*Capital recovery factor - CRF*) foi determinado através da Equação (3.24) (Shboul et al. 2021).

$$CRF = \frac{i(1+i)^{N}}{(1+i)^{N} - 1}$$
(3.26)

O custo de investimentos (*TCC "Total capital cost"*), composto pelos custos direto ("*DCC "Direct capital cost"*) e indireto (*ICC "Indirect capital cost"*), foi obtido pelo produto do custo específico de investimento pela potência nominal do sistema de conversão de energia (Shboul et al. 2021). O custo específico de investimento (*TCCe*) apresenta sensível variação em função da potência instalada; quanto maior a potência, menor este custo (Stehly e Duffy, 2020). Em Stehly e Duffy (2020), o custo específico de investimento para turbinas eólicas variam de 1.462 U\$/kW e 5.675 U\$/kW para potências de 2,8 MW e 20 kW, respectivamente. Em sistemas Dish-Stirling são apresentados custos específicos de investimento de 12.780 U\$/kW (Allouhi et al. 2022) e 2.357 U\$/kW (Abdelhady, 2020) para potências de 10 kW e 50 MW, respectivamente. Considerando a potência nominal do sistema híbrido proposto em seu projeto inicial (aproximadamente 2 kW), serão adotados aos três sistemas de conversão de energia aplicados

a análise econômica os custo específicos de investimento de 5.675 U\$/kW para sistemas de conversão de energia eólica e de 12.780U\$/kW para sistemas de conversão de energia solar.

Os custos indiretos de sistemas Dish-Stirling e turbinas eólicas são basicamente composto por três parcelas de custos; preparação / construção de área, instalação / montagem / infraestrutura / engenharia e contingência / diversos (Shboul et al. 2021) (Stehly e Duffy, 2020).

O custo indireto referente a sistemas Dish-Stirling é determinado em função de seu custo direto, sendo que suas três parcelas de custos (preparação / construção de área, instalação / montagem / infraestrutura / engenharia e contingência / diversos) correspondem respetivamente a 16%, 10% e 3% de seu custo direto (Shboul et al. 2021). Deste modo, o custo indireto de sistemas Dish-Stirling é de 29% do capital direto.

O valor do custo de investimentos e sua definição associado a definição do custo indireto oportunizou obter-se os custos específicos diretos e indiretos de sistemas Dish-Stirling para potência nominal de até 10 kW, sendo estes respectivamente 9.751 U\$/kW e 2.827U\$/kW. Por conseguinte, os custos direto e indireto dos sistemas Dish-Stirling foram obtidos pelo produto de seus custos específicos pela potência nominal do sistema de conversão de energia (Shboul et al. 2021).

Os custos específicos direto e indireto em turbinas eólicas de potência nominal até 20 kW são respectivamente 2.575U\$/kW e 3.100U\$/kW, conforme Stehly e Duffy (2020). Considerando os sistemas híbridos (análogo e proposto), a análise comparativa estabelecida nas parcelas de custos indiretos de seus subsistemas de conversão de energia eólica demostra que a hibridação proposta culmina numa economia de 66% neste custo. Esta economia foi obtida pois o subsistema de conversão de energia eólica pertencente ao sistema híbrido proposto não requer integralmente o montante do custo indireto necessário a implementação de tradicionais turbinas eólicas. O custo de preparação / construção de área é contemplado no custo indireto do subsistema de conversão de energia solar do sistema híbrido proposto, portanto é integralmente dispensável. Segundo detalhamento desta parcela realizado por (Stehly e Duffy, 2020), este custo representa 21% do custo indireto os subsistema de conversão de energia eólica. O custo de instalação / montagem / infraestrutura / engenharia, também é contemplado no custo indireto do subsistema de conversão de energia solar do sistema híbrido proposto, entretanto não pode ser integralmente excluído. Segundo detalhamento desta parcela realizado por (Stehly e Duffy, 2020), a hibridização promoveria uma economia de 75% nesta parcela, pela exclusão dos custos de infraestrutura do sistema de potência elétrico e montagem / instalação da turbina eólica. O custo de contingência / diversos permaneceria inalterado.

Os custos direto e indireto dos sistemas híbridos são obtidos pela soma dos seus respectivos custos inerentes aos seus subsistemas de conversão de energia solar e eólica.

O custo operacional variável (*VOC*) de sistemas Dish-Stirling e de turbinas eólicas é 0,06 U\$/kWh, de acordo com Shboul et al. (2021). Considerando a definição de custo operacional variável e o conceito do sistema híbrido proposto (conversão de energia solar e eólica num dispositivo único), os custos operacionais variáveis de seus subsistemas de conversão de energia foram adotados em 75% do (*VOC*) de cada sistema de conversão de energia, ou seja, 0,045 U\$/kWh.

As taxas fixas (*FCR*) de sistemas Dish-Stirling e de turbinas eólicas são respectivamente 0,098 e 0,062, conforme Shboul et al. (2021) e Stehly e Duffy, (2020). Sendo o sistema híbrido proposto um dispositivo único, seu (*FCR*) foi considerado como sendo a média das taxas fixas de seus sistemas de conversão de energia eólica e solar.

A geração anual de eletricidade (G_{AE}) dos três sistemas de conversão de energia analisados oportunizam a determinação do custo nivelado de energia (LCOE) através da Equação (3.25) (Shboul et al.2021).

$$LCOE = \frac{TCC \ CRF + \ FCR \ CC}{G_{AE}} + VOC$$
(3.27)

A hibridização proposta requer investimentos para a modificação do sistema Dish-Stirling (implementação do subsistema de conversão de energia eólica). Logo, será realizada uma análise de sensibilidade para determinar o valor máximo de investimento que ainda mantém o o LCOE do sistema híbrido proposto menor que o de seus análogos.

4.RESULTADOS

4.1.REVISÃO DE PROJETO DO CONCENTRADOR HÍBRIDO

A revisão do projeto inicial do concentrador híbrido do tipo disco parabólico identificou oportunidades de melhorias aerodinâmicas e constatou simplificações adotadas na dinâmica dos fluidos computacional que estabelecem sensíveis alterações na análise da conversão de energia eólica.Nas seções de 4.1.1 a 4.1.5 são mostradas as oportunidades e simplificações identificadas, as propostas e os resultados obtidos pela implementação das alterações.

4.1.1. IMPLEMENTAÇÃO DO CONJUNTO RECEPTOR NO CFD

Em uma simplificação adotada na dinâmica dos fluídos computacional do projeto inicial do concentrador híbrido, foi desconsiderado o conjunto receptor (composto por receptor, motor Stirling e gerador de eletricidade) do sistema híbrido proposto. O conjunto é posicionado de acordo com sua premissa operacional, a qual determina que este deve ser disposto no ponto focal do concentrador (Coventry e Andraka, 2017). Na seção 2.1, a Figura 2.2 demonstra o conjunto receptor e seu posicionamento.

Ao desconsiderar o conjunto receptor da fluidodinâmica computacional, obtém-se escoamento essencialmente axial na entrada do concentrador híbrido. A Figura 4.1 demonstra o contexto enunciado através do campo de velocidades obtido pela dinâmica do fluídos computacional do projeto inicial do concentrador híbrido.



Figura 4.1 - Campo de velocidades omitindo o conjunto receptor

O conjunto receptor foi aplicado associadamente ao concentrador híbrido para a realização da fluidodinâmica computacional. O resultado desta implementação é verificado na Figura 4.2, a qual demonstra que o conjunto receptor estabelece apreciável perturbação no escoamento da região central do concentrador híbrido. Esta modificação da configuração do escoamento na entrada do concentrador híbrido impacta diretamente na conversão de energia eólica; conclusão fundamentada na teoria do momento do elemento de pá. O BEM, descrito na seção 2.7, demonstra que a conversão de energia eólica é fundamentada pelo triângulo de velocidades, e este último, fundamentado na direção dos ventos. Conclusivamente, a aplicação do conjunto receptor impacta na conversão de energia eólica.



Figura 4.2 - Campo de velocidades após implementação do conjunto receptor

A análise desenvolvida demonstra a relevância da implementação do conjunto receptor na fluidodinâmica computacional. Entretanto, esta relevância é ratificada pela inclusão do fato de que a posição do conjunto receptor é estabelecida pelo ponto focal do concentrador híbrido. O ponto focal do concentrador híbrido é determinado pela Equação (3.21), que ao ser analisada, demonstra que o posicionamento do conjunto receptor é estabelecido sobretudo pelo ângulo de curvatura do concentrador; uma das variáveis geométricas a serem otimizadas no estudo proposto.

Conclusivamente, o conjunto receptor modifica o escoamento na entrada do concentrador e suas variações de posicionamento geradas pelos diversos ângulos de curvatura implementados na otimização estabelecerão múltiplas alterações no escoamento da entrada do concentrador, impactando na conversão de energia eólica de cada ponto de projeto analisado no estudo de

otimização proposto. Adicionalmente, a aplicação do conjunto receptor ratifica a relevância da definição do ângulo de curvatura como variável geométrica do estudo de otimização proposto.

4.1.2.IMPLEMENTAÇÃO DE ABERTURA NO REFLETOR CENTRAL

Os resultados obtidos pela dinâmica dos fluidos computacional realizada no projeto inicial do concentrador híbrido (Figura 4.1), demonstram que há estagnação do escoamento nas regiões frontal e posterior de seu refletor central. Estas regiões geram vórtices e turbulência que prejudicam a convergência da CFD e a conversão de energia eólica (Versteeg e Malalasekera, 2007).

A constatação e análise desta condição pontual e singular do escoamento culminaram na proposta de implementação de abertura circular no refletor central objetivando diminuir a estagnação. A análise incipiente indica que esta abertura estabeleceria diminuição de área de reflexão do concentrador, impactando diretamente na conversão de energia solar. Entretanto, a simulação computacional (numérica) da reflexão solar no concentrador híbrido demonstrou a existência de região de sombreamento no refletor central devido ao conjunto receptor. A Figura 4.3 ilustra a região de sombreamento no refletor central.



Figura 4.3 - Reflexão solar e região de sombreamento no refletor central

A constatação da região de sombreamento oportunizou a especificação da área de abertura do refletor central que efetivamente não interfere na conversão de energia solar. A aplicação de abertura circular na região de sombreamento de concentradores solares do tipo disco parabólico é comumente verificada em referências bibliográficas.

A aplicação de abertura no refletor central do concentrador híbrido oportunizou a realização da fluidodinâmica computacional com o objetivo de comprovar a efetividade da proposta, sendo



demonstrado na Figura 4.4 os resultados obtidos.

Figura 4.4 - Campo de velocidades: concentrador híbrido com abertura no refletor central

A análise comparativa dos resultados da fluidodinâmica computacional apresentados nas Figuras 4.1 e 4.4 demonstram que a estagnação nas regiões posterior e anterior no refletor central diminuíram significativamente pela implementação da abertura. Consequentemente, comprova-se a efetividade da proposta de implementação de abertura no refletor central.

4.1.3.MELHORIAS AERODINÂMICAS NO ANEL EXTERNO

A nova configuração do escoamento gerada pela implementação definitiva do conjunto receptor no projeto inicial do concentrador híbrido fomentou a realização de uma análise aerodinâmica sob o concentrador híbrido. A análise adotou uma posição intermediaria do conjunto receptor fundamentada nos limites superior e inferior do ângulo de curvatura do concentrador aplicados ao estudo de otimização. A análise foi estabelecida na fluidodinâmica computacional, sendo que os resultados obtidos constataram a existência de região de estagnação na aba frontal do anel externo (Figura 4.5-b) que, por conseguinte, gera vórtices e turbulências a jusante do escoamento (Figura 4.5-a). Adicionalmente, foi constatado região de estagnação na aba traseira do anel externo, localizado próximo ao engaste entre extradorso da pá e o anel externo. Esta estagnação na aba traseira do anel externo gera alterações na distribuição de pressão do extradorso da pá (exclusivamente na região de engaste com a anel externo) e, consequentemente, na conversão de energia eólica. Fundamentado nesta conjectura, foi realizado um estudo para a modificação do anel externo objetivando minimizar a estagnação constatada.



Figura 4.5 - Projeto inicial do anel externo; campo de velocidades (a) pressão estática (b)

As melhorias aerodinâmicas propostas no anel externo consistem na diminuição da dimensão das abas frontal e traseira, implementação de dois recortes retangulares, sendo um localizado frontalmente aos refletores e outro, dotado de angulação no extradorso da pá. A Figura 4.6 apresenta o concentrador híbrido e o detalhe do anel externo em seus modelos inicial (a) e revisado (b).



Figura 4.6 - Concentrador híbrido e seu anel externo; projetos inicial (a) e revisado (b).

A implementação da revisão aerodinâmica do anel externo fomentou a verificação de sua efetividade mediante dinâmica dos fluidos computacional do modelo de concentrador híbrido apresentado na Figura 4.6 (b). Os resultados desta simulação são apresentados na Figura 4.7; campo de velocidades do escoamento (a) e distribuição de pressão estática (b).



Figura 4.7 - Anel externo revisado - campo de velocidades (a) pressão estática (b)

A análise comparativa estabelecida nos resultados da fluidodinâmica computacional do campo de velocidades apresentados na Figura 4.6 (a) e Figura 4.7 (a) demonstram que houve sensível diminuição da estagnação e formação de vórtices na região analisada. A diminuição da estagnação do escoamento também é verificada na análise comparativa entre a Figura 4.6 (b) e Figura 4.7 (b), onde observa-se uma sensível diminuição na pressão estática nas paredes do concentrador na região analisada. Os vórtices presentes no escoamento analisado prejudicam a convergência na dinâmica dos fluidos computacional, portanto esta modificação será de grande relevância ao estudo da otimização. Conclusivamente, as modificações propostas no anel externo estabeleceram melhorias aerodinâmicas no concentrador híbrido.

4.1.4. IMPLEMENTAÇÃO DO SUPORTE DO CONCENTRADOR HÍBRIDO

A implementação de abertura no refletor central proposta na seção 4.1.2 impossibilita a aplicação do sistema de transmissão de torque (Figura 2.10 - item 6) constituinte do subconjunto dinâmico(Figura 2.11 a), conforme modelo conceitual mostrado na seção 2.4. A implementação desta melhoria aerodinâmica no refletor central determinou o desenvolvimento de um novo conjunto mecânico que permite o escoamento na abertura central do concentrador. Deste modo, orientado pelos aspectos aerodinâmicos, o novo conjunto mecânico foi projetado, composto por um eixo central em formato de ogiva em sua extremidade, suportes tubulares maciços e um anel

disposto internamente ao anel interno do concentrador. Na Figura 4.8 são apresentados o modelo do conjunto mecânico e seus componentes (a), assim como sua aplicação no concentrador híbrido (b).



Figura 4.8 - Novo conjunto suporte (a) e sua montagem no concentrador híbrido (b)

O conjunto mecânico foi desenvolvido sob a premissa de desempenhar atribuição de suporte; um contraponto em relação ao conjunto inicial que tinha a função de transmissão de torque. Deste modo, este novo conjunto mecânico permanece estático durante a convenção de energia eólica; o movimento de rotação do concentrador híbrido ocorre sobre o seu anel, descrito na Figura 4.8 (a). Este conceito oportuniza a aplicação do gerador de eletricidade do modelo, amplamente utilizado em turbinas hidráulicas Kaplan.

Na fluidodinâmica inicial do concentrador híbrido, o sistema de transmissão de torque foi desconsiderado e uma simplificação foi adotada; todo o concentrador híbrido era dotado de movimento de rotação. A proposta inicial do sistema híbrido descrito na seção 2.4 demonstra claramente que apenas a região entre o anel interno e anel externo são dotados de movimento de rotação. Portanto, o modelo aplicado a dinâmica dos fluidos computacional considerou o novo conjunto suporte e que apenas a região entre os anéis interno e externo são dotados de movimento de rotação. Esta condição é demonstrada na seção 3.2.2 mediante apresentação da seção periódica aplicada a otimização proposta.

4.1.5.IMPLEMENTAÇÃO DE CARENAGEM NO CONJUNTO SUPORTE

O primeiro modelo do novo conjunto suporte do concentrador híbrido demonstrou que há uma região de turbulência e formação de vórtices entre os escoamentos que ocorrem através das pás e da abertura do refletor central. A Figura 4.9 demonstra a fluidodinâmica computacional do modelo inicial do novo conjunto suporte do concentrador híbrido e a região de turbulência e formação de vórtices entre os escoamentos.



Figura 4.9 - Campo de velocidades: concentrador e novo conjunto suporte (modelo inicial)

A constatação desta região de turbulência oportunizou a realização de alterações no conjunto suporte e conjunto receptor fundamentadas em melhorias aerodinâmicas, culminando em seus modelos definitivos(Figura 4.8).Os resultados obtidos pela aplicação da dinâmica dos fluídos computacional demostraram que apesar do modelo final do conjunto suporte determinar sensível diminuição da turbulência inicialmente contatada, a mesma ainda constitui um problema ao CFD, sob o aspecto de convergência. Deste modo, uma nova solução foi proposta e implementada; a carenagem entre os escoamentos que ocorrem através das pás e da abertura do refletor central. A Figura 4.10 demonstra a carenagem proposta e implementada no modelo aplicado ao fluidodinâmica computacional do estudo de otimização.



Figura 4.10 - Conjunto do concentrador híbrido aplicado a otimização (revisão final).

A implementação da carenagem oportunizou a realização da fluidodinâmica computacional para verificação da efetividade da proposta de minimização de turbulência localizada. A Figura 4.11 apresenta o campo de velocidades obtido nesta simulação, demonstrando a efetividade da implementação da carenagem.



Figura 4.11 - Campo de velocidades do concentrador híbrido (revisão final)

Os resultados demonstrados na Figura 4.11, obtidos pela aplicação da dinâmica dos fluidos computacional, definiram o modelo revisado do concentrador híbrido do tipo disco parabólico. Este modelo revisado, parametrizado em seu ponto de projeto inicial, apresentou resultado de torque 15% menor que o torque desenvolvido pelo modelo do projeto inicial. Deste modo, conclui-se que a revisão de projeto culminou num decréscimo de 15% na geração de torque. Este decréscimo de torque constatado era esperado, pois o modelo revisado agrega conjuntos anteriormente suprimidos (suporte e receptor) que efetivamente impactam na geração de torque. Em contraponto, as modificações geométricas realizadas no concentrador híbrido culminaram em melhorias aerodinâmicas que minimizam turbulências e geração de vórtices no escoamento, contribuindo para a melhor eficiência da conversão de energia eólica e convergência CFD.

Conclusivamente, o modelo revisado constitui-se numa representação mais realista do concentrador híbrido do tipo disco parabólico, oportunizando a obtenção de resultados mais precisos de torque e reflexão solar através da fluidodinâmica computacional para a realização da otimização proposta.

4.2.DOE - OTIMIZAÇÃO DO CONCENTRADOR HÍBRIDO

A aplicação do software DOE conforme metodologias aplicadas e configurações especificadas na seção 3.2.6.2, oportunizou a obtenção dos seguintes resultados apresentados na Tabela 4.1 e na Tabela 4.2.

(D_P)	(R_C)	(F_{IA})	(<i>\varphi_C</i>)	(T_C)	(P_{EC})	(C_P)	(A_C)	(P_{SR})	(<i>ηc</i>)	(η_R)	(<i>ηs</i>)	(P_S)
	[]	[]	[rad]	[N m]	[kW]	[]	[m ²]	[kW]	[%]	[%]	[%]	[kW]
1	0,35	0,24	0,45	11,33	0,47	0,14	14,8	8,01	0,86	0,906	0,271	1,52
2	0,20	0,24	0,45	3,64	0,15	0,04	18,6	10,07	0,86	0,908	0,277	1,96
3	0,50	0,24	0,45	11,34	0,47	0,17	13,4	7,33	0,86	0,904	0,268	1,37
4	0,35	0,15	0,45	7,64	0,32	0,10	14,8	8,01	0,86	0,906	0,271	1,52
5	0,35	0,33	0,45	10,59	0,44	0,13	14,8	8,01	0,86	0,906	0,271	1,52
6	0,35	0,24	0,38	11,51	0,48	0,14	14,6	8,01	0,88	0,907	0,274	1,58
7	0,35	0,24	0,53	11,27	0,47	0,14	14,8	8,01	0,83	0,903	0,267	1,44
8	0,23	0,17	0,39	6,35	0,27	0,07	17,6	9,58	0,88	0,909	0,279	1,92
9	0,47	0,17	0,39	8,50	0,36	0,12	13,4	7,35	0,88	0,906	0,271	1,43
10	0,23	0,31	0,39	4,17	0,17	0,05	17,6	9,58	0,88	0,909	0,279	1,92
11	0,47	0,31	0,39	13,30	0,56	0,19	13,4	7,35	0,88	0,906	0,271	1,43
12	0,23	0,17	0,51	6,55	0,27	0,08	17,8	9,58	0,83	0,906	0,273	1,78
13	0,47	0,17	0,51	8,69	0,36	0,12	13,6	7,35	0,83	0,903	0,265	1,32
14	0,23	0,31	0,51	4,51	0,19	0,05	17,8	9,58	0,83	0,906	0,273	1,78
15	0,47	0,31	0,51	13,45	0,56	0,19	13,6	7,35	0,83	0,903	0,265	1,32

Tabela 4.1 - Resultados referentes ao CFD, eficiências e potências gerados no DOE.



Variáveis geométricas do concentrador híbrido aplicados ao estudo de otimização.

Resultados da fluidodinâmica computacional.

Resultados do sistema do conversão de energia eólica do sistema híbrido.

Resultados do sistema de conversão de energia solar do sistema híbrido.
(D _P)	(G _{AEE})	(Gлеен)	(GAES)	(GAESH)
	[MWh/ano]	[MWh/ano]	[MWh/ano]	[MWh/ano]
1	1,93	0,08	2,66	4,67
2	0,62	0,03	3,43	4,08
3	1,93	0,08	2,41	4,42
4	1,30	0,06	2,66	4,01
5	1,80	0,08	2,66	4,54
6	1,96	0,08	2,77	4,81
7	1,92	0,08	2,52	4,52
8	1,08	0,05	3,36	4,48
9	1,45	0,06	2,50	4,01
10	0,71	0,03	3,36	4,10
11	2,26	0,10	2,50	4,86
12	1,12	0,05	3,12	4,28
13	1,48	0,06	2,32	3,86
14	0,77	0,03	3,12	3,92
15	2,29	0,10	2,32	4,70

Tabela 4.2 - Resultados gerados pelo DOE para a geração anual de eletricidade.

Os resultados obtidos na Tabela 4.1 e na Tabela 4.2 foram analisados e comparados com referências bibliográficas (Castellanos et al. 2017; Hau, 2016), estabelecendo a conclusão que os resultados obtidos no DOE são definitivamente coerentes.

4.3.RSM - GERAÇÃO DE ELETRICIDADE DO SISTEMA HÍBRIDO

Os resultados dos pontos de projeto estabelecidos no DOE oportunizaram a obtenção das superfícies de resposta mediante aplicação do software de RSM do *Ansys DesignXplorer* nas configurações especificadas na seção 3.2.7.

A primeira superfície de resposta obtida apresentou, para o torque do concentrador híbrido, erro máximo de 0,8 N m em relação ao DOE. Este erro é relevante, pois ao considerarmos o resultado de torque obtido pelo CFD do modelo revisado em seu ponto de projeto inicial, este erro representa 7%.Portanto, foi realizado o refinamento da RSM inicial com o objetivo de que este erro máximo fosse reduzido para 0,2 N m.

O refinamento estabeleceu a inclusão de quatros novos pontos de projeto à RSM. Estes novos pontos foram simulados numericamente (CFD). O resultados deste quatros novos pontos foram aplicados juntamente com os resultados do DOE para a obtenção da nova superfície de resposta. A Tabela 4.3 apresenta os erros máximos obtidos entre os resultados do DOE e a nova RSM, assim como a especificação e efetividade do refinamento.

	Mínimo	Máximo	Erro máximo	Refinamento	Tolerância
Torque [N m]	2,63	13,73	0,194	Sim	0,2
Área do concentrador [m ²]	0,67	0,94	5,43E-05	Não	-
Potência solar refletida [W]	366,5	503,3	0,0003	Não	-

Tabela 4.3 - Erro máximo entre DOE e RSM, refinamento e tolerâncias aplicadas.

A Tabela 4.3 demonstra que a nova superfície de resposta apresenta ajuste adequado aos pontos de projeto do DOE. Esta conclusão foi fundamentada numa análise percentual entre os erros máximos e os valores máximos obtidos no DOE para o torque, área do concentrador e potência refletida, que apresentaram respectivamente resultados de 1,4%,0,002% e 0,00001%.

A efetivação do ajuste de refinamento da superfície de resposta oportunizou a realização de análises subsequentes de verificação da qualidade da RSM. Estas análises foram desenvolvidas através da tabela de avaliação de ajuste da RSM e DOE (*Goodness of fit table*) e do diagrama de parâmetros de saída normalizado da RSM e DOE (*Predicted vs. observed chart*), ambas ferramentas tradicionais de verificação da qualidade da RSM. Estas ferramentas de verificação da qualidade da RSM. Estas ferramentas de verificação da qualidade da RSM, sendo, por conseguinte, aplicadas ao presente estudo.

A avaliação de ajuste entre RSM e DOE é apresentada na Tabela 4.4.

	Torque do concentrador	Área do concentrador	Potência solar refletida
Coeficiente de determinação (Melhor valor = 1)			
Pontos de aprendizagem	🚣 1	→ 1	🛃 👬 1
Validação cruzada nos pontos de aprendizagem	, 🐴 0,999	💑 1	💑 1
Erro Quadrático Médio (Melhor valor = 0)			
Pontos de aprendizagem	0,00165	9,81E-06	0,000129
Pontos de verificação	0,125	1,41E-05	0,000101
Validação cruzada nos pontos de aprendizagem	0,0807	4,15E-05	0,000314
Máximo erro absoluto (Melhor valor = 0%)			
Pontos de aprendizagem	💑 0,118	💑 0,018	🕂 0
Pontos de verificação	\star 3,79	🚓 0,014	📥 0
Validação cruzada nos pontos de aprendizagem	— 6,17	*** 0,107	🚓 0,001
Erro absoluto médio (Melhor valor = 0%)			
Pontos de aprendizagem	🚓 0,039	💑 0	0 🚓
Pontos de verificação	★ 3,79	🚓 0,0141	📥 0
Validação cruzada nos pontos de aprendizagem	★★1,87	4 ,0,0327	A 0,0005

A análise dos "*pontos de aprendizagem*" realizada na Tabela 4.4 consistem efetivamente na verificação da qualidade da interpolação realizada na geração da superfície de resposta. A análise dos "*pontos de verificação*" desenvolvida nesta mesma tabela consiste na verificação da qualidade da predição dos resultados estabelecidos pela superfície de resposta. A avaliação da

"validação cruzada nos pontos de aprendizagem" contidos na Tabela 4.4 consiste na verificação da estabilidade e confiabilidade da superfície de resposta.

Os resultados apresentados na Tabela 4.4 são avaliados segundo caracteres que classificam em "*ok*" (estrelas douradas) ou "*não ok*" (cruzes vermelhas), numa escala de um a três. A classificação intermediária entre "*ok*" e "*não ok*" é representada pela barra azul. O único critério de avaliação de qualidade que não aplica caracteres é o erro quadrático médio.

A classificação de resultados fundamentado em caracteres e escalas é definido pelo próprio software que realiza a avaliação de ajuste entre RSM e DOE. Estas escalas e caracteres avaliam e classificam os critérios de avaliação através da divergência entre resultados obtido e objetivo (na Tabela 4.4 são descritos os resultados objetivos para cada critério de avaliação).

O software de avaliação de ajuste entre RSM e DOE recomenda que a RSM seja submetida a operações de refinamento caso a tabela de avaliação apresente avaliações "*não ok*". Portanto, os resultados da Tabela 4.4 mostram que a RSM apresenta boa qualidade, pois todos resultados estão "*ok*", exceto um, que apresenta classificação intermediária entre "*ok*" e "*não ok*".

No módulo RSM foi gerado um ponto de projeto de verificação, cujo resultados de geração de eletricidade foram determinados através do CFD. A obtenção deste ponto oportunizou sua aplicação no diagrama normalizado de gerações de eletricidade oriundos da RSM (previstos) e DOE (observados) (*Predicted vs. observed chart*), sendo demonstrado na Figura 4.12.



Figura 4.12 - Diagrama normalizado das gerações anuais de eletricidade - RSM vs DOE

O diagrama normalizado das repostas do sistema (resultados) obtidos pela RSM (previstos) e pelo DOE (observados) consiste num gráfico de dispersão que permite analisar a qualidade da superfície de resposta. Esta análise gráfica de qualidade da RSM é fundamentada na proximidade dos pontos da linha diagonal; quanto mais próximos, melhor a qualidade da superfície de resposta.

O diagrama da Figura 4.12. demonstra o alinhamento dos pontos de projeto oriundos do DOE com a linha diagonal. Logo, todos os resultados de geração de eletricidade obtidos no DOE apresentam igual correspondência numérica aos resultados obtidos pela RSM. Conclusivamente, a RSM apresenta boa qualidade, reproduzindo fidedignamente todos os resultados do DOE que foram aplicados em sua obtenção. O ponto de verificação, composto por três resultados de geração de eletricidade, apresenta em um destes, ínfimo desvio em relação a linha diagonal.Esta condição é esperada, pois é intangível o perfeito ajuste entre RSM e pontos de verificação, sendo que estas variações devem apresentar desvios menores que a tolerância.

As análises estabelecidas na tabela de avaliação de ajuste da RSM e DOE e no diagrama de parâmetros de saída normalizado obtidos pela RSM e DOE demonstram que a RSM apresenta boa qualidade, portanto, validando sua aplicação no estudo de otimização.

4.3.1.ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

O processamento da RSM e sua validação oportunizam o desenvolvimento da análise de sensibilidade sob as variáveis de projetos aplicadas ao estudo de otimização e os resultados de geração de eletricidade do sistema híbrido proposto.A análise de sensibilidade proporciona o pleno entendimento dos efeitos estabelecidos pelas alterações destas variáveis de projeto nos resultados de geração de eletricidade.

O estudo de sensibilidade foi estabelecido nos dois diagramas fornecidos pelo módulo *Ansys RSM*; barras e curvas.

O diagrama de barras estabelece resultados independentes de sensibilidade para cada variável de projeto, considerando um único parâmetro de saída. Este diagrama apresenta percentualmente a influência de cada variável em relação ao parâmetro de saída analisado. Os resultados de sensibilidade positivos demonstram quantitativamente o percentual de incremento que a variável de entrada determina na variável de saída (resultados). Do mesmo modo, os resultados de sensibilidade negativos demonstram quantitativamente o percentual de decréscimo que a variável de entrada determina na variável de saída (resultados).

O diagrama de curvas demonstra graficamente a sensibilidade das variáveis de projeto ao longo de seu range (partindo do limite inferior ao superior), considerando um ponto de projeto e um único parâmetro de saída.Nesta análise,são demonstrados valores absolutos dos parâmetros de saída (resultados) no eixo y e valores normalizados das variáveis de entrada correspondentes ao range aplicado(limite inferior ao superior)no eixo x.O ponto demonstrado no gráfico onde ocorre a intersecção de todas as curvas consiste no ponto de projeto aplicado nesta análise de sensibilidade. O ponto de projeto aplicado nesta análise de sensibilidade foi definido pelo valor médio das variáveis de entrada considerando o range aplicado (limite inferior e superior).

Nas três seções a seguir serão demonstradas as análises de sensibilidade realizadas sob as variáveis de projeto aplicadas ao estudo de otimização e as gerações de eletricidades oriundas da conversões de energia eólicas e solar, assim como a geração do sistema híbrido proposto.

4.3.1.1. GERAÇÃO ORIUNDA DA CONVERSÃO DE ENERGIA EÓLICA

A Figura 4.13 (a) (b) apresenta os diagramas de análise de sensibilidade estabelecidos sob as variáveis de projetos aplicadas a otimização e a geração de eletricidade anual oriunda da conversão de energia eólica.

A Figura 4.13 (a) demonstra que a variável razão de cubo consiste na variável preponderante na conversão de energia eólica. Este resultado é esperado, pois esta variável implicitamente representa a variação das dimensões das lacunas, conforme descrito na seção 3.2.1.2.2.1. Do mesmo modo, este diagrama demonstra que que a segunda variável de maior significância na conversão de energia eólica consiste no fator de indução axial. Este resultado também é esperado, pois esta variável determina toda a geometria das pás eólicas. Neste mesmo diagrama é demonstrado que o ângulo de curvatura apresenta a menor relevância na conversão de energia eólica.





Figura 4.13 - Análise de sensibilidade: barras (a) e curvas (b); (G_{AEE}) vs (φ_C) , (F_{IA}) e (R_C) .

A Figura 4.13 (b) demonstra que a variável razão de cubo e fator de indução axial apresentam curvas sob comportamentos semelhantes, demonstrando correlação direta entre as variáveis na conversão de energia eólica. Este fato também é esperado pois variações na razão de cubo determinam variações nas dimensões das lacunas e, consequentemente, variações no fator de indução axial. A curva do ângulo de curvatura demonstra que esta variável apresenta um comportamento isolado das demais variáveis, sob baixo impacto na conversão de energia eólica.

Conclusivamente, as variáveis preponderantes na conversão de energia eólica são a razão de cubo e o fator de indução axial, as quais apresentam correlação direta entre si. Entretanto, o ângulo de curvatura é a variável com baixa influência na conversão de energia eólica. A análise gráfica de ambos diagramas demonstra que, de modo geral, incrementos nas variáveis razão de cubo e o fator de indução axial resultam em acréscimos de geração de eletricidade pela conversão de energia eólica. Esta condição poderá ser verificada na superfície de resposta.

4.3.1.2. GERAÇÃO ORIUNDA DA CONVERSÃO DE ENERGIA SOLAR

A Figura 4.14 (a) (b) apresenta os diagramas de análise de sensibilidade estabelecidos sob as variáveis de projetos aplicadas a otimização e a geração de eletricidade anual oriunda da conversão de energia solar.



Figura 4.14 - Análise de sensibilidade: barras (a) e curvas (b); (G_{AES}) vs (φ_C) , (F_{IA}) e (R_C)

A Figura 4.14 (a) demonstra que a variável razão de cubo consiste na variável preponderante na conversão de energia solar. Este resultado é esperado pois, conforme mencionado na seção anterior, esta variável representa implicitamente a variação das dimensões das lacunas e, por conseguinte, a área de reflexão. Do mesmo modo, este diagrama demonstra que que a segunda variável de maior significância na conversão de energia solar consiste no ângulo de curvatura.

Este resultado também é esperado, pois esta variável determina diretamente a área de reflexão. Neste mesmo diagrama é demonstrado que o fator de indução axial não apresenta nenhum impacto na conversão de energia solar. Este resultado é igualmente esperado, pois o fator de indução axial consiste numa variável exclusiva da conversão de energia eólica.

A Figura 4.14 (b) demonstra que a variável razão de cubo e fator de indução axial apresentam curvas decrescentes a medida que seus valores se aproximam de seus limites superiores. Este resultado é esperado, pois em ambas as variáveis, acréscimos em seus valores correspondem a decréscimo na área de reflexão. A curva do fator de indução axial demonstra que esta variável não apresenta o impacto algum na conversão de energia solar.

Conclusivamente, as variáveis preponderantes na conversão de energia solar são a razão de cubo e o ângulo de curvatura, sendo o fator de indução axial a variável que efetivamente não apresenta influência na conversão de energia solar. A análise gráfica de ambos diagramas demonstra que, de modo geral, decréscimos nas variáveis razão de cubo e o ângulo de curvatura resultam em decréscimos de geração de eletricidade pela conversão de energia solar. Esta condição poderá ser verificada na superfície de resposta.

4.3.1.3. GERAÇÃO DE ELETRICIDADE DO SISTEMA HÍBRIDO PROPOSTO

A Figura 4.15 (a) (b) apresenta os diagramas de análise de sensibilidade estabelecidos sob as variáveis de projetos aplicadas a otimização e a geração de eletricidade anual do sistema híbrido proposto.





Figura 4.15 - Análise de sensibilidade: barras (a) e curvas (b); (G_{AESH}) vs (φ_C) , (F_{IA}) e (R_C)

Primeiramente, antes da realização de qualquer análise especifica, um importante conceito deve ser considerado; a geração de eletricidade do sistema híbrido consiste efetivamente no somatório das gerações de eletricidade oriundas da conversão de energia eólica e solar. Por conseguinte, os diagramas de sensibilidade da Figura 4.15 (a) são obtidos respectivamente pelo somatório dos resultados de sensibilidade do diagramas das Figura 4.13 (a) e Figura 4.14 (a). Igualmente, as curvas de sensibilidade da Figura 4.15 (b) são obtidas pela composição das curvas de sensibilidade das Figura 4.13 (b) e Figura 4.14 (b).

A Figura 4.15 (a) demonstra que todas as variáveis geométricas aplicadas ao estudo de otimização apresentam influência na geração de eletricidade do sistema híbrido proposto. Este resultado é esperado e sobretudo, valida toda a análise desenvolvida na seção 3.2.1.2.

A Figura 4.15 (a) demonstra que a variável preponderante na geração de eletricidade do sistema híbrido consiste no fator de indução axial. Esta condição é verificada pois a variável apresenta influência exclusiva na conversão de energia eólica, sendo reproduzida fidedignamente na geração de eletricidade do sistema híbrido.

A Figura 4.15 (a) demonstra que a razão de cubo consiste numa variável de grande relevância a geração de eletricidade do sistema híbrido. A razão de cubo apresenta influência menor que o fator de indução axial na geração de eletricidade do sistema híbrido, pois sua influência na conversão de energia eólica e solar são conflitantes, conforme observado nos diagramas das Figura 4.13 (a) e Figura 4.14 (a).

A Figura 4.15 (a) demonstra que o ângulo de curvatura consiste na variável de menor influência na geração de eletricidade do sistema híbrido. Apesar de ser a menor, sua influência é significante na geração de eletricidade do sistema híbrido, pois é composta pelas parcelas oriundas das conversões de energia eólica e solar.

A Figura 4.15 (b) demonstra que as variáveis razão de cubo e fator de indução axial também apresentam curvas sob comportamentos semelhantes, demonstrando que correlação direta entre as variáveis na conversão de energia eólica permanece na geração de eletricidade do sistema híbrido. Esta mesma figura demonstra que a reta decrescente do ângulo de curvatura apresenta maior inclinação que as retas das Figura 4.13 (b) e Figura 4.14 (b). Este resultado era esperado, pois em ambas as conversões de energia (solar e eólica), esta variável apresenta comportamento descrito por retas decrescentes a medida que seu valor se aproxima do seu limite superior. Por conseguinte, a reta da geração anual de eletricidade do sistema híbrido apresenta inclinação composta por ambas as retas de conversão de energia.

Conclusivamente, a análise de sensibilidade demonstrou o comportamento das variáveis geométricas aplicadas ao estudo de otimização nas conversões de energia solar e eólica e, sobretudo,na geração anual de eletricidade do sistema híbrido.Os resultados obtidos na análise de sensibilidade validaram a especificação das variáveis de projeto aplicadas ao estudo proposto de otimização.

4.3.2.SUPERFÍCIES DE RESPOSTA

A geração da superfície de resposta realizada através do modulo *Ansys RSM* oportuniza a representação gráfica em curvas (2D) ou em superfícies (3D) dos dados de entrada (variáveis de projeto aplicadas ao estudo de otimização) e saída (resultados contidos na Tabela "*output parameters*").

As análises dos resultados da RSM obtida foram desenvolvidas sob gráficos de superfície, sendo estes fundamentados em duas variáveis de projeto e um dado de saída. Nas seções 4.3.2.1 à 4.3.2.3 são apresentadas e analisadas as superfícies de resposta.

4.3.2.1.GERAÇÃO ORIUNDA DA CONVERSÃO DE ENERGIA EÓLICA

A análise de sensibilidade desenvolvida na seção 4.3.1.1 demonstra que o ângulo de curvatura não apresenta influência significativa na conversão de energia eólica do concentrador híbrido. Entretanto, as variáveis razão de cubo e fator de indução axial são efetivamente significativas, sendo aplicadas na geração da RSM.

A Figura 4.16 apresenta a superfície de respostas da geração anual de eletricidade oriunda da conversão de energia eólica em função da razão de cubo e fator de indução axial.



Figura 4.16 - Superfície de resposta da (G_{AEE}) em função de (R_C) e (F_{IA}) .

A superfície de resposta mostrada na Figura 4.16 é de vital importância a otimização proposta, pois descreve o comportamento destas variáveis associadamente. A análise da presente RSM demonstra que a maximização da geração de eletricidade pela conversão de energia eólica do concentrador híbrido é obtida na região compreendida pelos limites superiores destas variáveis (apresentando consonância com os resultados da análise de sensibilidade). Conclusivamente,o ponto ótimo da geração de eletricidade pela conversão de energia eólica localiza-se nesta região próxima aos limites superiores de ambas as variáveis.

4.3.2.2.GERAÇÃO ORIUNDA DA CONVERSÃO DE ENERGIA SOLAR

A análise de sensibilidade desenvolvida na seção 4.3.2.2 associada com uma breve análise da definição de fator de indução axial demonstra que esta variável não apresenta influência na conversão de energia solar do concentrador híbrido.

A Figura 4.17 apresenta a superfície de respostas da geração anual de eletricidade oriunda da conversão de energia solar em função do ângulo de curvatura e razão de cubo.



Figura 4.17 - Superfície de resposta da (G_{AES}) em função de (φ_C) e (R_C).

A superfície de resposta apresentada na Figura 4.17 demostra o comportamento associado das variáveis que efetivamente influenciam na conversão de energia solar. A RSM demonstra

que a maximização da geração de eletricidade pela conversão de energia solar do concentrador híbrido é obtida na região compreendida pelos limites inferiores destas variáveis (indicando concordância com os resultados da análise de sensibilidade).Conclusivamente,o ponto ótimo da geração de eletricidade pela conversão de energia solar localiza-se nesta região próxima aos limites inferiores de ambas as variáveis.

4.3.2.3. GERAÇÃO DE ELETRICIDADE DO SISTEMA HÍBRIDO PROPOSTO

A Figura 4.18 apresenta a superfície de respostas da geração anual de eletricidade do sistema híbrido proposto em função do fator de indução axial e razão de cubo.



Figura 4.18 - Superfície de resposta da (G_{AESH}) em função de (F_{IA}) e (R_C).

A análise de sensibilidade desenvolvida na seção 4.3.1 demonstra que a variável ângulo de curvatura apresenta comportamento linear, sendo que a maximização da geração de eletricidade é obtida em seu limite inferior. Entretanto o comportamento associado da razão de cubo e fator de indução axial é demostrado pela superfície de resposta da Figura 4.18. Esta RSM em formato de cela demonstra que a região de maximização da geração de eletricidade do sistema híbrido é obtida na região próxima aos limites superiores do fator de indução axial e da razão de cubo.

4.4.OTIMIZAÇÃO GEOMÉTRICA MULTIOBJETIVO

A otimização geométrica multiobjetivo proposta teve seu início estabelecido no ponto de projeto inicial do concentrador híbrido. No presente estudo foi desenvolvido a revisão do projeto inicial do concentrador híbrido, definindo um projeto aerodinamicamente melhor e, sobretudo, completo e realístico. A geração anual de eletricidade do sistema híbrido proposto no ponto de projeto inicial revisado do concentrador híbrido é descrita na Tabela 4.5:

Tabela 4.5 - Geração anual de eletricidade do sistema híbrido no ponto de projeto revisado

Geração anual de eletricidade	Projeto inicial revisado [MWh/ano]
Conversão de energia eólica (GAEE)	1,90
Conversão de energia solar (G _{AES})	2,05
Conversão de energia solar e eólica (GAES	E) 3,95

A Tabela 4.6 apresenta os pontos ótimos e os resultados obtidos na otimização da geração de eletricidade anual do sistema híbrido.

Estudo de otimização Objetivo							
Geração anual de eletricidade (solar + eólica) - (<i>GAESE</i>) Maximizar							
Método de otimização Status							
MOGA				Convergido	o após 4.390 o	evoluções	
Pontos candidatos						·	
	Ponto ca	ndidato 3	Ponto ca	ndidato 4	Ponto candidato 6		
	RSM	Verificado	RSM	Verificado	RSM	Verificado	
(R_C)	0,486		0,484		0,4	83	
(F_{IA})	0,3	328	0,3	328	0,3	28	
(φ_C) [rad]	0,3	376	0,3	376	0,3	576	
(GAEE) [MWh/ano]	₹ 2,3 ₹ 2,32		* 2,3	*** 2,31	* 2,3	*** 2,31	
(GAEEH) [MWh/ano]	4 ,0,098	4 0,099	4 ,0,098	4 0,099	🚓 0,098	*** 0,099	
(GAES) [MWh/ano]	2,51	2,51	** 2,51	4 2,51	2,51	* 2,51	
(GAESE) [MWh/ano]	4,9	4,92	4,9	4,91	4,9	4,91	

Tabela 4.6 - Otimização da geração de eletricidade do sistema híbrido

Conforme especificado na seção 3.2.8 ao algoritmo genético MOGA, dez pontos candidatos pertencentes à frente de Pareto deveriam ser apresentados nesta otimização. Estes candidatos foram apresentados, entretanto, ocorreram variações de 0,01 MWh/ano nos resultados de geração anual de eletricidade do sistema híbrido oriundos da RSM e do CFD (verificação). Estas variações nos resultados eram esperadas, pois correspondem a tolerância entre RSM e o CFD especificada e aprovada na Tabela 4.3. Portanto, foi realizada uma verificação dentre estes pontos candidatos quais seriam os três pontos com a maior geração anual de eletricidade do sistema híbrido verificada uma verificação dentre estes pontos candidatos quais seriam os três pontos com a maior geração anual de eletricidade do sistema híbrido verificada no CFD.O número de evoluções realizadas até a convergência está coerente de acordo com o Ansys, (2021), tendo em vista o número de pontos candidatos especificados. Os detalhes construtivos do concentrador híbrido otimizado, assim como os parâmetros do dimensionamento térmico e geométrico do subsistema de conversão de energia solar, são detalhados no Apêndice F.

Os resultados apresentados na Tabela 4.6 são avaliados segundo caracteres que classificam em "*ok*" (estrelas douradas) ou "*não ok*" (cruzes vermelhas), numa escala de um a três. A classificação intermediária entre "*ok*" e "*não ok*" é representada pela barra azul. Todos os três pontos candidatos contidos na Tabela 4.6 apresentaram a classificação de três estrelas, portanto aprovados pelo critério do *Ansys DesignXplorer*.

Os resultados do fator de indução axial e razão de cubo apresentados na Tabela 4.6 para os três pontos candidatos demonstram que o ponto ótimo de projeto do concentrador híbrido está contido na região prevista da RSM da Figura 4.18, conforme análise realizada na seção 4.3.2.3. Do mesmo modo, o resultado do ângulo de curvatura apresentado nesta Tabela está de acordo com o diagrama de sensibilidade da Figura 4.15 e análise realizada na seção 4.3.1.3.

O torque do concentrador híbrido otimizado inerente ao ponto candidato 3 consiste efetivamente no mesmo valor numérico do torque do concentrador híbrido em seu projeto inicial (variação de 2%). Esta igualdade tem sua origem fundamentada na revisão de projeto, sendo justificada detalhadamente na seção 4.1. Logo, as curvas características do concentrador otimizado consistem efetivamente nas mesmas curvas levantadas no projeto inicial, descritas na Figura 2.13.

A efetividade da otimização proposta será fundamentada na análise comparativa entre as gerações anuais de eletricidade do projeto otimizado e do projeto inicial revisado, sendo esta demostrada na Tabela 4.7.

Geração	Proje	to	Ganhos obtidos na otimização: $\Delta(G_{AE})$ ent projetos (otimizado e inicial revisado)			
eletricidade	Inicial revisado [MWh/ano]	Otimizado [MWh/ano]	[MWh/ano]	[%]		
(G_{AEE})	1,90	2,32	0,42	22		
(G _{AES})	2,05	2,51	0,46	22,4		
(G _{AESE})	3,95	4,92	0,97	24,5		

Tabela 4.7 - Análise comparativa de (G_{AESH}) entre o projeto revisado e o otimizado

Os resultados da análise comparativa realizada na Tabela 4.7 demonstram que a otimização foi efetiva na maximização da geração de eletricidade proveniente de ambas as conversões de energia (solar e eólica). Por conseguinte, a otimização determinou ganhos de efetivos na geração de eletricidade do sistema híbrido proposto.

4.5.ANALISE ECONÔMICA

Na análise econômica do concentrador híbrido otimizado, assim como realizado na seção 4.4 para a análise de efetividade da otimização, foi determinado o LCOE do sistema híbrido composto por concentrador em seu projeto inicial revisado, sendo este mostrado na Tabela 4.8.

Projeto inicial revisado [U\$/kWh] LCOE 0,79

Tabela 4.8 - LCOE do sistema composto por concentrador no projeto inicial revisado

Subsequentemente a obtenção do LCOE do sistema híbrido inicial revisado, foram determinados LCOE dos sistemas híbrido proposto otimizado, seu híbrido análogo e Dish-Stirling análogo não hibridizado, todos elencados na seção 3.4 e mostrados na Figura 3.23.

A determinação dos LCOE oportunizou a realização da análise comparativa entre o sistema híbrido otimizado e seus análogos, sendo esta estruturada na Tabela 4.9.

Tabela 4.9 - Análise econômica comparativa - Sistema híbrido otimizado e seus análogos

	LCO	E	Δ(LCOE)		
Sistemas	Projetos inicial / análogo [U\$/kWh]	Projeto otimizado [U\$/kWh]	Entre pr otimizado e an [U\$/kWh]	rojetos iálogo/inicial [%]	
Híbrido proposto revisado	0,79	0,66	-0,13	-16,5	
Dish-Stirling não hibridizado	1,25	0,66	-0,59	-47,3	
Dish-Stirling e turbina eólica	0,80	0,66	-0,14	-17,5	

Os resultados apresentados na Tabela 4.9 demonstram a efetividade da otimização do concentrador híbrido. A análise comparativa estabelecida entre o sistema híbrido otimizado e seu projeto inicial revisado demonstram que houve um decréscimo de 16,5 % no LCOE, por conseguinte, uma diminuição de custo da eletricidade gerada por este sistema após a otimização. Deste modo, o sistema otimizado apresenta uma geração mais eficiente sob menor custo. Comparativamente, os dados apresentados na Tabela 4.9 demonstram que o LCOE do sistema híbrido otimizado também é menor que seus análogos. A análise da variação de LCOE entre o sistema proposto otimizado e seus análogos demonstra que a aplicação do sistema otimizado em relação aos seus análogos é vantajosa, apresentando economias relevantes que atingem aproximadamente 48 %. Esta análise denota que o sistema híbrido proposto apresenta menor o custo líquido de geração de eletricidade que os demais sistemas análogos. Entretanto, nesta análise estabelecida pelos resultados da Tabela 4.9, não foi considerado o investimento necessário para implementação da hibridização proposta num sistema Dish-Stirling. A determinação assertiva deste investimento ocorreria num evento de prototipagem, onde um projeto mecânico detalhado seria desenvolvido. Portanto, foi desenvolvido uma análise de sensibilidade fundamentada na disponibilidade de investimentos para a implementação da hibridização proposta, demonstrando o limite de investimentos que o sistema proposto continue economicamente viável. Esta análise é demonstrada na Figura 4.19, onde tem-se diagramas constituídos por barras de LCOE fixo inerente ao sistemas análogos e barras apresentando variações em função dos investimentos, que refere-se ao LCOE do sistema híbrido otimizado.





Análise de Sensibilidade Sistema híbrido proposto otimizado e Sistema híbrido análogo

Figura 4.19 - Análise de sensibilidade - Sistema híbrido proposto e sistemas análogos

A Figura 4.19 (a) demonstra que o sistema híbrido proposto otimizado é financeiramente viável em comparação ao Dish-Stirling não hibridizado sob limite máximo de investimento de 14.600 U\$/kW. Entretanto, a Figura 4.19 (b) demonstra que o sistema híbrido proposto otimizado é financeiramente viável em comparação ao sistema híbrido análogo sob limite máximo de investimento de 3.500 U\$/kW.

Em suma, a análise econômica desenvolvida nesta seção demonstra que o sistema híbrido proposto apresenta menor o custo líquido de geração de eletricidade que os demais sistemas análogos. Esta análise demonstrou que é possível aplicar investimentos para implementação da hibridização sem que o custo líquido de geração de eletricidade do sistema hibrido proposto exceda os LCOE dos demais sistemas análogos. Contudo, não há garantias que os investimentos sejam suficientes para cobrir os custos da hibridização proposta. Portanto, para avaliar se o investimento é suficiente para a realização das modificações necessárias a hibridização tornase necessário o detalhamento do conjunto mecânico do sistema proposto.

5.CONCLUSÕES

A otimização geométrica multiobjetivo do concentrador híbrido obteve êxito em atender seu fundamental objetivo de definição de geometria que promovesse a maximização da geração de eletricidade do sistema híbrido proposto. Os resultados obtidos neste estudo demonstram que a geometria otimizada determinou aumento na geração anual de eletricidade do sistema híbrido proposto em aproximadamente 25%. Este incremento, numa análise quantitativa, demonstra ser efetivamente significativo, pois representa o ganho real de geração anual de eletricidade de aproximadamente 1 MWh. Esta geração adicional obtida pela otimização, segundo o anuário estatístico de energia elétrica de 2023 emitido pelo governo federal (EPE, 2023), é equivalente ao consumo per capito anual de alguns estados da região nordeste onde foi proposto a instalação deste sistema. Portanto, demonstrando a relevância da geração adicional obtida na otimização.

A maximização da geração anual de eletricidade acarretou na redução percentual do LCOE em cerca de 16,5%. O sistema híbrido proposto não otimizado já apresentava menor custo líquido de geração de eletricidade que seus sistemas análogos, chegando a ser 36,8% menor que o custo do sistema Dish-Stirling não hibridizado. A redução de LCOE obtida pela otimização proposta ampliou a diferença entre os custos líquidos de geração de eletricidade dos sistemas analisados. Logo, o sistema híbrido proposto otimizado obteve custos líquidos de geração de eletricidade 17,5% e 47,3% menores que seus sistemas análogos (híbrido e não hibridizado, respectivamente). Os resultados desta análise demonstraram que a otimização consolidou efetivamente a seguinte conclusão: o sistema híbrido proposto, sob as condições de contorno consideradas neste estudo, apresenta maior viabilidade de aplicação que os seus sistemas análogos.

5.1.CONTRIBUIÇÕES

A metodologia proposta ao estudo de otimização geométrica multiobjetivo do concentrador híbrido foi efetiva, uma vez que seus resultados parciais e finais foram integralmente validados. Logo, este estudo propôs uma metodologia válida para aplicações semelhantes e que pode ser reaplicada em estudos envolvendo turbinas eólicas de eixo horizontal e sistemas Dish-Stirling.

A otimização desenvolvida neste estudo consiste numa abordagem única da ferramenta computacional *Ansys Workbench*, utilizando sua tabela de parâmetros para realizar a complexa parametrização geométrica 3D do concentrador híbrido e a completa modelagem térmica do sistema de conversão de energia solar. Portanto, visto que o *Ansys Workbench* é frequentemente utilizado em análises paramétricas de geometrias simples, a metodologia proposta se apresenta

como uma relevante contribuição, pois consiste numa abordagem aplicável a estudos de otimização envolvendo geometrias complexas e modelagens térmicas.

A principal contribuição deste estudo consiste na metodologia desenvolvida ao projeto otimizado da conversão de energia eólica do concentrador híbrido, a qual pode ser igualmente aplicada a projetos otimizados de rotores eólicos de eixo horizontal. Este método é fundamentado na aplicação fidedigna do *Ansys Workbench* estabelecida no presente estudo de otimização (utilizando a tabela de parâmetros do *Ansys Workbench* e os softwares especificados, sendo estes dispostos conforme fluxo definido). Contudo, a principal notoriedade desta metodologia consiste na nova abordagem que é estabelecida da teoria do momento de elemento de pá. O BEM é constituído por um conjunto de equações que demandam a aplicação de métodos iterativos ao projeto de pás eólicas. Nesta abordagem, o equacionamento desta metodologia, após operações algébricas descritas na seção 3.2.1.2.3, é totalmente expressas em função do fator de indução axial. Na metodologia proposta, esta variável é especificada através de método de otimização, por meio da aplicação da ferramenta computacional conforme estabelecido neste estudo. Conclusivamente, obtém-se o fator de indução axial otimizado e, consequentemente, o rotor otimizado que se constitui numa nova abordagem mais precisa que o tradicional projeto fundamentado em método iterativo proposto pelo BEM.

5.2. RECOMENDAÇÕES AOS ESTUDOS FUTUROS

O concentrador híbrido do tipo disco parabólico foi sistematicamente projetado, analisado e otimizado em dissertação de mestrado (Silva 2019), publicação em artigo (Silva et al. 2022) e na presente tese. Portanto, sua fase de projeto está concluída. Fundamentado na metodologia de gestão de desenvolvimento de produtos (GDP), recomenda-se aos estudos futuros o sequenciamento do desenvolvimento do concentrador híbrido pela execução da fase subsequente de prototipagem. Esta fase, estabelecida sobretudo na execução de ensaios práticos, demanda grande volume de trabalho técnico-cientifico na construção do protótipo (especificação de materiais, processo de fabricação e montagem adequados a prototipagem, observado a representatividade do protótipo com o concentrador híbrido), bancada de ensaios e instrumentação (projeto da bancada de ensaio que reproduzam fidedignamente os recursos solar e eólico e especificação / aplicação correta de instrumentos para que as propriedades físicas sejam mensuradas). Considerando as dimensões especificação de seu protótipo, este estudo recomenda que primeiramente seja desenvolvido e produzido um modelo reduzido. O modelo reduzido estabeleceria uma análise experimental preliminar, permitindo o estudo da

concentração solar e conversão de energia eólica no concentrador híbrido. Nesta análise com o modelo reduzido não seria aplicado o conjunto receptor, devido sobretudo a inviabilidade técnica-econômica da construção do motor Stirling em escala reduzida.

A metodologia desenvolvida neste estudo, consistem em importantes propostas de melhorias da teoria do BEM que promovem aumento em sua precisão. Estas metodologias, exceto a desenvolvida no presente estudo, foram publicadas em periódicos a fim de fomentar a ampliação da aplicação do BEM por meio de novas abordagens que apresentam maior precisão que a metodologia clássica. Por conseguinte, recomenda-se que a metodologia proposta no presente estudo seja apresentada em periódicos mediante aplicação em projeto de rotores eólicos tradicionais.

APÊNDICE A

EQUACIONAMENTO FUNDAMENTAL DO CFD

As equações intrínsecas à dinâmica dos fluidos computacional são aplicadas conforme os três princípios de conservação física (Versteeg e Malalasekera, 2007). O primeiro princípio consiste na conservação da massa, ou seja, a massa do fluído é conservada (Versteeg e Malalasekera, 2007). O segundo princípio é fundamentado na segunda lei de Newton, estabelecendo que a variação de momento num elemento infinitesimal seja igual à soma das forças neste mesmo elemento (Versteeg e Malalasekera, 2007). O terceiro princípio consiste na primeira lei da termodinâmica, estabelecendo que a variação de energia é igual à soma das variações de calor e trabalho em um elemento infinitesimal (Versteeg e Malalasekera, 2007).

A dinâmica dos fluidos computacional considera o fluído analisado como um meio continuo (Versteeg e Malalasekera, 2007). Portanto, o objeto da análise CFD consiste nos elementos infinitesimais compõem o fluido, cujas propriedades macroscópicas não são influenciadas por suas moléculas (Versteeg e Malalasekera, 2007). A dinâmica dos fluidos computacional é desenvolvida em escala macroscópica, desconsiderando a estrutura molecular da matéria e seus movimentos moleculares (Versteeg e Malalasekera, 2007). Conclusivamente, o CFD analisa efetivamente o comportamento do fluido em termos de suas propriedades macroscópicas, como velocidade, pressão, densidade e temperatura, e suas respectivas derivadas em relação ao espaço e tempo (Versteeg e Malalasekera, 2007).

O primeiro princípio (conservação da massa), aplicado ao elemento infinitesimal, sob regime não permanente e relativo a fluidos compressíveis é expresso pela Equação (A.1) (Versteeg e Malalasekera, 2007).

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u) = 0 \tag{A.1}$$

A Equação (A.1) também é denominada Equação da continuidade. O primeiro termo da Equação (A.1) descreve à taxa de variação da densidade em relação ao tempo (Versteeg e Malalasekera, 2007). O segundo termo da Equação (A.1) é denominado termo convectivo, o qual descreve o fluxo líquido de massa que atravessa o elemento infinitesimal (Versteeg e Malalasekera, 2007).

O estudo relativo à taxa de variação de uma determinada propriedade física (ϕ) intrínseca ao elemento infinitesimal pode ser desenvolvido a partir da abordagem Euleriana ou Lagrangeana (Versteeg e Malalasekera, 2007).

A abordagem Lagrangeana estabelece que a propriedade física do elemento infinitesimal seja função de sua posição (u, y, z) e do tempo (t) (Versteeg e Malalasekera, 2007). Logo, nesta abordagem o elemento infinitesimal apresenta movimento concomitantemente ao escoamento, sendo denominado de partícula fluída (Versteeg e Malalasekera, 2007).

A análise relativa à taxa de variação de uma determinada propriedade física por unidade de volume, intrínseca ao elemento infinitesimal sob a abordagem Lagrangeana, é expressa através da Equação (A.2) (Versteeg e Malalasekera, 2007).

$$\rho \frac{D\phi}{Dt} = \rho \left(\frac{\partial\phi}{\partial t} + \nabla\phi \right) \tag{A.2}$$

A abordagem Euleriana determina que o elemento infinitesimal permaneça fixo no espaço, sendo denominado elemento fluído (Versteeg e Malalasekera, 2007). Esta abordagem estabelece uma posição invariável no tempo ao conjunto de elementos infinitesimais constituintes da região simulada (Versteeg e Malalasekera, 2007).

A análise relativa à taxa de variação de uma determinada propriedade física por unidade de volume, intrínseca ao elemento infinitesimal sob a abordagem Euleriana e mediante aplicação da Equação da continuidade, é expressa pela Equação (A.3) (Versteeg e Malalasekera, 2007).

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho\phi u) = 0 \tag{A.3}$$

A relação entre a taxa de variação de uma propriedade física relativa à partícula fluída (abordagem Lagrangeana) e a taxa de variação desta mesma propriedade física relativa ao elemento fluído (abordagem Euleriana) é estabelecida através da Equação (A.4) (Versteeg e Malalasekera, 2007).

$$\rho \frac{D\phi}{Dt} = \frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho\phi) \tag{A.4}$$

A primeira parcela da Equação (A.4) é constituída pela derivada substantiva ou total da propriedade física por unidade de volume em relação ao tempo, determinando a taxa de variação desta propriedade física na partícula de fluida (Versteeg e Malalasekera, 2007). A segunda parcela da Equação (A.4) representa a taxa de variação da propriedade física por unidade de volume no elemento de fluido em relação ao tempo (Versteeg e Malalasekera, 2007). A terceira parcela da Equação (A.4) representa a taxa líquida relativa ao fluxo da propriedade física fora do elemento fluido por unidade de volume (Versteeg e Malalasekera, 2007).

A aplicação da conservação do momento relativo aos três eixos na Equação (A.4) é expressa respectivamente através das equações (A.5), (A.6) e (A.7)(Versteeg e Malalasekera, 2007).

$$\rho \frac{Du}{Dt} = \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u) \tag{A.5}$$

$$\rho \frac{Dy}{Dt} = \frac{\partial(\rho y)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho y) \tag{A.6}$$

$$\rho \frac{Dz}{Dt} = \frac{\partial(\rho z)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho z) \tag{A.7}$$

A aplicação da conservação da energia na Equação (A.4) é expressa através da Equação (A.8) (Versteeg e Malalasekera, 2007).

$$\rho \frac{DE}{Dt} = \frac{\partial(\rho E)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho E)$$
(A.8)

O segundo princípio, fundamentado na segunda lei de Newton, postula que a variação do momento em uma partícula fluída é igual à soma das forças aplicadas nesta mesma partícula (Versteeg e Malalasekera, 2007). As partículas fluídas estão sujeitas basicamente a forças de superfície e forças de campo (Versteeg e Malalasekera, 2007). As forças de superfície são compreendidas pelas forças de pressão e viscosas (Versteeg e Malalasekera, 2007). As forças de campo compreendem as forças centrífugas e de Coriolis (Versteeg e Malalasekera, 2007).

O estado de tensão intrínseco ao elemento infinitesimal é definido em termos da pressão (p)e dos nove componentes de tensão viscosa (τ_{ij}) , conforme mostrados na Figura A.1 (Versteeg e Malalasekera,2007). A notação relativa aos índices é aplicada na indicação das direções dos componentes de tensões viscosas, sendo que o componente da tensão viscosa indica a direção de atuação (j) em uma superfície normal à direção (i) (Versteeg e Malalasekera, 2007).



Figura A.1 - Estado de tensão intrínseco ao elemento infinitesimal Fonte: Versteeg e Malalasekera (2007)

As componentes (u, y, z) relativas à Equação do momento são expressas respectivamente através das equações (A.9), (A.10) e (A.11) (Versteeg e Malalasekera, 2007).

$$\rho \frac{Du}{Dt} = \frac{\partial (-p + \tau_{XX})}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{YX}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{ZX}}{\partial z} + S_{MX}$$
(A.9)

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = \frac{\partial \tau_{XY}}{\partial x} + \frac{\partial (-p + \tau_{YY})}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{ZY}}{\partial z} + S_{MY}$$
(A.10)

$$\rho \frac{D\nu}{Dt} = \frac{\partial \tau_{XY}}{\partial x} + \frac{\partial (-p + \tau_{YY})}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{ZY}}{\partial z} + S_{MZ}$$
(A.11)

A primeira parcela das equações (A.9), (A.10) e (A.11), assim como as primeiras parcelas das equações (A.5), (A.6) e (A.7), são constituídas respectivamente pela taxas de variação de momento relativo aos eixos (u, y, z) por unidade de volume (Versteeg e Malalasekera, 2007). A segunda, terceira e quarta parcela das equações (A.9), (A.10) e (A.11) denotam respectivamente a força total nas direções (u, y, z) exercidas no elemento infinitesimal devido as tensões superficiais (Versteeg e Malalasekera, 2007). A quinta parcela das equações (A.9), (A.10) e (A.11) representa respectivamente o termo fonte de momento relativo aos eixos (x,y,z) por unidade de volume e tempo (Versteeg e Malalasekera, 2007).

O terceiro princípio, fundamentado na primeira lei da termodinâmica, estabelece que a variação de energia em um elemento infinitesimal é igual à soma das variações de calor e trabalho no mesmo (Versteeg e Malalasekera, 2007). A Equação da energia é efetivamente fundamentada neste princípio (Versteeg e Malalasekera, 2007). A Equação de energia é expressa através da Equação (A.12) (Versteeg e Malalasekera, 2007).

$$\rho \frac{DE}{Dt} = -\nabla \cdot (pu) + \left[\frac{\partial (u\tau_{XX})}{\partial x} + \frac{\partial (u\tau_{YX})}{\partial y} + \frac{\partial (u\tau_{ZX})}{\partial z} + \frac{\partial (v\tau_{XY})}{\partial x} + \frac{\partial (v\tau_{YY})}{\partial y} + \frac{\partial (v\tau_{ZY})}{\partial z} \right]$$
$$\left[\frac{\partial (w\tau_{XZ})}{\partial x} + \frac{\partial (w\tau_{YZ})}{\partial y} + \frac{\partial (w\tau_{ZZ})}{\partial z} \right] + \nabla \cdot (k\nabla T) + S_E$$
(A.12)

A primeira parcela da Equação (A.12) expressa à taxa de variação de energia relativa à partícula fluida por unidade de volume (Versteeg e Malalasekera, 2007). A segunda e a terceira parcela da Equação (A.12) expressam a taxa total de trabalho realizado pelas tensões superficiais numa partícula fluida (Versteeg e Malalasekera, 2007). A quarta parcela da Equação (A.12) expressa à taxa de variação de calor relativo à partícula fluida devido à

condução de calor através dos limites do elemento infinitesimal (Versteeg e Malalasekera, 2007). A quinta parcela da Equação (A.12) expressa às variações potenciais de energia oriundas do termo fonte por unidade de volume e tempo (Versteeg e Malalasekera, 2007).

A Equação da energia (A.12) é aplicada na definição da Equação da energia interna (*i*), a qual é expressa através da Equação (A.13) (Versteeg e Malalasekera, 2007).

$$\rho \frac{Di}{Dt} = -p\nabla \cdot (u) + \nabla \cdot (k\nabla T) + \tau_{XX} \frac{\partial u}{\partial x} + \tau_{YX} \frac{\partial u}{\partial y} + \tau_{ZX} \frac{\partial u}{\partial z} + \tau_{XY} \frac{\partial v}{\partial x} + \tau_{YY} \frac{\partial v}{\partial y} + \tau_{ZY} \frac{\partial v}{\partial z}$$

$$\tau_{XZ} \frac{\partial w}{\partial x} + \tau_{YZ} \frac{\partial w}{\partial y} + \tau_{ZZ} \frac{\partial w}{\partial z} + S_I$$
(A.13)

Até o momento, a dinâmica dos fluidos tridimensional está sendo caracterizada por um sistema constituído de cinco equações diferenciais parciais; Equação da conservação da massa (A.1), equações do momento ((A.9), (A.10) e (A.11)) e Equação da energia (A.12) (Versteeg e Malalasekera, 2007). Este sistema de equações apresenta, dentre suas incógnitas, quatro variáveis termodinâmicas; densidade, pressão, energia interna e temperatura (Versteeg e Malalasekera, 2007). As relações entre estas variáveis podem ser estabelecidas através do postulado do equilíbrio termodinâmico (Versteeg e Malalasekera, 2007).

A fluidodinâmica computacional aplica invariavelmente o equilíbrio termodinâmico do fluido, sendo válido na pluralidade dos estudos intrínsecos a análise CFD (Versteeg e Malalasekera, 2007). O equilíbrio termodinâmico do fluido permite determinar seu estado considerando apenas duas variáveis termodinâmicas através das equações de estado (Versteeg e Malalasekera, 2007). Estas equações relacionam basicamente duas variáveis conhecidas e distintas de estado na determinação de uma terceira variável de estado (Versteeg e Malalasekera, 2007). Portanto, a partir dos dados relativos às variáveis de estado densidade (ρ) e temperatura (T), determina-se a pressão (p) e a energia interna (i) conforme demonstrado nas equações (A.14) e (A.15) (Versteeg e Malalasekera, 2007).

$$p = p(\rho, T) \tag{A.8}$$

$$i = i(\rho, T) \tag{A.15}$$

A análise fluidodinâmica aplicada aos gases perfeitos determina a observância das equações de estado (A.16) e (A.17) (Versteeg e Malalasekera, 2007).

$$p = \rho R_{GP} T \tag{A.16}$$

$$i = C_{\nu}T \tag{A.17}$$

Em escoamentos compressíveis, as equações de estado estabelecem a relação entre a Equação da energia (A.12) e as equações da conservação de massa (A.1) e momento (A.9), (A.10) e (A.11) (Versteeg e Malalasekera, 2007). Esta relação é estabelecida através das variações de densidade oriundas das variações de pressão e temperatura no campo de escoamento (Versteeg e Malalasekera, 2007).

O postulado do equilíbrio termodinâmico adicionou as cinco equações diferenciais parciais (conservação da massa (A.1), equações de momento (A.9), (A.10) e (A.11) e Equação da energia (A.12) duas equações algébricas, totalizando um sistema de sete equações (Versteeg e Malalasekera, 2007).

As equações diferenciais parciais (A.9), (A.10) e (A.11) apresentam entre suas incógnitas as componentes de tensão viscosa (Versteeg e Malalasekera, 2007). As equações intrínsecas a análise fluidodinâmica são obtidas através da aplicação de um modelo adequado as tensões viscosas contidas nas equações (A.9), (A.10) e (A.11) e (A.13)(Versteeg e Malalasekera, 2007). Neste modelo, as tensões viscosas são expressas através de taxas de deformação (s_{ij}), composta pela taxa de deformação linear e taxa de deformação volumétrica (Versteeg e Malalasekera, 2007). Neste modelo, o fluido aplicado é newtoniano, logo as tensões viscosas são proporcionais às taxas de deformação (Versteeg e Malalasekera, 2007). O modelo tridimensional da lei de viscosidade de Newton aplicado a escoamentos compressíveis determina a constante de proporcionalidade relativa à viscosidade dinâmica (μ), relacionando tensões a deformações lineares (Versteeg e Malalasekera, 2007). O modelo newtoniano determina que as tensões viscosas sejam expressas em termos dos gradientes relativos às componentes de velocidade do campo de escoamento. (Versteeg e Malalasekera, 2007).

A aplicação deste modelo relativo às tensões viscosas nas equações (A.9), (A.10) e (A.11) e (A.13) originaram as equações de Navier-Stokes, nomeadas em homenagem aos dois cientistas do século XIX que as desenvolveram (Versteeg e Malalasekera, 2007).

As equações de Navier-Stokes relativas ao momento e a energia interna são apresentadas em (A.18), (A.19), (A.20) e (A.21), respectivamente (Versteeg e Malalasekera, 2007).

$$\rho \frac{Du}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \nabla \cdot (\mu \rho \nabla u) + S_{MX}$$
(A.18)

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \nabla \cdot (\mu \rho \nabla v) + S_{MY}$$
(A.19)

$$\rho \frac{Dw}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial z} + \nabla \cdot (\mu \rho \nabla w) + S_{MZ}$$
(A.20)

$$\rho \frac{Di}{Dt} = -p\nabla \cdot (u) + \nabla \cdot (k\nabla T) + \Phi + S_I$$
(A.21)

As equações (A.5), (A.6), (A.7) e (A.8) definem respectivamente as taxas de variação de momento relativo aos eixos (x,y,z) por unidade de volume e a taxa de variação de energia interna relativa à partícula fluida por unidade de volume (Versteeg e Malalasekera, 2007). Portanto, as equações (A.5), (A.6), (A.7) e (A.8) definem respectivamente as primeiras parcelas das equações (A.18), (A.19), (A.20) e (A.21). Procedendo a substituição das equações (A.5), (A.6), (A.7) e (A.8) respectivamente nas equações (A.18), (A.19, (A.20) e (A.21). Procedendo a substituição das equações (A.5), (A.6), (A.7) e (A.8) respectivamente nas equações (A.18), (A.19, (A.20) e (A.21), obtém se as equações de Navier-Stokes apresentadas na literatura (Versteeg e Malalasekera, 2007). Estas equações de Navier-Stokes são demonstradas através das equações (A.22), (A.23), (A.24) e (A.25)(Versteeg e Malalasekera, 2007).

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \nabla \cdot (\mu \rho \nabla u) + S_{MX}$$
(A.22)

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \nabla \cdot (\mu \rho \nabla v) + S_{MY}$$
(A.23)

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho w) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \nabla \cdot (\mu \rho \nabla w) + S_{MZ}$$
(A.24)

$$\frac{\partial(\rho i)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho i) = -p\nabla \cdot (u) + \nabla \cdot (k\nabla T) + \Phi + S_I$$
(A.25)

As equações de Navier-Stokes (A.22), (A.23), (A.24) e (A.25), as Equação da conservação da massa (A.8) e equações de estado (A.14) e (A.15) ou (A.16) e (A.17) constituem um sistema com sete equações e sete incógnitas. Com um número igual de equações e funções desconhecidas, este sistema é matematicamente fechado, isto é, pode ser resolvido desde que sejam fornecidas condições auxiliares adequadas, nomeadamente condições iniciais e de contorno.

A Equação de transporte aplicada a uma determinada propriedade física é expressa através da Equação (A.26) (Versteeg e Malalasekera, 2007).

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho\phi u) = \nabla \cdot (\Gamma \nabla \phi) + S_{\phi}$$
(A.26)

A primeira parcela da Equação (A.26) expressa à taxa de variação da propriedade física relativa ao elemento fluído (Versteeg e Malalasekera, 2007). A segunda parcela da Equação (A.26) expressa à taxa líquida de variação de (ϕ) fora do elemento fluido (Versteeg e Malalasekera, 2007). A terceira parcela da Equação (A.26) expressa à taxa de variação de (ϕ) devido à difusão, portanto esta apresenta o coeficiente de difusão (Versteeg e Malalasekera, 2007). A quarta parcela da Equação (A.26) expressa à taxa de variação de (ϕ) devido ao termo fonte. (Versteeg e Malalasekera, 2007).

A operação fundamental relativa ao método dos volumes finitos consiste na integração da Equação (A.26) sob o volume de controle, e aplicando o teorema da divergência de Gauss, estabelece a Equação (A.27) (Versteeg e Malalasekera, 2007).

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\int_{VC} \rho \phi dV \right) + \int_{A} n \cdot (\rho \phi u) dA = \int_{A} n \cdot (\Gamma \nabla \phi) dA + \int_{VC} S_{\phi} dV$$
(A.9)

A primeira parcela da Equação (A.27) expressa à taxa de variação da propriedade física no interior do volume de controle (Versteeg e Malalasekera, 2007). A segunda parcela da Equação (A.27) expressa à taxa líquida de variação da propriedade física devido à convecção, a qual promove fluxos que atravessam as fronteiras do volume de controle (Versteeg e Malalasekera, 2007). A terceira parcela da Equação (A.27) expressa à taxa líquida de variação da propriedade física devido à difusão, a qual promove fluxos que atravessam as fronteiras do volume de controle (Versteeg e Malalasekera, 2007). A terceira parcela da Equação (A.27) expressa à taxa líquida de variação da propriedade física devido à difusão, a qual promove fluxos que atravessam as fronteiras do volume de controle (Versteeg e Malalasekera, 2007). A quarta parcela da Equação (A.27) expressa à taxa de variação líquida de (ϕ) no interior do volume de controle (Versteeg e Malalasekera, 2007).

APÊNDICE B

A análise para a seleção da localização geográfica aplicada ao projeto do sistema híbrido eólico solar proposto se restringiu a localidades brasileiras. O Brasil apresenta bons níveis de irradiação normal direta e localizações com altas velocidades do vento. Entretanto sua área é muito extensa, apresentando apreciável variação de latitude ao longo de seu território. Esta característica oportuniza diversidade topográfica, climática e, por conseguinte, dos recursos eólicos e solares (Pereira et al., 2017; CEPEL, 2017). A análise envolvendo diversas localidades brasileiras foi fundamentada em dados dos Atlas Solar e Eólico, disponíveis em Energydata.info (2018), culminando na escolha do município de Aracati, no estado do Ceará. O município de Aracati, conforme evidenciado no mapa da Figura B.1, apresenta alta irradiação normal direta média diária (*DNI_D*), especificada em 5,46 [kWh/m²dia] por Energydata.info (2018).



Figura B.1 - Atlas solar brasileiro - Irradiação normal direta média diária (D_{NID}) Fonte: Adaptado de Energydata.info (2018)

A irradiação normal direta (*DNI*) é definida pela potência solar [kW] disponível numa área unitária [m²] durante um determinado intervalo de tempo, sendo em horas por dia [h/dia] ou horas por ano [h/ano] (Lovegrove e Stein, 2020). Portanto, a irradiação normal direta média diária (*DNI*_D) em [kWh/m²dia] compreende a irradiância solar média diária (*I*_D) em [kW/m²] disponibilizada ao longo do período de irradiação solar médio diário (*T*_{DIR}) em horas por dia (h/dia) (Lovegrove e Stein, 2020). Logo, a irradiação normal direta média diária (*DNI*_D) do município de Aracati estabelece a esta localidade a disponibilidade de irradiância solar média diária (*I*_D).

A irradiação normal direta média diária (D_{NID}) especificada em Energydata.info (2018) apresenta valor numérico estabelecido pela integral da irradiância solar média horária (I_H), calculada sob limites de integração constituídos pelo período de irradiação solar médio diário (T_{DIR}) definido pelo intervalo entre o nascer e pôr do Sol (Energydata.info, 2018). Portanto, a irradiação normal direta média diária (D_{NID}) especificada em Energydata.info (2018) é estabelecida pelo montante da irradiância solar média horária (I_H) acumulado ao longo do período diário de irradiação solar (T_{DIR}). Os sistemas de conversão de energia solar térmicos operam segundo valores mínimos de irradiância solar denominados "*cut-in irradiance*" (Lovegrove e Stein, 2020). Portanto, o período de irradiação solar médio diário (T_{DIR}) compreendido pelo intervalo entre o nascer e pôr do Sol é constituído por valores de irradiância não aplicáveis ao funcionamento destes sistemas de conversão de energia. Conclusivamente, a irradiação normal direta média diária (D_{NID}) de Energydata.info (2018) é composta por valores de irradiância solar média horária (I_H) não aplicáveis ao funcionamento de sistemas de conversão de energia solar térmicos.

O efetivo período aplicado ao projeto de sistemas de conversão de energia solar térmicos consiste no período de insolação médio diário (T_{DIS}), compreendido pelo período no qual a irradiação normal direta (DNI) apresenta valor significativo à conversão de energia (CRESESB, 2000). Por conseguinte, a irradiação normal direta média diária inerente ao período de insolação (DNI_{DIS}) aplicada ao projeto do sistema de conversão de energia solar consiste na integral da irradiância solar média horária (I_H) calculada sob limites de integração definidos pelo período de insolação médio diário (T_{DIS}). O período de insolação médio diário (T_{DIS}) no município de Aracati é de 8 horas por dia, obtido em CRESESB (2000), conforme Figura B.2.

A aplicação do período médio diário de insolação (T_{DIS}) estabeleceu a necessidade de ter-se a distribuição da irradiância solar média horária (I_H) para a definição da irradiação normal direta média diária inerente ao período de insolação (DNI_{DIS}). Portanto, fundamentado nesta demanda, foi estabelecido à aplicação do software System Advisor Model ou SAM (NREL, 2018).



Figura B.2 - Insolação diária média anual Fonte: Adaptado de CRESESB (2000)

O software SAM disponibiliza os dados numéricos da distribuição de irradiância solar média horária (I_H) ao longo do dia para a cidade de Aracati, sendo estes apresentados na Tabela B.1.

Tabela B.1 - Irradiância solar média horária restrita ao período de insolação (IHIS) em Aracati

	Unidade								
Horário	[hora]	8:30	9:30	10:30	11:30	12:30	13:30	14:30	15:30
I _{HIS}	$[W/m^2]$	521,2	556,9	586,3	611,2	600,6	601,1	585,8	513,4

O SAM elabora diagramas de distribuição de irradiância solar média horária (I_H) ao longo do dia para localidades de todo o mundo (NREL, 2018). Portanto, este software foi aplicado para a geração do diagrama de distribuição da irradiância solar média horária (I_H) ao longo do dia para o município de Aracati, o qual é apresentado na Figura B.3.



Figura B.3 - Diagrama de distribuição da irradiância solar média horária (I_H) em Aracati Fonte: Adaptado de SAM (2018)

A irradiação normal direta média diária inerente ao período de insolação (DNI_{DIS}) foi calculada pelo somatório dos valores da irradiância solar média horária restrita ao período de insolação (I_{HIS}) contido na Tabela B.1.

A irradiância solar média diária restrita ao período de insolação (I_{DIS}), em [kW/m²], aplicada na determinação da geração anual de eletricidade pela conversão de energia solar, é estabelecida pela razão entre a irradiação normal direta média diária inerente ao período de insolação (DNI_{DIS}), em [kWh/m²dia] e o período médio diário de insolação (T_{DIS}), em horas [h/dia], conforme Equação B.1 (Lovegrove e Stein, 2020).

$$I_{DIS} = \frac{DNI_{DIS}}{T_{DIS}} \tag{B.1}$$

Os resultados de irradiação normal direta média diária inerente ao período de insolação (*DNI_{DIS}*) e irradiância solar média diária restrita ao período de insolação (*I_{DIS}*), ambos relativos à Aracati, são demonstrados na Tabela B.2.

Irradiação / Irradiância	Unidade	Resultado
DNI _{DIS}	[kWh/m ²]	4,58
Idis	$[kW/m^2]$	0,572

Tabela B.2 - Resultados de irradiação e irradiância em Aracati

O município de Aracati está localizado em uma região de grande potencial eólico (RENAI, 2010), conforme mostrado na Figura B.4. O município de Aracati apresenta três usinas eólicas, respectivamente denominadas Canoa Quebrada, Bons Ventos e Unacel (RENAI, 2010).



Figura B.4 - Atlas eólico brasileiro – Velocidade dos ventos (U_{∞}) Fonte: Adaptado de Energydata.info (2018)

A usina de Canoa Quebrada é constituída por vinte e duas turbinas eólicas, apresentando potência instalada de 57MW e fator de capacidade (F_{CE}) estimado em 0,42 (RENAI, 2010). A usina de Bons Ventos apresenta vinte e duas turbinas eólicas, potência instalada de 50MW e fator de capacidade (F_{CE}) estimado em 0,39 (RENAI, 2010). A usina de Unacel é composta por quinze turbinas eólicas, estabelecendo uma potência instalada de 31MW e um fator de capacidade (F_{CE}) estimado em 0,40 (RENAI, 2010). O valor médio relativo aos fatores de capacidade (F_{CE}) estimados para as três usinas no município de Aracati (0,402) determina o

fator de capacidade eólico (F_{CE}) adotado ao sistema híbrido eólico solar. O fator de capacidade (F_{CE}) médio do estado de Ceará é de 0,35 (RENAI, 2010), portanto o valor médio dos fatores de capacidade (F_{CE}) das três usinas do município de Aracati (0,402) demonstra o potencial eólico proeminente desta cidade.

A velocidade do vento (U_{∞}) de projeto no município de Aracati foi determinada a partir dos dados apresentados em Energydata.info (2018), referindo-se as velocidades médias anuais $(U_{\infty M})$ compreendida em uma área de 100 km². Esta referência apresenta diagramas (Figuras B.5, B.6 e B.7) que demonstram a frequência (%) das velocidades médias anuais $(U_{\infty M})$ na área analisada, para alturas de 50 metros, 100 metros e 200 metros. As velocidades médias anuais $(U_{\infty M})$ consideradas nos três diagramas são relativas à frequência de 50%, ou seja, velocidades médias anuais $(U_{\infty M})$ estabelecidas em 50% da área compreendida pelos 100 km².

O projeto das pás eólicas do concentrador híbrido deve aplicar a velocidade média anual dos ventos $(U_{M\infty})$ à altura de 8 metros do solo, dimensão compreendida pela distância entre o centro concentrador híbrido e o solo. As velocidades médias anuais dos ventos $(U_{M\infty})$ em Aracati foram obtidas a alturas de 50, 100 e 200 metros em relação ao solo. Deste modo, a aplicação da lei da potência estabelece a determinação da velocidade média anual do vento $(U_{M\infty})$ à altura de 8 metros em relação ao solo. Esta lei é aplicada na determinação do perfil vertical de velocidades dos ventos, de modo que, a partir de dados de referência (velocidades dos ventos U_R e a altura H_R), determina-se a velocidades do vento (U_Z) à altura (H_Z) desejada (Manwell et al., 2010). A aplicação da lei de potência foi aplicada para a determinação da velocidade média anual dos ventos $(U_{M\infty})$ no município de Aracati a altura de 8 metros a partir das velocidades médias anuais dos ventos $(U_{M\infty})$ a 50, 100 e 200 metros.



Figura B.5 - Diagrama frequência de velocidades médias dos ventos $(U_{\infty}M)$ à 50 m (H_R) Fonte: Adaptado de Energydata.info (2018)



Figura B.6 - Diagrama frequência de velocidades médias dos ventos $(U_{\infty_{M}})$ à 100 m (H_{R}) Fonte: Adaptado de Energydata.info (2018)



Figura B.7 - Diagrama frequência de velocidades médias dos ventos $(U_{\infty_{M}})$ à 200 m (H_{R}) Fonte: Adaptado de Energydata.info (2018)

A lei da potência é expressa pela igualdade entre a razão da velocidade a altura "z" (U_Z) e velocidade de referência (U_R) e a razão entre a altura "z" (H_Z) e a altura de referência (H_R) elevado ao fator de correlação (α_P) (Manwell et al., 2010). Portanto, a lei da potência é expressa pela Equação A.2 (Manwell et al., 2010).

$$\frac{U_Z}{U_R} = \left(\frac{H_Z}{H_R}\right)^{\alpha_P} \tag{B.2}$$

Os estudos incipientes do fator de correlação da lei de potência demonstraram que em determinadas condições, seu valor numérico é igual a 1/7, indicando uma correspondência entre perfis de vento e fluxo de ar sobre placas planas (Manwell et al., 2010). Entretanto, na prática verifica-se que o fator de correlação da lei de potência é altamente variável em função de
parâmetros como elevação, hora do dia, estação do ano, natureza do terreno, velocidade do vento, temperatura e variáveis de mistura térmica e mecânica (Manwell et al., 2010). Portanto, a determinação do fator de correlação relativo ao município de Aracati foi realizada através da aplicação da lei da potência (Equação B.2) para alturas de 200 e 100 metros e 100 e 50 metros, sendo conhecidas as velocidades médias anuais dos ventos nas alturas analisadas. A aplicação da lei da potência em ambas as condições implica na obtenção de dois resultados de fator de correlação, sendo estes dispostos na Tabela B.3.

Hz/Hr	α _P
50/100	0,0195
100/200	0,0192

Tabela B.3 - Resultados do fator de correlação da lei da potência (α_P)

Os fatores de correlação da lei da potência apresentados na Tabela B.3 apresentam variação de 2% entre si, corroborando a validade destes resultados. Após a obtenção destes fatores de correlação para o município de Aracati, os mesmos foram aplicados na Equação B.2 para a determinação das velocidades médias anuais dos ventos a altura de 8 metros (a especificação de dois fatores de correlação estabelece invariavelmente a determinação de duas velocidades médias anuais dos ventos D.2 foram aplicadas as variáveis de referência (U_Z e H_Z) para a altura de 50 metros.

Os resultados referentes às velocidades dos ventos (U_{∞}) à altura de 8 metros no município de Aracati são apresentados na Tabela B.4.

Hz/Hr	αр	$U_{\infty}[\mathrm{m/s}]$
8/50	0,0195	6,001
8/50	0,0192	6,004

Tabela B.4 - Resultados da velocidade dos ventos $(U\infty)$ à altura de 8 metros

A análise dos resultados apresentados na Tabela B.4 estabelece a velocidade dos ventos (U_{∞}) à altura de 8 metros em relação ao solo em 6,00 m/s, considerando dois algarismos decimais.

Os resultados obtidos no Apêndice A demonstram a notável disponibilidade solar e eólica da localização aplicada ao projeto do concentrador híbrido. Conclusivamente, o município de Aracati consiste numa localidade adequada ao estudo proposto de otimização.

APÊNDICE C

Os coeficientes de arrasto (C_D) e sustentação (C_L) consistem essencialmente em grandezas adimensionais intrínsecas a perfis aerodinâmicos aplicados ao projeto de pás de rotores eólicos (Manwell et al., 2010). Estes coeficientes são efetivamente preponderantes no rendimento da conversão de energia eólica, portanto fundamentais ao projeto de pás eólicas (Burton et al. 2021).

O coeficiente de sustentação (C_L) consiste na grandeza adimensional a qual expressa a capacidade do perfil aerodinâmico de gerar força de sustentação (Manwell et al., 2010). O coeficiente de arrasto (C_D) consiste na grandeza adimensional que expressa a resistência estabelecida pelo perfil aerodinâmico ao escoamento (Manwell et al., 2010).

A relação entre os coeficientes de sustentação e arrasto (C_L/C_D) consiste num parâmetro de projeto de grande relevância, pois é determinante no coeficiente de potência (C_P) de rotores eólicos (Burton et al. 2021). A maximização da relação entre coeficientes de sustentação e arrasto (C_L/C_D) consiste na condição desejável nos projetos de pás eólicas (Burton et al. 2021).

O ângulo de ataque (α) consiste num parâmetro fundamental ao projeto das pás de rotores eólicos, sendo este compreendido pela variação angular estabelecida entre a velocidade da corrente livre (U_{∞}) e a corda do perfil aerodinâmico (c) (Manwell et al., 2010).

O número de Reynolds (Re) consiste no parâmetro preponderante para a determinação dos ângulos de ataque (α), coeficientes de sustentação (C_L) e coeficientes de arrasto (C_D) de perfis aerodinâmicos. O número de Reynolds (Re) consiste na grandeza adimensional estabelecida pela relação entre as forças inerciais e forças viscosas (Burton et al. 2021). A determinação do número de Reynolds (Re) para rotores eólicos de eixo horizontal (portanto, aplicável ao projeto das pás do concentrador híbrido) é determinado pela Equação C.1 (Manwell et al., 2010).

$$Re = \frac{\rho_{AR} U_{\infty} D_C}{\mu_{AR}} \tag{C.1}$$

O número de Reynolds (*Re*), para a velocidade do vento de projeto (U_{∞} =6m/s) e diâmetro do concentrador híbrido (6 metros), consiste em 2,45x10⁶.Os ângulos de ataque (α), os coeficientes de sustentação (C_L) e arrasto (C_D), assim como a relação entre estes (C_L/C_D) para o perfil NACA 4415 e número de Reynolds (*Re*) de projeto, são apresentados na Tabela C.1.

α[°]	C_L	CD	C_L/C_D
0,00	0,40	0,00818	48,90
0,75	0,47	0,00822	57,18
1,00	0,49	0,00818	59,90
1,25	0,51	0,00815	62,61
1,50	0,53	0,00813	65,20
1,75	0,55	0,00805	68,30
2,00	0,57	0,00801	71,20
2,25	0,59	0,00793	74,43
2,50	0,61	0,00787	77,49
2,75	0,63	0,00788	80,00
3,00	0,65	0,00784	82,87
3,25	0,66	0,00774	85,26
3,50	0,69	0,00763	90,42
3,75	0,85	0,00819	103,83
4,00	0,88	0,00838	105,00
4,25	0,91	0,00861	105,63
4,50	0,95	0,00885	107,32
4,75	0,99	0,00908	109,09
5,00	1,00	0,00919	108,80
5,25	1,02	0,00938	108,80
5,50	1,03	0,00949	108,48
5,75	1,05	0,00969	108,40
6,00	1,06	0,00986	107,54
6,25	1,08	0,01010	106,93
6,50	1,10	0,01037	106,03
6,75	1,11	0,01059	104,82
7,00	1,13	0,01086	104,07
7,25	1,15	0,01121	102,63
7,50	1,16	0,01148	101,05
7,75	1,18	0,01186	99,48
8,00	1,19	0,01220	97,56

Tabela C.1 - (α), (C_L), (C_D) e (C_L/C_D) para NACA 4415 - (Re): 2,45x10⁶

Fonte: Adaptado de Airfoil Tools (2018)

A análise dos dados contidos na Tabela C.1 indica que a melhor relação (C_L/C_D) aplicável ao projeto das pás do concentrador híbrido correspondente ao ângulo de ataque de 4,75°. Os valores de ângulos de ataque (α), coeficientes de sustentação (C_L), coeficientes de arrasto (C_D) e relação (C_L/C_D) adotados neste projeto estão descritos na Tabela C.2.

Tabela C.2 - (α), (C_L), (C_D) e (C_L/C_D) aplicados ao projeto das pás eólicas

α	C_L	C _D	C_L/C_D
4,75°	0,99	0,01	109,09

APÊNDICE D

O conceito proposto pelo concentrador híbrido estabelece que este apresente refletores entre suas pás eólicas. O conceito de solidez (σ) aplicado ao concentrador híbrido determina que as áreas das pás constituam concomitantemente com as áreas dos refletores a principal parcela desta grandeza adimensional. Portanto, diferentemente da solidez de turbinas eólicas na qual o número de pás constitui-se no parâmetro prevalecente, a solidez do concentrador híbrido é estabelecida preponderantemente pela área dos refletores.

A aplicação das áreas das pás e refletores na principal parcela da solidez do concentrador híbrido (σ_{SCh}) atribui altos valores a esta grandeza adimensional. Portanto, a solidez do concentrador híbrido apresenta-se fundamentalmente alta, estabelecendo suas principais características operacionais na conversão de energia eólica. A relação estabelecida entre o número de pás (N_{PA}) e a razão de velocidades na ponta da pá (λ) constitui numa característica de grande relevância no projeto das pás do concentrador híbrido.

A alta solidez é atribuída a rotores constituídos por elevados números de pás (N_{PA}) e operando em baixas razões de velocidades na ponta da pá. Conclusivamente, o concentrador híbrido caracterizado conceitualmente pela alta solidez, deve operar em baixas razões de velocidades na ponta da pá.

A Tabela D.1 apresenta a relação recomendada entre número de pás e a razão de velocidades na ponta da pá para rotores eólicos de eixo horizontal (Manwell et al., 2010).

Razão de velocidades na ponta da pá (λ)	Número de pás (<i>N_{PÁ}</i>)
1	8 - 24
2	6 - 12
3	3 - 6
4	3 - 4
Maior que 4	1 - 3
E M 11	1 (2010)

Tabela D.1 - Número de pás (N_{PA}) e a respectiva razão de velocidades na ponta da pá (λ)

Fonte: Manwell et al. (2010)

A análise desenvolvida sob os dados apresentados na Tabela D.1 estabelece a especificação preliminar do número de pás do concentrador híbrido em vinte. Esta especificação de vinte, a qual é divergente do número máximo de pás (vinte e quatro) expresso na Tabela D.1, é fundamentada na dimensão máxima da largura das lacunas (*l*). A aplicação de vinte e quatro pás estabelece largura das lacunas com dimensão inferior aos 0,25 metros, impossibilitando o

engastamento dos refletores no anel interno. A especificação preliminar do número de pás estabelece, através da Tabela D.1, a especificação da razão de velocidades na ponta da pá em um.

O projeto estabelecido pelo número de pás igual a vinte resultou numa especificação de dimensões de pá demasiadamente grande e, por conseguinte desproporcionais as dimensões das lacunas, impossibilitando a aplicação destas pás. Deste modo, o número de pás de projeto (N_{PA} _p) foi estabelecido em quarenta e o número de pás real (N_{PA}) aplicado ao concentrador híbrido consiste em vinte.

O número de pás, a razão de velocidades na ponta da pá e a relação entre os coeficientes de sustentação e arrasto (C_L/C_D) especificadas ao projeto concentrador híbrido consistem nos parâmetros fundamentais na determinação de seu coeficiente de potência máximo teórico (C_{PMT}). O diagrama apresentado na Figura D.1 foi estabelecido sob as premissas do número fixo de pás e um dado perfil aerodinâmico apresentando diferentes relações de coeficientes de sustentação e arrasto. Em suma, este diagrama demonstra o coeficiente de potência (C_P) e razão de velocidades na ponta da pá para curvas características de rotores estabelecidas pelas relações entre os coeficientes de sustentação e arrasto de seu perfil aerodinâmico.



Figura D.1- Diagrama de (C_P) vs (λ) e as curvas estabelecidas em distintos (C_L/C_D) Fonte: Adaptado de Manwell et al. (2010)

A determinação do fator de indução axial (*a*) de rotores eólicos é estabelecida através da teoria do momento do elemento de pá (Manwell et al., 2010; Burton et al., 2021). Esta metodologia estabelece um processo interativo aplicado na determinação do fator de indução axial, constituído de equações fundamentadas nas forças aerodinâmicas resultantes sob os

elementos de pá (Manwell et al., 2010; Burton et al., 2021). No entanto, o concentrador híbrido apresenta refletores entre suas pás, estrutura que é efetivamente determinante nas forças aerodinâmicas resultantes sob os elementos de pá.

Nesta conjectura, a definição do fator de indução axial (*a*) foi estabelecida no ponto de máximo rendimento teórico, denotado pelo coeficiente de potência máximo teórico (C_{PMT}). Este coeficiente é determinado fundamentalmente pelo número de pás (N_{PA}), a razão de velocidades na ponta da pá (λ) e a relação entre os coeficientes de sustentação e arrasto (C_L/C_D).

O coeficiente de potência máximo teórico (C_{PMT}) para o concentrador híbrido é determinado pela aplicação da Equação D.1 (Manwell et al., 2010).

$$C_{PMT} = \left(B\lambda \left(\lambda + \frac{1,32 + \left(\frac{\lambda - 8}{20}\right)^2}{N_{PA}^{\frac{2}{3}}} \right)^{-1} \right) - \frac{0,57\lambda^2}{\frac{C_L}{C_D} \left(\lambda + \frac{1}{2N_{PA}}\right)}$$
(D.1)

O coeficiente de potência (*C_P*), determinado efetivamente pelo do fator de indução axial (*a*) é expresso pela Equação D.2 (Manwell et al., 2010).

$$C_p = 4a(1-a)^2$$
 (D.2)

O coeficiente de potência máximo teórico (C_{PMT}), determinado através da Equação D.1, enquanto igualado ao coeficiente de potência (C_P) na Equação D.2 estabelece o fator de indução axial (a) para a condição de potência máxima teórica (Manwell et al., 2010). Portanto, o fator de indução axial (a) para a condição de potência máxima teórica do concentrador híbrido foi estabelecida através da Equação D.3.

$$C_{PMT} = C_P = 4a(1-a)^2$$
 (D.3)

A solução da Equação D.3 apresenta três raízes. Portanto, configura-se a obrigatoriedade da especificação de critérios para a definição da raiz a qual efetivamente representa o famigerado fator de indução axial. Estes critérios foram fundamentados na teoria do momento do elemento de pá apresentada por Manwell et al. (2010) e Burton et al. (2021).

O coeficiente de potência (C_P) estabelecido pela teoria do momento do elemento de pá corresponde precisamente aos resultados experimentais obtidos em baixos valores de fator de indução axial (Manwell et al., 2010). O BEM torna-se inválido nos fatores de indução axial superiores a 0,5, estabelecendo nesta conjuntura velocidades negativas do ar após o rotor (Manwell et al., 2010). Fundamentado nestes dois enunciados por Manwell et al. (2010), são estabelecidos dois critérios à definição da raiz a qual efetivamente representa o fator de indução axial. Este dois critérios consistem respectivamente na aprovação de raízes da Equação D.3 as quais atribuam valores baixos ao fator de indução axial e concomitante, na aprovação das raízes da Equação D.3 as quais constituam fatores de indução axial menores que 0,5.

O fator de indução axial (a) estabelece a velocidade do ar que atravessa o concentrador (U_c) através da Equação D.4 (Burton et al., 2021).

$$U_C = U_\infty (1 - a) \tag{D.4}$$

A relação de velocidades na ponta da pá (λ) é estabelecida pela razão entre a velocidade tangencial da ponta da pá e a velocidade de corrente livre. Portanto, a razão de velocidades na ponta da pá é definida pela Equação D.5 (Manwell et al., 2010).

$$\lambda = \frac{\Omega R}{U_{\infty}} \tag{D.5}$$

A Equação D.5, reescrita em função de (Ω) conforme demonstrado por Tong (2010), estabelece a Equação D.6 a qual é aplicada na determinação da rotação do concentrador híbrido em radianos por segundo (rad/s).

$$\Omega = \frac{\lambda U_{\infty}}{R} \tag{D.6}$$

A velocidade angular do concentrador híbrido (*n*) em rotações por segundo (rpm) é estabelecida através da Equação D.7 Tong (2010).

$$n = \frac{\Omega \times 60}{2 \pi} \tag{D.7}$$

O concentrador híbrido apresenta a singular característica conceitual que o diferencia dos rotores eólicos tradicionais, compreendida pela presença de refletores solares entre suas pás, enquanto os rotores eólicos apresentam esta região livre. Estes refletores restringem a vazão de ar que atravessa o concentrador híbrido (Q), tornando a vazão de ar considerada pelo BEM diferente da vazão efetiva no concentrador híbrido. Portanto, a razão de velocidades na ponta da pá do concentrador híbrido foi estabelecida em caráter preliminar através da Tabela D.1, pois o valor atribuído a esta grandeza adimensional foi fundamentado na teoria do momento do elemento de pá. Consequentemente, a velocidade angular do concentrador híbrido determinada pelas Equações D.6 e D.7 apresentam caráter preliminar também. A solução apresentada para

a aprovação da razão de velocidades na ponta da pá (λ) preliminar consiste na validação da velocidade angular (*n*) determinada pela Equação D.6 através da aplicação da metodologia de dimensionamento de ventiladores apresentada por Bran e Souza (1969).

A metodologia de dimensionamento de ventiladores é fundamentada na teoria dos vórtices livres; diferentemente da aplicada no projeto do concentrador híbrido, que consiste no BEM. A metodologia apresentada por Bran e Souza (1969) especifica e analisa o ponto de projeto de rotores mediante diagramas estabelecidos sob grandezas adimensionais. A pluralidade destas grandezas adimensionais é fundamentada em múltiplas variáveis, dentre estas tem-se a vazão (Q) e a velocidade angular (n). Portanto, o critério de validação da razão de velocidades na ponta da pá consiste na aprovação do ponto de projeto do concentrador híbrido nos diagramas das Figuras D.2 e D.3, mediante avaliação destes pontos nos intervalos de projetos de rotores otimizados. A validação dos pontos de projeto estabelece a aprovação da velocidade angular através da vazão real que atravessa o concentrador híbrido, pois ambas variáveis são aplicadas na determinação das grandezas adimensionais as quais estabelecem os pontos de projeto.

A vazão (Q) de ar a qual atravessa o concentrador híbrido é determinada pelo produto da velocidade do fluxo de ar (U_c) e a área projetada das lacunas (A_{PL}) , através da Equação D.8 (Bran e Souza, 1969).

$$Q = U_c A_{PL} \tag{D.8}$$

A aplicação da área projetada relativa às lacunas (A_{PL}) na determinação da vazão (Q) que atravessa o concentrador híbrido é validada pela análise estabelecida sob uma particularização do teorema de transporte de Reynolds para a conservação da massa. A área projetada relativa às lacunas (A_{PL}) é definida pelo somatório de suas áreas projetadas, sendo excluído deste montante o somatório das áreas projetadas das pás. Portanto, a área projetada relativa às lacunas (A_{PL}) é determinada pelo produto do número de lacunas do concentrador híbrido (N_{LAC}) , pela altura (h) e largura (l) das lacunas e por um fator de estrangulamento (F_E) , o qual é associado às áreas projetadas das pás. Portanto, a área projetadas (A_{PL}) é determinada pelo protecto, a área projetada relativa às lacunas (A_{PL}) é determinada pelo produto do número de lacunas do concentrador híbrido (N_{LAC}) , pela altura (h) e largura (l) das lacunas e por um fator de estrangulamento (F_E) , o qual é associado às áreas projetadas das pás. Portanto, a área projetada relativa às lacunas (A_{PL}) é determinada pelo protector de projetada relativa às lacunas (A_{PL}) é determinada pelo protector de por um fator de estrangulamento (F_E) , o qual é associado às áreas projetadas das pás. Portanto, a área projetada relativa às lacunas (A_{PL}) é determinada

$$A_{PL} = N_{LAC} h l F_E \tag{D.9}$$

A altura de energia (*H*), inerente ao fluxo ar que atravessa o concentrador híbrido, é estabelecida pela relação entre velocidade do fluxo de ar que atravessa o concentrador (U_c) e a aceleração da gravidade (g), sendo determinada pela Equação D.10 (Bran e Souza, 1969).

$$H = \frac{U_C^2}{2g} \tag{D.10}$$

A energia específica (Y) do escoamento que atravessa o concentrador híbrido é definida pelo produto entre a altura de energia (H) e a aceleração da gravidade (g), sendo determinada através da Equação D.11 (Bran e Souza, 1969).

$$Y = Hg \tag{D.11}$$

A rotação específica (n_{qA}) , intrínseca ao concentrador híbrido, é estabelecida pela relação entre sua rotação (n) em rotações por segundo (rps), vazão (Q) e o trabalho específico (Y), sendo determinada através da Equação D.12 (Bran e Souza, 1969).

$$n_{qA} = n \frac{q^{\frac{1}{2}}}{r^{\frac{3}{4}}} 10^3 \tag{D.12}$$

O coeficiente de diâmetro (δ_D) compreende a grandeza adimensional estabelecida pela relação entre o diâmetro externo do concentrador híbrido (D_e), a vazão (Q) de ar a qual o atravessa e seu trabalho específico (Y), sendo obtido pela Equação D.13 (Bran e Souza, 1969).

$$\delta_D = 1,054 \frac{\gamma^3}{q^{\frac{1}{2}}} D_e \tag{D.13}$$

O coeficiente de ligeireza (σ_L) constitui a grandeza adimensional estabelecida pela relação entre a vazão (Q), a rotação (n) em rotações por segundo (rps) e o trabalho específico (Y) do concentrador híbrido, sendo determinado pela Equação D.14 (Bran e Souza, 1969).

$$\sigma_L = 2,108 \frac{Q^{\frac{1}{2}}}{Y^{\frac{3}{4}}} n \tag{D.14}$$

O coeficiente de pressão (ψ) consiste na grandeza adimensional definida pela relação estabelecida entre o trabalho específico (Y) e a velocidade do ar que atravessa o concentrador (U_c), sendo determinado através da Equação D.15 (Bran e Souza, 1969).

$$\psi = \frac{2Y}{u_c^2} \tag{D.15}$$

O diagrama da Figura D.2, aplicado ao dimensionamento de rotores de ventiladores e bombas, relaciona parâmetros adimensionais a características geométricas, apresentando a faixa recomendada ao ponto de projeto (Bran e Souza, 1969). Os parâmetros adimensionais aplicados ao diagrama da Figura D.2 são o coeficiente de pressão (ψ) e rotação específica (n_{qA}). As características geométricas relacionadas neste diagrama são a razão entre diâmetro interno (D_i) e diâmetro externo do rotor (De) (Bran e Souza, 1969).



Figura D.2 - Diagrama aplicado ao dimensionamento de rotores de bombas e ventiladores Fonte: Bran e Souza (1969)

Na década de 1950, Cordier desenvolveu uma extensa análise empírica fundamentada em dados experimentais objetivando a determinação da curva constituída pelos pontos de projeto recomendados a rotores de máquinas de fluxo (Wright, 1999). Os resultados estabelecidos nesta análise empírica originaram o diagrama de Cordier, apresentado na Figura D.3. Este diagrama expressa a relação entre o coeficiente de ligeireza (σ_L) e o coeficiente de diâmetro (δ_D), sendo apresentado concomitantemente; configurações do escoamento no rotor e a curva recomendada aos projetos de rotores de máquinas de fluxo (Bohl, 2008).



O diagrama da Figura D.4, aplicado fundamentalmente na avaliação de projetos de rotores eólicos, especifica o intervalo recomendado através da relação entre a solidez (σ s) e razão de velocidades na ponta da pá (λ). Portanto, este diagrama é igualmente aplicável na validação da especificação da razão de velocidades na ponta da pá (λ) estabelecida pela Tabela D.1, através da determinação da solidez do concentrador híbrido. Equações intrínsecas à solidez de rotores análogos ao concentrador não são relatados na literatura. Portanto, a solidez do concentrador híbrido foi determinada através do conceito de solidez da corda apresentado por Burton et al. (2021) e pela análise desenvolvida sob as Figuras D.5 e D.6.



Figura D.4 - Diagrama de solidez (σ_s) e razão de velocidades na ponta da pá (λ) Fonte: Adaptado de Park (1981)

A solidez da corda (σ_{SCr}) consiste na razão entre o somatório das cordas dos elementos de pá num determinado raio e o perímetro da circunferência neste raio (Burton et al., 2021). A solidez é determinada estritamente na região correspondente a área varrida pelas pás.

A solidez da corda (σ_{SCr}) é determinada pela Equação D.16 (Burton et al., 2021).

$$\sigma_{SCr} = \frac{N_{PA}c_r}{2 \pi r} \tag{D.16}$$

Em suma, a Equação D.16 estabelece a solidez do rotor em um raio (r) (Burton et al., 2021).

Os rotores eólicos apresentam em sua área varrida elementos sólidos compreendidos pelas suas pás. O concentrador híbrido apresenta em sua área varrida dois componentes sólidos: as pás e refletores. Deste modo, a solidez da corda do concentrador híbrido deve considerar o comprimento das cordas do elemento de pá e o comprimento dos refletores no raio (r).

O projeto do concentrador híbrido estabeleceu a aplicação de vinte lacunas retangulares em seu refletor, apresentando dimensões constituídas de largura de 0,275 metros e comprimento de 2 metros. Posto isto, as lacunas originaram vinte segmentos de refletores no concentrador híbrido. A Figura D.5 (a) apresenta a vista frontal dos refletores e suas respectivas lacunas. A aplicação de lacunas conforme as dimensões estabelecidas, determinaram aos segmentos de refletores em seu raio igual a um metro, a espessura tendendo a zero. Esta característica geométrica em seu raio igual a um metro culminou na correspondência entre a área do segmento do refletor e a

área do setor circular proveniente de um círculo singular e específico demonstrado na Figura D.5 (b). Este círculo correspondente, caracterizado por seu diâmetro obtido pela diferença entre os diâmetros externo e interno do concentrador híbrido, foi dividido em vinte setores circulares.



A validação da correspondência entre as áreas do setor circular e do segmento de refletor foi realizada por meio de estudo comparativo desenvolvido em AutoCAD[®]. Nesta análise foi realizado o posicionamento do centro do círculo correspondente no vértice de um segmento de refletor, sendo que o setor circular é justaposto ao segmento de refletor. Este posicionamento é demonstrado na Figura D.6 (a).



Figura D.6 - Análise de correspondência entre áreas

A análise comparativa comprovou que a área do refletor corresponde à área do setor circular, conforme mostrado na Figura D.6 (b). A comprovação quantitativa desta correspondência foi estabelecida pelos resultados do AutoCAD® para as áreas do refletor e do setor circular, apresentando variação de aproximadamente 6,5%.

A validação desta correspondência entre áreas comprova, por conseguinte, a correspondência entre os comprimentos do refletor num raio (r) e do setor circular num raio (r-1). Portanto, a determinação do comprimento dos refletores num raio (r) é estabelecida pelo comprimento do círculo de diâmetro de quatro metros num raio (r-1). Esta definição é de vital importância para a determinação da solidez do concentrador híbrido (σ_{SCh}), pois estabelece a parcela a ser aplicada no numerador da Equação D.16, definindo a fórmula da solidez da corda do concentrador híbrido (σ_{SCrCh}), determinada através da Equação D.17.

$$\sigma_{SCrCh} = \frac{N_{PA}c_R + 2 \pi (r-1)}{2 \pi r}$$
(D.17)

A solidez do concentrador híbrido (σ_{SCh}) foi estabelecida pela determinação da solidez média das cordas dos elementos de pá do concentrador (σ_{SmCrCh}). Esta solidez consiste numa média aritmética simples, sendo determinada pela razão entre o somatório da solidez da corda do concentrador híbrido (σ_{SCrCh}) e o número de elementos de pá (bs) aplicados na análise. Portanto, a solidez do concentrador híbrido (σ_{SCh}) é estabelecida através da Equação D.18.

$$\sigma_{SCh} = \sigma_{SmCrCh} = \frac{\sum_{0}^{b_{S}} \sigma_{SCrCh}}{b_{S}}$$
(D.18)

O número de elementos de pá aplicados ao cálculo da solidez do concentrador híbrido (*bs*) foi estabelecido segundo critério de convergência fundamentado no resultado da solidez do concentrador híbrido (σ_{SCh}). Este critério de convergência consiste no valor mínimo do número de elementos de pá (*bs*) o qual estabelece efetivamente a invariabilidade do resultado da solidez do concentrador híbrido (σ_{SCh}) em três algarismos decimais após a vírgula.

A metodologia aplicada ao projeto das pás eólicas do concentrador híbrido é composta por um grande número equações, portanto foi desenvolvido um programa em MATLAB a fim de operacionalizar estes cálculos. O fluxograma das Figuras D.7 à D.11 descreve detalhadamente as operações e o sequenciamento realizado pelo programa computacional.

	ΙΝΊCΙΟ	DO PRO	GRAMA					
FATORES, CONSTANTES E COEFICIENTE								
μ_{ar}	Massa específica do ar	g	Aceleração da gravidade					
μ_{var}	Viscosidade absoluta do ar	λ	Razão de velocidades na ponta da pá					
	DADOS	S DE ENT	FRADA					
U_∞	Velocidade do vento	b	Número de elementos de pá					
N _{PÁ_P}	Número de pás de projeto	D_e	Diâmetro externo					
NLAC	Número de lacunas	D_i	Diâmetro interno					
		रप्र	-					
		Â						

Figura D.7 - Fluxograma do programa computacional aplicado ao projeto das pás eólicas (parte 1)



Figura D.8 - Fluxograma do programa computacional aplicado ao projeto das pás eólicas (parte 2)



Figura D.9 - Fluxograma do programa computacional aplicado ao projeto das pás eólicas (parte 3)



Figura D.10 - Fluxograma do programa computacional aplicado ao projeto das pás eólicas (parte 4)



Figura D.11 - Fluxograma do programa computacional aplicado ao projeto das pás eólicas (parte 5)

A velocidade angular do concentrador híbrido em radianos por segundo (Ω) e rotações por minuto (n) relativos a razão de velocidades na ponta da pá preliminarmente aplicada (λ =1,04), assim como o número de Reynolds (Re) correspondente à velocidade da corrente livre de projeto (U_{∞} = 6m/s), são apresentados na Tabela D.2.

ado
8
106
)

Tabela D.21 - Resultados de velocidade angular e número de Reynolds

A relação entre coeficiente de sustentação e arrasto (C_L/C_D) de projeto do concentrador híbrido associada à sua especificação de número de pás (N_{PA}), oportunizou através da Equação D.1, a obtenção da curva característica de seu coeficiente de potência máximo teórico (C_{PMTC}). A Figura D.12 apresenta esta curva característica no diagrama de coeficiente de potência (C_P) em função da razão de velocidades na ponta da pá (λ).



Figura D.12 - Curva de coeficiente de potência máximo teórico do concentrador híbrido (CPMTC)

O coeficiente de potência máximo teórico do concentrador híbrido (C_{PMTC}) foi determinado através da Equação D.1, sendo apresentado o seu resultado pela Tabela D.3.

Tabela D.3 - Coeficiente de potência máximo teórico do concentrador híbrido (CPMTC)

Grandeza adimensional	Resultado
Срмтс	0,5245

A aplicação do resultado estabelecido pela Tabela D.3 na Equação D.2 culminou na obtenção de três raízes para o fator de indução axial (*a*). Estas três raízes, denominadas de (*a*₁), (*a*₂) e (*a*₃) respectivamente, são demonstradas na Tabela D.4.

Tabela D.4- Resultado das raízes referentes ao fator de indução axial (a)

α1	α_2	A 3
0,2102	0,4741	1,3160

A análise das raízes (a_1) , (a_2) e (a_3) , fundamentada nos critérios de aprovação estabelecidos neste apêndice, determinou a especificação do fator de indução axial (a) igual à raiz (a_1) .

A determinação do fator de indução axial (a) estabeleceu a especificação da velocidade do vento no concentrador híbrido (U_c), enunciada na Tabela D.5.

Tabela D.5 - Velocidade do vento no concentrador híbrido (U_C)

Velocidade	Unidade	Resultado
Vento no concentrador híbrido (Uc)	[m/s]	4,74

Os resultados das grandezas de funcionamento e adimensionais intrínsecos ao concentrador híbrido, determinadas pelas Equações D.8 à D.15, são apresentados na Tabela D.6.

C			
Grandezas de funcionamento e adimensionais	Simbologia	Unidade	Resultado
Vazão de ar	\mathcal{Q}	$[m^3/s]$	46,91
Área projetada relativa às lacunas	A_{PL}	[m]	11,00
Altura de energia	Н	[m]	1,14
Energia específica	Y	[J/kg]	11,23
Diâmetro interno corrigido pela vazão	D_{ic}	[m]	4,84
Relação diâmetro externo e interno corrigido	Dic/De		0,81
Rotação específica	n _{qA}		372
Coeficiente de diâmetro	δ_D		1,70
Coeficiente de ligeireza	σ_L		0,78
Coeficiente de pressão	Ψ		0,57
Coeficiente de pressão relativo ao diagrama 3.16	$10^{*}\psi^{0,5}$		7,60

Tabela D.6 - Resultados das grandezas de funcionamento e adimensionais do concentrador híbrido



Os resultados das grandezas adimensionais descritos na Tabela D.6 foram aplicados na obtenção dos pontos de projeto do concentrador híbrido nos diagramas das Figuras D.13 e D.14.

Figura D.13 - Ponto de projeto do concentrador híbrido no diagrama de dimensionamento de ventiladores Fonte: Adaptado de Bran e Souza (1969)



Figura D.14 - Ponto de projeto do concentrador híbrido no diagrama de Cordier Fonte: Adaptado de Bohl (2008)

Os resultados das características construtivas e operacionais dos elementos de pá, obtidos pela aplicação das Equações 2.1 a 2.7, são apresentados na Tabela D.7.

Constantiations constructivas a anomazionais	Simbologia	Simbologio Unidado		Elemento de pá									
Caracteristicas construtivas e operacionais		Unidade	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Raio	r	[m]	1,00	1,20	1,40	1,60	1,80	2,00	2,20	2,40	2,60	2,80	3,00
Posição adimensional radial	μ_r		0,33	0,40	0,47	0,53	0,60	0,67	0,73	0,80	0,87	0,93	1,00
Velocidade relativa	W_r	[m/s]	6,85	6,81	6,86	6,98	7,14	7,33	7,55	7,80	8,05	8,33	8,61
Razão de velocidades	λr		0,35	0,42	0,49	0,56	0,62	0,69	0,76	0,83	0,90	0,97	1,04
Fator de indução tangencial	a'		1,38	0,96	0,71	0,54	0,43	0,35	0,29	0,24	0,20	0,18	0,15
Ângulo de fluxo	ϕ_r	[°]	43,7	44,1	43,6	42,7	41,5	40,2	38,8	37,4	36,0	34,6	33,3
Ângulo de passo	β_r	[°]	38,9	39,3	38,9	38,0	36,8	35,5	34,1	32,6	31,2	29,9	28,6
Corda	Cr	[m]	0,26	0,27	0,26	0,26	0,25	0,25	0,24	0,23	0,22	0,22	0,21

Tabela D.7 - Características construtivas e operacionais dos elementos de pá.

O número de elementos de pá aplicado na determinação da solidez do concentrador híbrido (*bs*) é apresentado na Tabela D.8. O resultado da solidez do concentrador híbrido (σ_{SCh}), determinado fundamentalmente pelas Equações D.16 a D.18 sob número de elementos de elementos de pá (*bs*), é demonstrado na Tabela D.8.

Parâmetro e grandeza adimensional	Resultado
Elementos de pá aplicados solidez do concentrador híbrido (bs)	5000
Solidez do concentrador híbrido (σ_{SCh})	0,723

Tabela D.8 - Número de elementos de pá (b_S) e solidez do concentrador híbrido (σ_{SCh})

O resultado de solidez do concentrador híbrido (σ_{SCh}) e o valor atribuído incialmente a razão de velocidades na ponta da pá (λ) foram aplicados no diagrama proposto por Park (1981), estabelecendo o ponto de projeto do concentrador híbrido. A Figura D.15 apresenta o digrama e o respectivo ponto de projeto do concentrador híbrido.



Figura D.15 - Ponto de projeto do concentrador híbrido no diagrama (σ_s) vs (λ) Fonte: Adaptado de Park (1981)

Os resultados apresentados nos diagramas das Figuras D.13, D.14 e D.15 corroboram a efetividade da aplicação da metodologia de dimensionamento de ventiladores associada ao BEM no projeto das pás do concentrador híbrido. A análise estabelecida nos pontos de projeto nestes diagramas valida o projeto, atestando a validade da metodologia aplicada.

APÊNDICE E

O rotor da turbina eólica desenvolvida por Charles Brush, apresenta apreciável semelhança ao concentrador híbrido no que concerne a alta solidez. Ambos os rotores foram projetados para operar a pequenas alturas do solo, compreendidas respectivamente em 18 e 8 metros (King, 2011). A turbina eólica de Charles Brush consiste numa adequada referência aplicável na determinação do diâmetro interno das pás do concentrador híbrido, porém as informações relativas ao seu rotor são imprecisas e sugerem que seu diâmetro interno seja aproximadamente 40% de seu diâmetro externo (King, 2011). Portanto, apesar da turbina eólica de Charles Brush constituir-se numa referência válida, outra referência deve ser considerada a fim de ratificar o valor aproximado da relação entre diâmetros interno e externo deste rotor eólico. A referência proposta para esta ratificação consiste numa turbina eólica comercial de alta aplicabilidade em publicações de periódicos científicos; característica corroborada através das publicações de Massouh e Dobrev (2007), Noura et al. (2016) e Chkir et al. (2011). Esta turbina foi igualmente aplicada nos estudos desenvolvido por Su et al. (2011) e Tao et al. (2011), constituindo o sistema híbrido eólico solar CSCWA. Enfim, esta turbina eólica consiste na Rutland 503.

A turbina eólica Rutland 503 constitui-se numa adequada referência para a determinação do diâmetro interno das pás do concentrador híbrido. O rotor desta turbina eólica, tal como o concentrador híbrido, apresenta alta solidez, conforme Massouh e Dobrev (2007). O rotor da turbina eólica Rutland 503 apresenta diâmetro externo do rotor de 0,5 metros e diâmetro interno do rotor de 0,135 metros, conforme Massouh e Dobrev (2007). Portanto, o diâmetro interno desta turbina eólica corresponde a 27 % de seu diâmetro externo (Massouh e Dobrev, 2007).

As relações entre os diâmetros internos e externos das turbinas eólicas de Charles Brush e a Rutland 503, compreendidas respectivamente em 35% e 27%, caracterizaram o intervalo o qual foi adotado na especificação do diâmetro interno das pás do concentrador híbrido. Logo, o diâmetro interno das pás do concentrador híbrido foi estabelecido em 33% de seu diâmetro externo, resultando na dimensão de 2 metros.

APÊNDICE F

Na figura F-1 é demonstrado o concentrador híbrido do tipo disco parabólico otimizado, referente ao ponto candidato 3.



Figura F-1 concentrador híbrido do tipo disco parabólico otimizado

Na Tabela F-1 são demonstrados os principais parâmetros do dimensionamento térmico e geométrico do subsistema de conversão de energia solar referente ao sistema híbrido otimizado.

Parâmetros	Unidade	Resultados
Distância focal - (f)	[m]	7,65
Área do concentrador - (Ac)	[m ²]	13,4
Razão de concentração geométrica - (C_G)		759
Rendimento do concentrador - (ηc)	[%]	88,1
Rendimento do receptor - (η_R)	[%]	90,1
Rendimento do motor Stirling - (η_S)	[%]	27,1
Rendimento global - (η_G)	[%]	19,5
Potência elétrica líquida - (PELS)	[kW]	1,43
Temperatura do receptor - (T_R)	[K]	1340
Produto dos fatores de sombreamento e interceptação - $(F_S*\Gamma)$		0,981

Tabela F-1 Dimensionamento térmico e geométrico do subsistema de conversão de energia solar

6.REFERÊNCIAS

Abutunis, A; Hussein, R; Chandrashekhara, K. A neural network approach to enhance blade element momentum theory performance for horizontal axis hydrokinetic turbine application **Renewable Energy**, Vol.136, pp. 1281–93, 2019. https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.09.105

Abdelhady, S. Performance and cost evaluation of solar dish power plant: sensitivity analysis of levelized cost of electricity (LCOE) and net present value (NPV). **Renewable Energy.** Vol. 168, pp. 332-342, 2020. https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.12.074

Abdelrazik, A. S; Osama, A; Allam, A. N; Shboul, B; Sharafeldin, M. A; Elwardany, M; Masoud, A. M. ANSYS-Fluent numerical modeling of the solar thermal and hybrid photovoltaic-based solar harvesting systems, **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, Vol. 148, pp. 11373–11424, 2023. https://doi.org/10.1007/s10973-023-12509-2

Acarer, S; Uyulan, Ç; Karadeniz, Z. H. Optimization of radial inflow wind turbines for urban wind energy harvesting. **Energy.** Vol. 202, pp. 117772, 2020. <u>https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117772</u>

Allouhi, H; Allouhi, A; Buker, M.S; Zafar, S; Jamil, A. Recent advances, challenges, and prospects in solar dish collectors: Designs, applications, and optimization frameworks. **Solar energy materials and solar cells**, Vol. 241, pp. 111743, 2022. https://doi.org/10.1016/j.solmat. 2022.111743

Alkhabbaz, A; Yang, H. S; Weerakoon, A. H. S; Lee, Y. H. A novel linearization approach of chord and twist angle distribution for 10 kW horizontal axis wind turbine. **Renewable Energy**. Vol.178, pp. 1398-1420, 2021. https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.06.077

Amaral, J. V. S; Montevechi, J. A. B; Miranda, R. C; Junior, W. T. S. Metamodel-based simulation optimization: A systematic literature review. **Simulation Modelling Practice and Theory**, Vol. 114, pp. 102403, 2022. https://doi.org/10.1016/j.simpat.2021.102403

ANSYS - Design Modeler User's Guide, 2021. Disponível em: <u>https://support.ansys.com/</u> <u>TrainingAndSupport/TrainingAndTutorialMaterial</u>. Acesso em: 01 de agosto de 2022.

ANSYS - Meshing User's Guide, 2021. Disponível em: <u>https://support.ansys.com/Training</u> <u>AndSupport/TrainingAndTutorialMaterial</u>. Acesso em: 01 de agosto de 2022.

ANSYS - Fluent User's Guide, 2021. Disponível em: <u>https://support.ansys.com/TrainingAnd</u> <u>Support/TrainingAndTutorialMaterial</u>. Acesso em: 01 de agosto de 2022.

ANSYS - Fluent in Workbench User's Guide, 2021. Disponível em: <u>https://support.ansys.com/</u> <u>TrainingAndSupport/TrainingAndTutorialMaterial</u>. Acesso em: 01 de agosto de 2022. ANSYS - DesignXplorer User's Guide, 2021. Disponível em: <u>https://support.ansys.com/</u> <u>Training AndSupport/TrainingAndTutorialMaterial</u>. Acesso em: 01 de agosto de 2022.

ANSYS - DesignXplorer Optimization Tutorials, 2021. Disponível em: <u>https://support.ansys.</u> <u>com/ TrainingAndSupport/TrainingAndTutorialMaterial</u>. Acesso em: 01 de agosto de 2022.

ANSYS - Workbench User's Guide, 2021. Disponível em: <u>https://support.ansys.com/Training</u> <u>AndSupport/TrainingAndTutorialMaterial</u>. Acesso em: 01 de agosto de 2022.

Bagchi, T. P. Multiobjective Scheduling by Genetic Algorithms, USA: Springer, 1999.

Baharoon, D. A; Rahman, H. A; Omar, W. Z. W; Fadhl, S. O. Historical development of concentrating solar power technologies to generate clean electricity efficiently - A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Vol.41, pp.996-1027, 2015. <u>https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.09.008</u>

Bakırc M, Yılmaz S. Theoretical and computational investigations of the optimal tip-speedratio of horizontal-axis wind turbines. **Engineering Science and Technology** Vol.21, pp 1128 - 1142, 2018. https://doi.org/10.1016/j.jesteb.2018.05.006

https://doi.org/10.1016/j.jestch.2018.05.006

Bran, R; Souza, Z. Máquinas de Fluxo – Turbinas, Bombas e Ventiladores. Rio de Janeiro: Ao Livro Técnico, 1969.

Boatto, U; Bonnet, P. A; Avallone F; Ragni, D. Assessment of Blade Element Momentum Theory-based engineering models for wind turbine rotors under uniform steady inflow. **Renewable Energy,** Vol. 214, pp. 307-3017, 2023. https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.04.050

Bohl, W. Strömungsmaschinen. Würzburg: Vogel Buchverlag, 2008.

Burton, T; Sharpe, D; Jenkins, N; Bossanyi, E. Wind Energy Handbook.3° ed.United Kingdom: John Wiley & Sons, 2021.

Buscemi, A; Guarino, S; Ciulla, G; Brano, V. A methodology for optimisation of solar dish-Stirling systems size, based on the local frequency distribution of direct normal irradiance. **Applied Energy**, Vol. 303, pp. 117681, 2021. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117681

Caballero, G. E. C; Mendoza, L. S; Martinez, A. M; Silva, E. E; Melian, V. R; Venturini, O. J; Olmo, O. A. L. Optimization of a Dish Stirling system working with DIR-type receiver using multi-objective techniques. **Applied Energy** Vol.204, pp.271-286, 2017. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.07.053

Castellanos, L. S. M; Caballero, G. E. C; Cobas, V. R. M.; Lora, E. E. S; Reyes, A. M. M. Mathematical modeling of the geometrical sizing and thermal performance of a Dish/Stirling system for power generation, **Renewable Energy**, Vol.107, pp.23-35, 2017. <u>https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.01.020</u> CEPEL - Atlas do Potencial Eólico Brasileiro, Rio de Janeiro, 2017. Disponível em: <u>http://novoatlas.cepel.br/wp-content/uploads/2017/07/Novo-Atlas-do-Potêncial-Eolico-Brasileiro</u>-<u>SIM_2013.pdf</u>. Acesso em: 29 de novembro de 2018.

Chkir, S. Unsteady Loads Evaluation for a Wind Turbine Rotor using free wake method. **Energy Procedia**. Vol.6, p.777-785, 2011. https://doi.org/10.1016/j.egypro.2011.05.088

Coventry, J; Andraka, C. Dish systems for CSP, **Solar Energy**, Vol.152, pp.140-170, 2017. <u>https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.02.056</u>

Coello, C. A. C; Lamont, G. B; Veldhuizen, D. A. V. Evolutionary Algorithms for Solving Multi-Objective Problems. USA; **Springer**. 2° ed. 2006.

CRESESB – Atlas solarimétrico do Brasil, Recife, 2000. Disponível em: <u>http://www.cresesb</u> <u>cepel.br/publicacoes/download/atlas_solarimetrico_do_brasil_2000.pdf</u>. Acesso em: 29 de novembro de 2018.

Cui, Y; Geng, Z; Zhu, Q; Han, Y. Review: Multi-objective optimization methods and application in energy saving. **Energy.** Vol. 125, pp. 681-704, 2017. <u>https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.02.174</u>

Darwish, A. S; Shaaban, S; Marsillac, E; Mahmood, N. M. A methodology for improving wind energy production in low wind speed regions, with a case study application in Iraq. **Computers & Industrial Engineering,** Vol. 127, pp 89-102, 2019. https://doi.org/10.1016/j.cie.2018.11.049

Dehouck, V; Lateb, M; Sacheau, J; Fellouah, H. Application of the blade element momentum theory to design horizontal axis wind turbine blades. **Journal of Solar Energy Engineering - ASME**, Vol. 140, 2018. https://doi.org/10.1115/1.4038046

Dick, E. Fundamentals of Turbomachines, 2nd ed. Switzerland: Springer, 2022.

Elsakka, M. M; Ingham, D. B; Mab, L; Pourkashanian, M; Moustafa, G. H; Elhenawy, Y. Response Surface Optimisation of Vertical Axis Wind Turbine at low wind speeds. **Energy Reports.** Vol. 8, pp. 10868 - 10880, 2022. https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.08.222

Energydata.info. Global Solar Atlas. Disponível em: <u>https://globalsolaratlas.info/</u>. Acesso em: 25 de novembro de 2018.

Energydata.info. Global Wind Atlas. Disponível em: <u>https://globalwindatlas.info/</u>. Acesso em: 25 de novembro de 2018.

Enteria, N; Akbarzadeh, A. Solar energy sciences and engineering applications. United Kingdom: **Taylor & Francis Group**, 2014.

EPE - Empresa de pesquisa energética - Anuário estatístico de energia elétrica 2023. Disponível: <u>https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dadosabertos/publicacoes/Publicacoes/Arquivos/</u><u>publicacao-160/topico-168/anuario-factsheet.pdf</u>. Acesso em: 01 de agosto de 2023.

Eriksson, E. L. V; Gray E. M. Optimization of renewable hybrid energy systems - A multiobjective approach. **Renewable Energy**, Vol. 133, pp. 971 - 999, 2019. <u>https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.10.053</u>

Fan, C; Adjei, R. A; Wu, Y; Wang A. Parametric study on the aerodynamic performance of a ducted-fan rotor using free-form method. **Aerospace Science and Technology**, Vol.10, pp. 105842, 2020.

https://doi.org/10.1016/j.ast.2020.105842

Fritz, E. K; Ferreira, C; Boorsma, K. An efficient blade sweep correction model for blade element momentum theory. **Wind energy**. Vol. 25, pp 1977-94, 2022 <u>https://doi.org/10.1002/we.2778</u>

Fonseca, C; Fleming, P. Genetic algorithms for multiobjective optimization: formulation, discussion and generalization. **International conference on genetic algorithms**, 5, p.416-423, 1993.

Ganjefar, S; Ghasemi, A. A. A novel-strategy controller design for maximum power extraction in stand-alone windmill systems. **Energy**, Vol.76, p.326 - 335, 2014. <u>http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2014.08.024</u>

Giahi, H. M; Dehkordi, J. A. Investigating the influence of dimensional scaling on aerodynamic characteristics of wind turbine using CFD simulation. **Renewable Energy.** Vol. 97, pp. 162-168, 2016.

http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2016.05.059

Ghaithan, A; Hadidi, L; Mohammed, A. Techno-economic assessment of concentrated solar power generation in Saudi Arabia. **Renewable Energy.** Vol. 220, 2024. <u>https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.119623</u>

Global Solar Atlas. Disponível em: <u>https://globalsolaratlas.info/map</u>. Acesso em: 25 de novembro de 2021.

Global Wind Atlas. Disponível em: <u>https://globalwindatlas.info/en</u>. Acesso em: 25 de novembro de 2021.

Graham, P; Fadlallah, S. O; Boulbrachene, K. Wind incidence and pedestal height effect on the flow behaviour and aerodynamic loading on a stand-alone solar parabolic dish. **Renewable Energy**, Vol. 227, pp. 120451, 2024. https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.120451

Gupta, K; Gupta, K. M. Optimization of Manufacturing Processes, Switzerland: Springer, 2020

Hafez, A.Z; Soliman, A; El-Metwally, K.A; Ismail, I.M. Solar parabolic Dish/Stirling engine system design, simulation, and thermal analysis, **Energy Conversion and Management**, Vol.126, pp.60-75, 2016. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.07.067

Hafez, A.Z; Soliman, A; El-Metwally, K.A; Ismail, I.M. Design analysis factors and specifications of solar dish technologies for different systems and applications. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Vol.67, pp.1019-1036, 2017. <u>https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.077</u>

Hansen, K. Decision-making based on energy costs: Comparing levelized cost of energy and energy system costs. **Energy Strategy Reviews.** Vol. 24, pp. 68-82, 2019. <u>https://doi.org/10.1016/j.esr.2019.02.003</u>

Hau, E. Windkraftanlagen, Grundlagen. Technik. Einsatz. Wirtschaftlichkeit, 6° ed. Germany: **Springer**, 2016.

Her, C; Sambor, D. J; Whitney, E; Wies, R. Novel wind resource assessment and demand flexibility analysis for community resilience: A remote microgrid case study. **Renewable Energy**. Vol. 179, pp. 1472-86, 2021. https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.07.099

Innova. Disponível em: <u>https://anest-italia.it/innova-solar-energy</u>. Acesso: 23 de março de 2020.

Jaluria, Y. Design and Optimization of Thermal Systems, USA: CRC Press, 2020.

Jha, A.R; Wind Turbine Technology. New York: CRC Press, 2010.

Johlas, H. M; Schmidt, D. P; Lackner, M. A. Large eddy simulations of curled wakes from tilted wind turbines. **Renewable Energy**. Vol. 188, pp. 349-360, 2022. https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.02.018

Jankovic, A; Chaudhary, G; Goia, F. Designing the design of experiments (DOE) – An investigation on the influence of different factorial designs on the characterization of complex systems. **Energy & Buildings**, Vol. 250, pp. 111298, 2021. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111298

Kalogirou, S. Solar Energy Engineering: Processes and System. 2.ed. United States: Elsevier, 2014.

Kaya, M. N; Köse, F; Uzol, O; Ingham, D; Ma, L; Pourkashanian, M. Aerodynamic Optimization of a Swept Horizontal Axis Wind Turbine Blade. Journal Energy Resources Technology. Vol.143, p. 91301 - 91311, 2021. https://doi.org/10.1115/1.4051469

Kaseb, Z; Montazeri, H. Data-driven optimization of building-integrated ducted openings for wind energy harvesting: Sensitivity analysis of metamodels. **Energy.** Vol. 258, pp. 124814, 2022.

https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.124814

Katoch, S; Chauhan, S. S; Kumar, V. A review on genetic algorithm: past, present, and future. Multimedia Tools and Applications - Springer. Vol. 80, pp. 8091-8126, 2021. https://doi.org/10.1007/s11042-020-10139-6

Kavari, G; Tahani, M; Mirhosseini, M. Wind shear effect on aerodynamic performance and energy production of horizontal axis wind turbines with developing blade element momentum theory. Journal of Cleaner Production, Vol. 219, pp. 368–76, 2019. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.02.073

Kim, Y; Madsen, H. A; Sanchez, M. A; Pirrung, G; Lutz, T. Assessment of blade element momentum codes under varying turbulence levels by comparing with blade resolved computational fluid dynamics. Renewable Energy, Vol.160, pp 788-802, 2020. https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.06.006

King, D. Charles Brush's Windmill Generator 120 Years Ago! (1888 wind energy technology) Mechanical Engineering-CIME, Vol.133, p.51, 2011.

Khosravi, A; Syri, S; Pabon, J. J. G; Sandoval, O. R; Caetano, B. C; Barrientos, M. H. Energy modeling of a solar dish/Stirling by artificial intelligence approach. Energy Conversion and Management. Vol.112021, 2019.

https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.112021

Lee, H. M; Kwon, J.Performance improvement of horizontal axis wind turbines by aerodynamic shape optimization including aeroelastic deformation. Renewable Energy. Vol. 147, pp. 2128-2140, 2020.

https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.09.125

Li, L; Dubowsky, S. A new design approach for solar concentrating parabolic dish based on optimized flexible petals, Mechanism and Machine Theory, Vol.46, pp.1536-1548, 2011. https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2011.04.012

Li, J; Liu, R; Yuan, P; Pei, Y; Cao, R; Wang, G. Numerical simulation and application of noise for high-power wind turbines with double blades based on large eddy simulation model. Renewable Energy. Vol. 146 pp. 1682-1690, 2020. https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.07.164

Li, Z; Zheng, X. Review of design optimization methods for turbomachinery aerodynamics. Progress in Aerospace Sciences. Vol. 93, pp. 1-23, 2017. http://dx.doi.org/10.1016/j.paerosci.2017.05.003

Lovegrove, K; Stein W. Concentrating Solar Power Technology - Principles, developments, and applications. USA: Woodhead Publishing, 2nd ed. 2020.

Malik, M. Z; Shaikh, P. H; Zhang. S; Lashari, A. A; Leghari, Z. H; Baloch, M. H; Memon, Z. A; Caiming, C. A review on design parameters and specifications of parabolic solar dish Stirling systems and their applications. Energy Reports. Vol 8, pp. 4128 - 55, 2022. https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.03.031

Mansi, A; Aydin, D. The impact of trailing edge flap on the aerodynamic performance of smallscale horizontal axis wind turbine. **Energy Conversion and Management.** Vol 256, pp. 115396, 2022.

https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115396

Manwell, J. F; McGowan, J. G; Rogers, A.L. Wind Energy Explained, Theory, Design and Application. 2.ed. United Kingdom: John Wiley & Sons, 2010.

Martins, J. R. R; Ning, A. Engineering Design Optimization, United Kingdom: Cambridge University Press, (2021)

Massouh, F; Dobrev, I. Exploration of the vortex wake behind of wind turbine rotor, **Journal of Physics**, Vol.75, 2007. <u>https://doi.org/10.1088/1742-6596/75/1/012036</u>

Mahto, N; Chakravarthy, S, R. Response surface methodology for design of gas turbine combustor. **Applied Thermal Engineering.** Vol. 211, pp. 118449, 2022. <u>https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.118449</u>

Moghimia, M.A; Ahmadib, G. Wind barriers optimization for minimizing collector mirror soiling in a parabolic trough collector plant. **Applied Energy.** Vol. 225 pp.413-423, 2018. <u>https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.05.027</u>

Moghimia, M. A; Craig, K. J; Meyer, J. P. Simulation-based optimization of a linear Fresnel collector mirror field and receiver for optical, thermal and economic performance. Vol. 153 pp.655-678, 2017.

http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2017.06.001

Moreira, D; Mathias, N; Morais, T. Dual flapping foil system for propulsion and harnessing wave energy: A 2D parametric study for unaligned foil conFigurations. **Ocean Engineering**, Vol.215, p.107875, 2020.

https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.107875

Moussa, M. O. Experimental and numerical performances analysis of a small three blades wind turbine. **Energy.** Vol. 203, pp. 117807, 2020. <u>https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117807</u>

Mostafaeipour, A; Jahangiri, M; Haghani, A; Dehshiri, S. J. H; Dehshiri, S. S. H; Issakhov, A; Sedaghat, A; Saghaei, H; Akinlabi, E. T; Sichilalu, S. M; Chowdhury, S; Techato, K. Statistical evaluation of using the new generation of wind turbines in South Africa. **Energy Reports.** Vol. 6, pp. 2816-27, 2020. https://doi.org/10.1016/j.egyr.2020.09.035

Nakhchi, M. E; Naung, S. W; Rahmati, M. A novel hybrid control strategy of wind turbine wakes in tandem conFiguration to improve power production. **Energy Conversion and Management**. Vol. 260, pp. 115575, 2022.

https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115575

Nelson, V; Starcher, K. Wind energy: Renewable energy and the environment. 3° ed. Boca Raton, USA: **CRC Press**, 2019.

Nishi, Y; Koga, H; Wee, Y. H. Multi-objective optimization of an axial flow hydraulic turbine with a collection device to be installed in an open channel. **Renewable Energy.** Vol. 209, pp. 664-660, 2023.

https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.03.130

Noura, B; Dobrev, I; Kerfah, R; Massouh, F; Khelladi, S. N. B. Investigation of the Rotor Wake of Horizontal Axis Wind Turbine under Yawed Condition. Journal of Applied Fluid Mechanics. Vol.9, p.2695-2705, 2016. https://doi.org/10.29252/jafm.09.06.25908

NREL, National Renewable Energy Laboratory, System Advisor Model (SAM), 2018

Oliver, K. Genetic Algorithm Essentials, Switzerland: Springer, 2018.

Palenzuela, P; Alarcón, D. C. P; Zaragoza, G. Concentrating Solar Power and Desalination Plants. Switzerland: **Springer**, 2015.

Pereira, E. B; Martins, F. R; Gonçalves, A. R; Costa, R. S; Lima, F. J. L; Rüther, R; Abreu, S. L; Tiepolo, G. M; Pereira, S. V; Souza, J. G. Atlas Brasileiro de Energia Solar. 2.ed. São José dos Campos, 2017. Disponível em: <u>http://ftp.cptec.inpe.br/labren/publ/livros/brazil_solar_atlas</u> <u>R1.pdf</u>. Acesso em: 25 de novembro de 2018.

Pereira, J. L. J; Olivera, G. A; Francisco, M. B; Junior, S. S. C; Gomes, G. F. A Review of Multi-objective Optimization: Methods and Algorithms in Mechanical Engineering Problems. **Computational Methods in Engineering.** Vol. 29, pp. 2285-2308, 2022. https://doi.org/10.1007/s11831-021-09663-x

Pinto, R. N; Afzal, A; Souza, L. V; Ansari, Z; Samee, A. D. M. Computational Fluid Dynamics in Turbomachinery: A Review of State of the Art. **Springer - Archives of Computational Methods in Engineering - State of the Art Reviews.** Vol. 24, pp. 467-479, 2016. https://doi.org/10.1007/s11831-016-9175-2

Pinto, R. L. U. F; Gonçalves, B. P. F. A revised theoretical analysis of aerodynamic optimization of horizontal-axis wind turbines based on BEM theory. **Renewable Energy**, Vol.105, pp. 625-636; 2017. https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.12.076

Rahimoon, A. A; Abdullah, M. N; Soomro, D. M; Nassar, M. Y; Z.A. Memon, Shaikh, P.H; Design of parabolic solar dish tracking system using Arduino. **Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science.** Vol. 17, No. 2, pp. 914-921, 2020. http://doi.org/10.11591/ijeecs.v17.i2.pp914-921

Ravindran, A; Ragsdell K. M; Reklaitis G. V. Engineering Optimization: Methods and Applications. 2.ed. USA: John Wiley & Son, 2006.

Rao, S. S. Engineering Optimization Theory and Practice, USA: John Wiley & Sons. 5° ed. 2020.

RENAI - Rede Nacional de Informações sobre o Investimento. Atração de investimentos no Estado do Ceará-Mapa territorial de parques eólicos, 2010. Disponível em: <u>http:// investimentos mdic.gov.br/public/arquivo/arq1321639205.pdf</u>. Acesso em: 29 de novembro de 2018.

Rozenfeld, H; Forcellini, F. A; Amaral, D. C; Toledo, J. C; Silva, S. L; Alliprandini, D.H; Scalice, R K. Gestão de desenvolvimento de produtos: uma referência para a melhoria do processo. São Paulo: **Saraiva**, 2006.

Schaffarczyk, A. P; Introduction to Wind Turbine Aerodynamics, Berlin: Springer, 2014.

Sandoval, O. R; Caetano, B, C; Borges, M. U; García, J. J; Valle, R. M. Modelling, simulation and thermal analysis of a solar dish/stirling system: A case study in Natal, Brazil. **Energy Conversion and Management**. Vol. 181, pp. 189-201, 2019. http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2018.12.005.

Serageldin, A. A; Radwan, A; Katsura, T; Sakata, Y; Nagasaka, S; Nagano, K. Parametric analysis, response surface, sensitivity analysis, and optimization of a novel spiral-double ground heat exchanger. **Energy Conversion and Management.** Vol. 240, pp. 114251, 2021. <u>https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114251</u>

Shboul, B; AL-Arfi, I; Michailos, S; Ingham, D; AL-Zoubi, O. H; Ma, L; Hughes, K; Pourkashanian, M. Design and Techno-economic assessment of a new hybrid system of a solar dish Stirling engine integrated with a horizontal axis wind turbine for microgrid power generation. **Energy Conversion and Management**, Vol. 245, 2021. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114587

Silva, A. A. C. Sistema híbrido eólico solar desenvolvido pela integração de pás eólicas ao concentrador solar de sistema Dish-Stirling, **Universidade Federal de Itajubá**, Mestrado, 2019.

Silva, A. A. C; Venturini, O. J; Oliveira, O; Camacho, R. G. R. A solar-wind hybrid system developed by integrating wind blades into a Dish-Stirling concentrator. **Sustainable Energy Technologies and Assessments** Vol. 54, pp 102810, 2022. https://doi.org/10.1016/j.seta.2022.102810

Singh, U. R; Kumar, A. Review on solar Stirling engine: Development and performance. **Thermal Science and Engineering Progress.** Vol. 8, pp. 244-256, 2018. <u>https://doi.org/10.1016/j.tsep.2018.08.016</u>

Shiri, S. A robust optimization approach for design of a general-purpose heat source. **Journal of Space Safety Engineering**. Vol. 8 pp. 211-216, 2021. https://doi.org/10.1016/j.jsse.2021.07.006

Sivanandam, S. N; Deepa, S.N. Introduction to Genetic Algorithms, Germany: Springer, 2008.

Sharma, V; Jain, V. K; Kumar, A. An Introduction to Optimization Techniques; USA: CRC Press, 2021.

Shen, W; Chen, X; Qiu, J; Hayward, J. A; Sayeef, S; Osman, P; Meng, K; Dong, Z. Y. A comprehensive review of variable renewable energy levelized cost of electricity. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. Vol.133, pp. 110301, 2020. <u>https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110301</u>

Sunanda, S; Chandel, S, S. Review of recent trends in optimization techniques for solar windbased hybrid energy systems. **Renewable and Sustainable Energy Reviews,** Vol. 50, p.755– 769, 2015.

http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2015.05.040

Sun Earth Tools. Disponível em: <u>https://www.sunearthtools.com/</u>. Acesso em: 25 de novembro de 2021.

Su, Y; Riffat, S. B; Rogers, T; Zheng, H; Huang, H. A feasibility study of a novel combined solar concentration/wind augmentation system, **International Journal of Low-Carbon Technologies**, Vol. 6, pp. 14-21, 2011.

https://doi.org/10.1093/ijlct/ctq038

Stehly, T; Duffy, P. 2020 Cost of Wind Energy Review: National Renewable Energy Lab (NREL); 2020.

Tao, T; Zheng, H; Su, Y; Riffat, S, B. A novel combined solar concentration wind augmentation system: Constructions and preliminary testing of a prototype, **Applied Thermal Engineering**, Vol.31, pp. 3664 - 3668, 2011. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2011.01.015

Tong, Wei. Wind Power Generation and Wind Turbine Design. United Kingdom: WIT Press, 2010.

Tossas, L.A. M; Leonardi, S. Wind Turbine Modeling for Computational Fluid Dynamics. National Renewable Energy Laboratory (NREL), 2012.

Wang, G; Wang, D; Deng, J; Lyu, Y; Pei, Y; Xiang, S. Experimental and numerical study on the heat transfer and flow characteristics in shell side of helically coiled tube heat exchanger based on multi-objective optimization. **International Journal of Heat and Mass Transfer**. Vol. 137, pp. 349-364, 2019.

https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.03.137

White, F. M. Fluid mechanics. 8.ed. New York: McGraw-Hill, 2015.

Wright, T. Fluid machinery: performance, analysis, and design. United States of America: CRC **Press**, 1999.

Versteeg H. K; Malalasekera W. An Introduction to Computational Fluid Dynamics. The Finite Volume Method. 2°ed. England: **Prentice hall**, 2007.
Ying, P; Chen, Y.K; Xu Y.G. An aerodynamic analysis of a novel small wind turbine based on impulse turbine principles, **Renewable Energy**, Vol.75, 2015. <u>https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.09.035</u>

Zayed, M. E; Zhao, J; Li, W; Elsheikh, A. H; Zhao, Z; Khalil, A; Li, H. Performance prediction and techno-economic analysis of solar Dish/Stirling system for electricity generation. **Applied Thermal Engineering.** Vol. 164, 2020. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.114427

Zayed, M. E; Zhao, Elsheikh, A. H; Zhao, Z; Zhong, S; Kabeel, A. E. Comprehensive parametric analysis, design and performance assessment of a solar dish/Stirling system. **Process Safety and Environmental Protection**. Vol. 146, pp. 276-291, 2021a. https://doi.org/10.1016/j.psep.2020.09.007

Zayed, M. E; Zhao, J; Li, W; Elsheikh, A. H; Elaziz, M. A hybrid adaptive neuro-fuzzy inference system integrated with equilibrium optimizer algorithm for predicting the energetic performance of solar dish collector. **Energy.** Vol. 121289, 2021b. <u>https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121289</u>