

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

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**SISTEMA HÍBRIDO EÓLICO SOLAR DESENVOLVIDO PELA
INTEGRAÇÃO DE PÁS EÓLICAS AO CONCENTRADOR SOLAR DE
SISTEMA DISH-STIRLING**

Autor: Alex Anderson Calbino da Silva

Itajubá, julho de 2019
MG – Brasil

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

Autor: Alex Anderson Calbino da Silva

**SISTEMA HÍBRIDO EÓLICO SOLAR DESENVOLVIDO PELA
INTEGRAÇÃO DE PÁS EÓLICAS AO CONCENTRADOR SOLAR DE
SISTEMA DISH-STIRLING**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de mecânica da Universidade Federal de Itajubá como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Mecânica

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

Orientador: Prof. Dr. Osvaldo José Venturini
Coorientador: Prof. Dr. Waldir de Oliveira

Itajubá, julho de 2019
MG – Brasil

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

Autor: Alex Anderson Calbino da Silva

**SISTEMA HÍBRIDO EÓLICO SOLAR DESENVOLVIDO PELA
INTEGRAÇÃO DE PÁS EÓLICAS AO CONCENTRADOR SOLAR DE
SISTEMA DISH-STIRLING**

Dissertação aprovada por banca examinadora em 03 de julho de 2019, conferindo ao autor o título de **Mestre em Ciências em Engenharia de mecânica**

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Osvaldo José Venturini (Orientador)

Prof. Dr. Waldir de Oliveira (Coorientador)

Prof. Dr. Ramiro Gustavo Ramirez Camacho

Prof. Dr. Gaylord Enrique Carrillo Caballero

Itajubá, julho de 2019
MG – Brasil

DEDICATÓRIA

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

AGRADECIMENTOS

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

Aos meus pais, José Francisco da Silva e Maria Auxiliadora Calbino da Silva, meus maiores professores, que 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 de Fátima Almeida Calbino da Silva, minha grande companheira, presente ao meu lado durante minha graduação, no exercício da minha profissão de engenheiro e durante este mestrado, me acompanhando nos desafios e conquistas de minha vida acadêmica e profissional.

Ao filho, João Gabriel Calbino da Silva, meu grande companheirinho, que apesar de sua pouca idade que impossibilita o seu entendimento sobre o significado do mestrado, sempre esteve ao meu lado demonstrando através da linguagem própria das crianças o seu grande apoio.

A toda minha família e amigos, que de maneira direta ou indireta, contribuíram ao desenvolvimento desta dissertação.

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

Ao meu co-orientador, o Prof. Dr. Waldir de Oliveira, pelos ensinamentos, apoio, colaboração, disposição, disponibilidade, confiança e co-orientação ao longo do desenvolvimento desta dissertação.

Ao Prof. Dr. Ramiro Gustavo Ramirez Camacho, que assim como o meu orientador e co-orientador, foi fundamental no desenvolvimento desta dissertação.

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

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 significativa no desenvolvimento desta dissertação de mestrado.

A Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI), instituição de ensino superior, a qual me concedeu o título de engenheiro mecânico, e por meio desta dissertação, está me conferindo o título de mestre em engenharia mecânica.

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

EPÍGRAFE

“Revelemo-nos, mais por atos do que por palavras, dignos de possuir este grande país”

Theodomiro Carneiro Santiago

SILVA, A. A. C. (2018) - SISTEMA HÍBRIDO EÓLICO SOLAR DESENVOLVIDO PELA INTEGRAÇÃO DE PÁS EÓLICAS AO CONCENTRADOR SOLAR DE SISTEMA DISH-STIRLING.

RESUMO

Os sistemas Dish-Stirling são comumente instalados em campos abertos, os quais apresentam apreciável disponibilidade eólica, portanto estes sistemas de conversão de energia solar estão frequentemente sujeitos a fortes ventos (Sun et al., 2014). A incidência de ventos em concentradores solares dish a determinadas velocidades torna imperativo que o sistema de conversão de energia seja desativado afim de que não ocorram danos ao mesmo (Sun et al., 2014). Portanto, a disponibilidade eólica estabelece uma limitação intrínseca ao período de operação deste sistema de conversão de energia solar. Contudo, a principal limitação estabelecida ao período de geração de energia elétrica dos sistemas Dish-Stirling, concernente a todos os sistemas de conversão de energia solar, consiste em sua restrição ao período diurno, visto que não há disponibilidade de energia solar no período noturno.

A proposta estabelecida nesta dissertação consiste na integração de conversão de energia eólica ao sistema Dish-Stirling, originando um novo conceito de sistema híbrido. Esta hibridização oportunizará o acréscimo no período de geração de energia elétrica dos sistemas Dish-Stirling referente ao período noturno, possibilitado fornecimento de energia elétrica durante todo o dia.

A proposta técnica apresentada na dissertação consiste na hibridização do sistema Dish-Stirling fundamentada no desenvolvimento de um novo conceito de concentrador dish, o concentrador híbrido dish. O concentrador híbrido dish consiste conceitualmente em um concentrador solar dish associado a pás eólicas, estabelecendo nesta mesma estrutura, a conversão de energia solar e a conversão de energia eólica. Portanto, o desenvolvimento do concentrador híbrido dish compreende fundamentalmente seu projeto solar e eólico.

O projeto solar do concentrador híbrido dish foi efetivamente estabelecido mediante aplicação da metodologia de dimensionamento geométrico e térmico de sistemas Dish-Stirling estabelecidos por Castellanos et al. (2017) e Hafez et al. (2016). O projeto eólico do concentrado híbrido dish foi desenvolvido mediante aplicação da teoria da quantidade de movimento do elemento de pá (BEM) associada à metodologia de dimensionamento de ventiladores e a análise fluidodinâmica computacional (CFD).

A viabilidade do sistema híbrido foi analisada mediante estudo comparativo estabelecido entre a geração de energia elétrica anual do sistema híbrido proposto e a geração de energia elétrica anual de um sistema Dish-Stirling correspondente, ambos instalados numa mesma localidade brasileira.

Os resultados do estudo comparativo demonstram que o sistema híbrido apresenta pequeno incremento na geração de energia elétrica em relação ao sistema Dish-Stirling correspondente, corroborando a viabilidade técnica da hibridização proposta. As análises estabelecidas sob determinados parâmetros de projeto demonstram que a aplicação de estudos de otimização ao desenvolvimento do sistema proposto resultaria em ganhos significativos na geração de energia elétrica. Portanto, são identificados e analisados estes parâmetros que se constituem determinantes na ampliação da geração de energia elétrica do sistema proposto.

Palavras chaves: Energia renovável, Hibridização, Sistema Dish-Stirling, Turbina eólica.

SILVA, A. A. C. (2018) - SOLAR-WIND HYBRID SYSTEM DEVELOPED BY THE INTEGRATION OF THE BLADES INTO DISH-STIRLING SOLAR CONCENTRATOR.

ABSTRACT

The Dish-Stirling systems are commonly installed at open fields with high wind availability, so these solar energy conversion systems are often exposed at strong winds (Sun et al., 2014). The incident winds on solar dish concentrators at high speeds makes the energy conversion system be turn off in order to avoid damage to the solar concentrator (Sun et al., 2014). Therefore, wind availability establishes a limitation in the operating time of this solar energy conversion system. However, the main limitation of Dish-Stirling systems, intrinsic on all solar energy conversion systems, concerning at the operating time of these systems limited at the daytime, therefore there is no conversion of energy at night.

The presented proposal consists at the integration of the wind energy conversion in Dish-Stirling systems, creating a new concept of the hybrid system. The hybridization will allow the increase in the operating time of Dish-Stirling systems for the night time, allowing the electrical power generation during the twenty-four hours of the day.

The technical proposed of the dissertation consists in Dish-Stirling system hybridization based on development of a new concept of dish concentrator, the hybrid dish concentrator. The conception of the hybrid dish concentrator consists in a solar dish concentrator associated at wind blades turbines in the same structure, making the conversion of solar energy and the conversion of wind energy. Therefore, the hybrid dish concentrator design basically includes its solar project and its wind project.

The solar project of the hybrid dish concentrator was developed by applying the geometrical sizing and thermal design methodology of the Dish-Stirling systems proposed by Castellanos et al. (2017) and Hafez et al. (2016). The wind project of the hybrid dish concentrate was developed by applying the blade element momentum theory (BEM) combined by the fan sizing methodologies, and the computational fluid dynamics (CFD).

The technical feasibility of the hybrid system was analyzed through a comparative study between the annual electricity generation of its system and the annual electricity generation of the suchlike Dish-Stirling system, both installed in the same localization.

The results of the comparative study shown that the hybrid system presents a small increase at the annual electricity generation than the Dish-Stirling system, confirming the technical feasibility of the proposed hybridization. The analysis established by the design parameters shown that the optimization studies applied on the hybrid system would result in relevant increase of the electric power generation.

Keywords: Renewable Energy, Hybridization, Dish-Stirling System, Wind Turbine.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS	1
1.2. RELEVÂNCIA E JUSTIFICATIVAS	1
1.2.1. Os concentradores solares dish e os ventos	2
1.2.2. A hibridização do sistema Dish-Stirling.....	5
1.3. OBJETIVOS	5
1.4. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	6
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	7
2.1. A ENERGIA SOLAR.....	7
2.2. SISTEMAS DISH-STIRLING	9
2.2.1. Concentradores solares dish	11
2.2.2. Refletor	11
2.2.3. Receptor.....	12
2.2.4. Sistema de rastreamento solar	13
2.2.5. Estrutura e fundação	14
2.2.6. Motores Stirling	15
2.2.6.1. Motor Stirling alfa	16
2.2.6.2. Motor Stirling beta.....	17
2.2.6.3. Motor Stirling gamma.....	18
2.2.6.4. Motores Stirling aplicados aos sistemas Dish-Stirling.....	18
2.3. USINAS SOLARES DISH-STIRLING	20
2.4. A ENERGIA EÓLICA	21
2.5. TURBINAS EÓLICAS	22
2.5.1. Princípio de funcionamento das turbinas eólicas.....	23
2.5.2. Comportamento das turbinas eólicas	29
2.5.3. Turbinas eólicas de alta solidez	32
2.5.3.1. Turbina eólica de Charles Bush.....	32
2.6. SISTEMAS HÍBRIDOS DE CONVERSÃO DE ENERGIA RENOVÁVEL.....	33
2.6.1. Sistemas híbridos eólicos solares.....	34
2.6.1.1. O sistema híbrido eólico solar CSCWA	34
3. METODOLOGIA E FORMULAÇÃO MATEMÁTICA.....	36
3.1. INTRODUÇÃO	36
3.2. ESPECIFICAÇÃO GEOGRÁFICA DO SISTEMA HÍBRIDO	42
3.3. PROJETO SOLAR (SISTEMA HÍBRIDO E DISH-STIRLING CORRESPONDENTE) ..	53

3.4. PROJETO EÓLICO DO SISTEMA HÍBRIDO	68
3.5. DESENHO 3D DO CONCENTRADOR HÍBRIDO DISH E DOMÍNIOS.....	96
3.6. ANÁLISE CFD APLICADA AO PROJETO EÓLICO.....	97
4. RESULTADOS	102
4.1. ESPECIFICAÇÃO GEOGRÁFICA DO SISTEMA HÍBRIDO	102
4.2. PROJETO SOLAR (SISTEMA HÍBRIDO E DISH-STIRLING CORRESPONDENTE)	104
4.3. PROJETO EÓLICO DO SISTEMA HÍBRIDO	110
4.4. DESENHO 3D DO CONCENTRADOR HÍBRIDO DISH E DOMÍNIOS.....	118
4.5. ANÁLISE CFD APLICADA AO PROJETO EÓLICO.....	121
5. CONCLUSÃO.....	132
5.1. CONCLUSÕES E CONTRIBUIÇÕES.....	132
5.2. RECOMENDAÇÕES AOS ESTUDOS FUTUROS	133
6. REFERÊNCIAS	134
ANEXO A.....	139
ANEXO B.....	140
ANEXO C.....	141
ANEXO D.....	142
APÊNDICE A	143
APÊNDICE B.....	165
APÊNDICE C	166
APÊNDICE D	184
APÊNDICE E.....	200
APÊNDICE F.....	211
APÊNDICE G	212

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Direções e sentidos de incidência dos ventos em concentradores dish	3
Figura 1.2 - Concentrador dish em operação (esquerda) e na posição stow (direita).....	4
Figura 1.3 - Sistema Dish-Stirling modelo Sundish®	4
Figura 2.1 - Distribuição de radiação solar incidente na atmosfera terrestre	7
Figura 2.2 - Distribuição de irradiação normal direta média diária (DNI_D) na Terra.....	9
Figura 2.3 - Sistemas Dish-Stirling	9
Figura 2.4 - Principais componentes de sistemas Dish-Stirling	10
Figura 2.5 - Refletor de concentrador solar dish	12
Figura 2.6 - Receptor tubo de calor	13
Figura 2.7 - Sistema de rastreamento solar azimute-elevação.....	14
Figura 2.8 - Estrutura de sistema Dish-Stirling	14
Figura 2.9 - Diagrama PV e TS concernente ao ciclo Stirling	15
Figura 2.10 - Motor Stirling alfa	16
Figura 2.11 - Motor Stirling beta.....	17
Figura 2.12 - Motor Stirling gamma.....	18
Figura 2.13 - Conjunto motor Stirling de pistão livre e gerador elétrico	19
Figura 2.14 - Usina solar Dish-Stirling de Maricopa	20
Figura 2.15 - Distribuição de densidade de potência eólica na Terra.....	21
Figura 2.16 - Turbina eólica multipás (esquerda), três pás (centro) e Darrieus (direita)	22
Figura 2.17 - Turbinas eólicas verticais (esquerda) e horizontais (direita)	23
Figura 2.18 - Turbina eólica e fluxo de ar	24
Figura 2.19 - Linhas de corrente, tubo de corrente e disco atuador	25
Figura 2.20 - Trajetória de uma partícula do fluxo de ar através do tubo de corrente	25
Figura 2.21 - Distribuição de velocidades e pressão ao longo do tubo de corrente	26
Figura 2.22 - Relação entre as velocidades (U_∞), (U_D) e (U_W) no tubo de corrente.....	28
Figura 2.23 - Diagrama do coeficiente de potência (C_P) x velocidades na ponta da pá (λ) e as curvas características concernentes aos modelos de rotores eólicos	30
Figura 2.24 - Coeficiente de torque (C_T) x razão de velocidades na ponta da pá (λ)	31
Figura 2.25 - Turbina eólica de Charles Bush	33
Figura 2.26 - Sistema híbrido CSCWA (esquerda) e seu desenho esquemático (direita).....	35
Figura 2.27 - Análise fluidodinâmica computacional (CFD) do concentrador funil.....	35
Figura 3.1- Modelo conceitual do concentrador híbrido dish	36

Figura 3.2 - Refletores e rotor eólico constituintes do concentrador híbrido dish	37
Figura 3.3 - Modelo conceitual do sistema híbrido proposto	37
Figura 3.4 - Modelo conceitual do conjunto estrutural / rastreamento.....	38
Figura 3.5 - Modelo conceitual do conjunto geração de energia elétrica.....	39
Figura 3.6 - Vista explodida do modelo conceitual do conjunto geração de energia elétrica..	39
Figura 3.7 - Subconjunto sob rotação durante a conversão de energia eólica.....	40
Figura 3.8 - Subconjunto estático durante a conversão de energia eólica.....	40
Figura 3.9 - Sistema híbrido (direita) e sistema Dish-Stirling correspondente	42
Figura 3.10 - Atlas solar brasileiro - Irradiação normal direta média diária (DNI_D).....	43
Figura 3.11 - Insolação diária média anual	45
Figura 3.12 - Diagrama de distribuição da irradiância solar média horária (I_H) em Aracati....	46
Figura 3.13 - Atlas eólico brasileiro – Velocidade dos ventos (U_∞)	49
Figura 3.14 - Diagrama frequência de velocidades médias dos ventos (U_{∞_M}) à 50 m (H_R)....	51
Figura 3.15 - Diagrama frequência de velocidades médias dos ventos (U_{∞_M}) à 100 m (H_R)..	51
Figura 3.16 - Diagrama frequência de velocidades médias dos ventos (U_{∞_M}) à 200 m (H_R)..	51
Figura 3.17 - Diâmetro (D_C), ângulos de curvatura (φ_C) e ponto focal do concentrador	55
Figura 3.18 - Diâmetro do receptor (D_R), distância focal (f) e erro na incidência solar (θ_I)	55
Figura 3.19 - Diagrama razão de concentração geométrica (C_G) x temperatura no receptor (T_R)	58
Figura 3.20 - Fluxograma do programa computacional aplicado ao projeto solar (parte 1)	66
Figura 3.21 - Fluxograma do programa computacional aplicado ao projeto solar (parte 2)	67
Figura 3.22 - Diagrama do coeficiente de potência (C_P) x razão de velocidades na ponta da pá (λ) e as curvas estabelecidas sob número de pás do rotor	74
Figura 3.23- Diagrama do coeficiente de potência (C_P) x razão de velocidades na ponta da pá (λ) e as curvas estabelecidas sob relações de coeficientes de sustentação e arrasto (C_L/C_D) ...	74
Figura 3.24 - Diagrama aplicado ao dimensionamento de rotores de bombas e ventiladores .	81
Figura 3.25 - Diagrama de Cordier.....	82
Figura 3.26 - Turbina eólica, pá, elemento de pá e velocidade tangencial, axial e angular	83
Figura 3.27 - Triângulo de velocidades associado ao elemento de pá	85
Figura 3.28 - Diagrama de solidez (σ_S) e razão de velocidades na ponta da pá (λ).....	87
Figura 3.29 - Refletor do concentrador híbrido (esquerda) e círculo correspondente (direita)	89
Figura 3.30 - Análise concernente a correspondência entre áreas.....	89
Figura 3.31 - Fluxograma do programa computacional aplicado ao projeto eólico (parte 1) ..	91
Figura 3.32 - Fluxograma do programa computacional aplicado ao projeto eólico (parte 2) ..	92
Figura 3.33 - Fluxograma do programa computacional aplicado ao projeto eólico (parte 3) ..	93

Figura 3.34 - Fluxograma do programa computacional aplicado ao projeto eólico (parte 4) ..	94
Figura 3.35 - Fluxograma do programa computacional aplicado ao projeto eólico (parte 5) ..	95
Figura 4.1 - Curva de coeficiente de potência máximo teórico do concentrador híbrido (C_{PMTC})	112
Figura 4.2 - Ponto de projeto do concentrador híbrido no diagrama de dimensionamento de rotores de ventiladores.....	114
Figura 4.3 - Ponto de projeto do concentrador híbrido no diagrama de Cordier.....	115
Figura 4.4 - Ponto de projeto do concentrador híbrido no diagrama de solidez (σ_S) \times razão de velocidades na ponta da pá (λ).....	117
Figura 4.5 - Desenho 2D do perfil NACA4415	118
Figura 4.6 - Vista isométrica (esquerda), frontal e lateral (direita) do concentrador híbrido.	118
Figura 4.7 - Concentrador híbrido e concentrador híbrido periódico (esquerda superior), vista isométrica (direita superior) e detalhe (inferior) do concentrador híbrido periódico	119
Figura 4.8 - Elemento periódico (inferior), domínio rotativo periódico integrado ao concentrador híbrido periódico (esquerda superior) e concentrador híbrido periódico (direita superior).....	120
Figura 4.9 - Elemento periódico, domínio geral periódico e domínio rotativo periódico	121
Figura 4.10 - Malha do elemento periódico (superior), detalhe da malha do domínio geral periódico (inferior esquerdo) e malha do domínio rotativo periódico (direita inferior).....	122
Figura 4.11 - Detalhe da malha (wireframe) concernente ao domínio rotativo	123
Figura 4.12 - Escala analítica da torção dos elementos de malha	123
Figura 4.13 - Escala analítica da qualidade ortogonal dos elementos de malha	125
Figura 4.14 - Superfícies de entrada, saída e fronteira do elemento periódico	126
Figura 4.15 - Diagrama resíduos \times número de iterações concernente a simulação CFD do concentrador híbrido.....	127
Figura 4.16 - Distribuição de pressão no concentrador híbrido sob vistas frontal e lateral ...	128

LISTA DE TABELA

Tabela 2.1 - Coeficientes de potência máximos (C_{PM}) intrínsecos aos modelos de rotores.....	31
Tabela 3.1 - Irradiância solar média horária restrita ao período de insolação (I_{HIS}) em Aracati ..	47
Tabela 3.2 - Fatores, constantes e coeficientes aplicados ao projeto solar.....	54
Tabela 3.3 - Erros intrínsecos aos sistemas Dish-Stirling	56
Tabela 3.4 - Parâmetros aplicados na determinação da transmitância (τ).....	63
Tabela 3.5 - Validação do programa desenvolvido em Maple® aplicado ao projeto solar	65
Tabela 3.6 - Constantes físicas aplicadas ao projeto eólico do concentrador híbrido dish	68
Tabela 3.7 - Número de pás ($N_{PÁ}$) e a respectiva razão de velocidades na ponta da pá (λ)	72
Tabela 4.1 - Resultados de irradiação e irradiância em Aracati	102
Tabela 4.2 - Resultados concernentes ao fator de correlação da lei da potência (α_p)	103
Tabela 4.3 - Resultados concernentes a velocidade dos ventos (U_∞) à altura de 8 metros	103
Tabela 4.4 - Dimensionamento do sistema híbrido no ponto de projeto.....	104
Tabela 4.5 - Dimensionamento do sistema híbrido no ponto de funcionamento	105
Tabela 4.6 - Fatores de capacidade e energia elétrica anual gerada mediante conversão de energia solar no sistema híbrido	105
Tabela 4.7 - Dimensionamento do sistema Dish-Stirling correspondente no ponto de projeto.	106
Tabela 4.8 - Dimensionamento do sistema Dish-Stirling correspondente no ponto de funcionamento	106
Tabela 4.9 - Fatores de capacidade e energia elétrica anual gerada pelo sistema Dish-Stirling correspondente.....	107
Tabela 4.10 - Relação e variação percentual entre os resultados concernentes ao sistema híbrido e Dish-Stirling correspondente em seus pontos de projeto e ponto de funcionamento.....	108
Tabela 4.11 - Relação entre os resultados concernentes ao sistema híbrido e Dish-Stirling correspondente em seus pontos de projeto e ponto de funcionamento.....	110
Tabela 4.12 - Resultado de velocidade angular e número de Reynolds	110
Tabela 4.13 - Ângulos de ataque (α), coeficientes de sustentação (C_L), coeficientes de arrasto (C_D) e relação entre coeficientes de sustentação e arrasto (C_L/C_D)	111
Tabela 4.14 - Ângulo de ataque (α), coeficiente de sustentação (C_L), coeficiente de arrasto (C_D) e relação entre estes coeficientes (C_L/C_D) aplicados ao projeto eólico	112
Tabela 4.15 - Coeficiente de potência máximo teórico do concentrador híbrido (C_{PMTC})	112
Tabela 4.16- Resultado das raízes alusivas ao fator de indução axial (a)	113
Tabela 4.17 - Velocidade do vento no concentrador híbrido dish (U_D)	113

Tabela 4.18 - Resultados das grandezas de funcionamento e adimensionais do concentrador híbrido.....	113
Tabela 4.19 - Resultados intrínsecos aos elementos de pá aplicados ao projeto eólico	116
Tabela 4.20 - Número de elementos de pá (b_s) e solidez do concentrador híbrido (σ_{SCH}).....	116
Tabela 4.21 - Especificações quantitativas concernentes aos elementos e nós das malhas ...	123
Tabela 4.22 - Torção (Skewness) dos elementos de malha.....	124
Tabela 4.23 - Qualidade ortogonal (orthogonal quality) dos elementos de malha.....	124
Tabela 4.24 - Parâmetros de discretização espacial aplicados ao CFD do concentrador híbrido.	126
Tabela 4.25 - Fatores de relaxamento aplicados ao CFD do concentrador híbrido.....	127
Tabela 4.26 - Torque, potências, grandeza adimensional e energia gerada concernente ao concentrador híbrido.....	129
Tabela 4.27 - Resultados de geração de energia dos sistemas híbrido e Dish-Stirling correspondente.....	131

LISTA DE SÍMBOLOS

a	Fator de indução axial	
a'	Fator de indução tangencial	
a_1	Raiz concernente ao fator de indução axial	
a_2	Raiz concernente ao fator de indução axial	
a_3	Raiz concernente ao fator de indução axial	
A_C	Área de abertura do concentrador dish	[m ²]
A_{CH}	Área de abertura do concentrador híbrido dish	[m ²]
A_{CS}	Área de abertura do concentrador solar dish	[m ²]
A_{PL}	Área projetada relativa às lacunas do concentrador híbrido dish	[m ²]
A_R	Área do receptor	[m ²]
A_V	Área “varrida” pelo rotor eólico	[m ²]
b_P	Número de elementos de pá aplicado ao projeto das pás	
b_S	Número de elementos de pá aplicado ao cálculo da solidez	
B	Limite de Betz	
c	Corde do perfil aerodinâmico	[m]
c_1	Constante real	
c_2	Constante real	
c_r	Corde do perfil aerodinâmico concernente ao elemento de pá	[m]
C_D	Coefficiente de arrasto	
C_G	Razão de concentração geométrica	
C_{GT}	Razão de concentração geométrica teórica	
C_L	Coefficiente de sustentação	
C_M	Coefficiente de momento	
C_P	Coefficiente de potência	
C_{PC}	Coefficiente de potência do concentrador híbrido dish	
C_{PM}	Coefficiente de potência máximo	
C_{PMT}	Coefficiente de potência máximo teórico	
C_{PMTC}	Coefficiente de potência máximo teórico do concentrador híbrido dish	
C_{PT}	Coefficiente de potência teórico	
C_T	Coefficiente de torque	
C_V	Calor específico a volume constante	[J/kg.K]

D_C	Diâmetro do concentrador dish	[m]
D_{CAV}	Diâmetro da cavidade do receptor	[m]
D_e	Diâmetro externo das pás do concentrador híbrido	[m]
D_i	Diâmetro interno das pás do concentrador híbrido	[m]
D_{ic}	Diâmetro interno das pás do concentrador híbrido corrigido pela vazão	[m]
D_R	Diâmetro do receptor	[m]
DNI	Irradiação normal direta	[kWh/m ²]
DNI_D	Irradiação normal direta média diária	[kWh/m ² dia]
DNI_{DIS}	Irradiação normal direta média diária inerente ao período de insolação	[kWh/m ² dia]
E	Energia	[J]
E_{AGS}	Energia elétrica anual gerada pela conversão de energia solar	[kWh]
E_{AGST}	Energia elétrica anual gerada teórica pela conversão de energia solar	[kWh]
E_{AGE}	Energia elétrica anual gerada pela conversão de energia eólica	[kWh]
E_D	Energia cinética do ar no disco atuador	[J]
E_W	Energia cinética do ar a jusante do disco atuador	[J]
E_{∞}	Energia cinética do ar a montante do disco atuador	[J]
f	Distância focal	[m]
F	Fator de inclinação do receptor	
F_C	Fator de capacidade	
F_{CE}	Fator de capacidade eólico	
F_{CS}	Fator de capacidade solar	
F_{CSP}	Fator de capacidade solar de projeto	
F_{CSMAT}	Fator de capacidade solar médio anual teórico	
F_{CSMAS}	Fator de capacidade solar médio anual SAM	
F_D	Fator de deterioração	
F_E	Fator de estrangulamento	
F_R	Fator de resfriamento	
F_S	Fator de sombreamento	
g	Aceleração da gravidade	[m/s ²]
Gr	Número de Grashof	
h	Altura da lacuna do concentrador híbrido dish	[m]
h_F	Coefficiente de convecção forçada	[W/m ² K]
h_G	Coefficiente de convecção global	[W/m ² K]

h_N	Coeficiente de convecção natural	[W/m ² K]
H	Altura de energia	[m]
H_R	Altura em relação à referência	[m]
H_Z	Altura em relação à cota “z”	[m]
i	Energia interna	[J]
I	Irradiância solar	[kW/m ²]
I_D	Irradiância solar média diária	[kW/m ²]
I_H	Irradiância solar média horária	[kW/m ²]
I_{HIS}	Irradiância solar média horária restrita ao período de insolação	[kW/m ²]
I_P	Irradiância solar de projeto	[kW/m ²]
l	Largura intrínseca a lacuna do concentrador híbrido dish	[m]
m_{AR}	Massa de ar	[Kg]
n	Velocidade angular do rotor	[rps]
n_{qA}	Rotação específica	
$N_{PÁ}$	Número de pás do rotor	
$N_{PÁ_P}$	Número de pás de projeto do rotor	
N_{PER}	Número de elementos periódicos aplicados a simulação CFD	
N_{LAC}	Número de lacunas do concentrador híbrido dish	
Nu	Número de Nusselt	
K_{AR}	Condutividade térmica do ar	[W/mK]
K_{ATT}	Constante de atenuação	
K_S	Constante Stirling	
p	Pressão	[Pa]
p'	Pressão flutuante	[Pa]
p_M	Pressão média	[Pa]
P	Pressão	[Pa]
P_D^+	Pressão no disco atuador	[Pa]
P_D^-	Pressão no disco atuador	[Pa]
P_E	Potência de eixo	[kW]
P_{EC}	Potência de eixo desenvolvida pelo concentrador híbrido dish	[kW]
P_{ED}	Potência eólica disponível	[kW]
P_{ELE}	Potência elétrica líquida gerada pela conversão de energia eólica	[kW]
P_{ELS}	Potência elétrica líquida gerada pela conversão de energia solar	[kW]

P_{SD}	Potência solar disponível	[kW]
P_{∞}	Pressão a montante e a jusante do disco atuador	[Pa]
Q	Vazão de ar que atravessa o concentrador híbrido dish	[m ³ /s]
r	Raio do rotor eólico elemento de pá	[m]
R	Raio do rotor eólico	[m]
R_{GP}	Constante universal dos gases perfeitos	[J/kg.K]
Re	Número de Reynolds	
S	Entropia	[J/K]
t	Tempo	[s]
T	Temperatura	[K]
T_A	Temperatura ambiente	[K]
T_C	Torque desenvolvido pelo concentrador híbrido dish	[N m]
T_{DS}	Período de irradiância solar média diária	[h/dia]
T_{DE}	Período de trabalho diário do sistema de conversão de energia eólica	[h/dia]
T_{DIR}	Período de irradiação solar médio diário	[h/dia]
T_{DIS}	Período de insolação médio diário	[h/dia]
T_E	Período anual de geração de energia elétrica proveniente da conversão de energia eólica	[h]
T_{EI}	Torque de eixo	[N m]
T_{EP}	Torque desenvolvido pelo elemento periódico	[N m]
T_F	Temperatura de filme	[K]
$T_{MÁX}$	Temperatura máxima	[K]
T_{MIN}	Temperatura mínima	[K]
T_R	Temperatura do receptor	[K]
T_S	Período anual de geração de energia elétrica proveniente da conversão de energia solar	[h]
T_T	Torque teórico	[N m]
u	Componente de velocidade	[m/s]
u_*	Velocidade de fricção	[m/s]
u'	Componente flutuante de velocidade	[m/s]
u_e	Velocidade do fluxo de ar externo à camada limite	[m/s]
u_M	Componente médio de velocidade	[m/s]
u^+	x plus	

U_{∞}	Velocidade da corrente livre, velocidade do vento, velocidade do ar a montante do disco atuador	[m/s]
U_D	Velocidade do ar no disco atuador	[m/s]
$U_{M\infty}$	Velocidade média anual dos ventos	[m/s]
U_R	Velocidade do ar à altura de referência	[m/s]
U_T	Velocidade tangencial	[m/s]
U_W	Velocidade do ar a jusante do disco atuador	[m/s]
U_Z	Velocidade do ar à altura de z	[m/s]
v	Componente de velocidade	[m/s]
v'	Componente flutuante de velocidade	[m/s]
v_M	Componente médio de velocidade	[m/s]
V	Volume	[m ³]
w	Componente de velocidade	[m/s]
w'	Componente flutuante de velocidade	[m/s]
w_M	Componente médio de velocidade	[m/s]
x	Coordenada relativa ao eixo x	
y	Coordenada relativa ao eixo y	
y^+	y plus	
Y	Energia específica	[J/Kg]
z	Coordenada relativa ao eixo z	

LETRAS GREGAS

α	Ângulo de ataque	[°]
α_{abs}	Absortância	
α_P	Fator de correlação da lei de potência	
α_τ	Coefficiente de concentração	
β	Ângulo de passo	[°]
β_{AR}	Coefficiente de expansão volumétrico do ar	[1/K]
β_r	Ângulo de passo no elemento de pá	[°]
β_τ	Coefficiente de turbidez	[1/kg]
Γ	Fator de interceptação	
δ	Altura da camada limite turbulenta	[m]
δ_D	Coefficiente de diâmetro	
δ_R	Reflexibilidade	
ε	Emissividade	
η_C	Rendimento do concentrador solar	
η_G	Rendimento global	
η_{GE}	Rendimento do gerador elétrico	
η_R	Rendimento do receptor	
η_S	Rendimento do motor Stirling	
θ_I	Erro na incidência solar	[mrad]
λ	Razão de velocidades na ponta da pá	
λ_r	Razão de velocidades no elemento de pá	
λ_τ	Coefficiente de dispersão	
μ	Viscosidade absoluta ou dinâmica	[Pa s]
μ_{AR}	Viscosidade absoluta ou dinâmica do ar	[Pa s]
μ_r	Posição radial adimensional relativa ao elemento de pá	
ν_{AR}	Viscosidade cinemática do ar	[m ² /s]
ρ	Massa específica	[kg/m ³]
ρ_{AR}	Massa específica do ar	[kg/m ³]
σ_{AR}	Erro intrínseco ao alinhamento do receptor	[mrad]
σ_B	Constante de Stefan-Boltzmann	[W/m ² K ⁴]
σ_E	Erro intrínseco à estrutura	[mrad]

σ_L	Coeficiente de ligeireza	
σ_{MR}	Erro intrínseco aos motores de rastreamento	[mrad]
σ_{RE}	Erro intrínseco à reflexão do espelho	[mrad]
σ_S	Solidez do rotor eólico	
σ_{SCh}	Solidez do concentrador híbrido dish	
σ_{SCr}	Solidez da corda no elemento de pá	
σ_{SCrCh}	Solidez da corda do concentrador híbrido dish	
σ_{SmCrCh}	Solidez média da corda do concentrador híbrido dish	
σ_{SR}	Erro intrínseco ao sensor de rastreamento	[mrad]
σ_{Sol}	Erro intrínseco à dimensão do Sol	[mrad]
τ	Transmitância	
τ_{ij}	Tensão viscosa	
φ	Propriedade física	
φ_C	Ângulo de curvatura do concentrador dish	[rad]
φ_S	Ângulo de sombreamento	[rad]
ϕ	Ângulo de fluxo	[°]
ϕ_r	Ângulo de fluxo intrínseco ao elemento de pá	[°]
ψ	Coeficiente de pressão	
ψ_R	Ângulo do receptor	[rad]
Ω	Velocidade angular do rotor	[rad/s]

LISTA DE ABREVIATURAS

<i>BEM</i>	Blade element momentum
<i>CAD</i>	Computer Aided Design
<i>CFD</i>	Computational fluid dynamics
<i>CSCWA</i>	Combined Solar Concentration / Wind Augmentation
<i>DNI</i>	Direct normal irradiance
<i>SAIC</i>	Science Applications International Corporation
<i>NACA</i>	National Advisory Committee for Aeronautics
<i>SAM</i>	System Advisor Model
<i>SES</i>	Stirling Energy Systems
<i>UNIFEI</i>	Universidade Federal de Itajubá
<i>TDMA</i>	Tri-diagonal matrix algorithm

1. INTRODUÇÃO

1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A motivação desta dissertação foi fundamentada essencialmente em duas limitações operacionais observadas inicialmente no sistema de conversão de energia solar Dish-Stirling do laboratório de energia heliotérmica da Universidade Federal de Itajubá. A primeira limitação operacional observada é intrínseca aos sistemas de conversão de energia que aplicam concentradores solares. A segunda limitação operacional observada abrange todos os sistemas de conversão de energia solar.

A primeira limitação operacional apresenta-se justamente na incidência de ventos no concentrador solar dish a elevadas velocidades, as quais determinam que o sistema Dish-Stirling seja desativado, a fim de garantir sua integridade estrutural. Conclusivamente, a disponibilidade eólica estabelece a limitação operacional, apresentando-se num fator de significativa relevância ao período de operação deste sistema de conversão de energia solar.

A segunda limitação operacional é fundamentada no período diário de operação intrínseco aos sistemas de conversão de energia solar, que impreterivelmente, é limitado ao seu período diurno. Conseqüentemente, a segunda limitação operacional determina a ausência de conversão de energia em sistemas Dish-Stirling no período noturno.

A proposta técnica apresentada nesta dissertação consiste na aplicação da energia eólica, a qual estabelece a primeira limitação operacional, na geração de energia elétrica em sistemas Dish-Stirling. Esta premissa estabelece a hibridização, adicionando 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 do dia.

1.2. RELEVÂNCIA E JUSTIFICATIVAS

A primeira limitação operacional estabeleceu invariavelmente uma relação entre os concentradores solares dish e o vento, fomentando a realização de uma pesquisa sobre este tema. As informações obtidas nesta pesquisa, descritas no tópico 1.2.1, evidenciaram uma relação abrangente entre os concentradores solares dish e os ventos, no que tange os aspectos operacionais relativos aos sistemas Dish-Stirling. Conclusivamente, os dados obtidos nesta pesquisa evidenciaram a relevância do tema abordado nesta dissertação.

A proposta técnica de hibridização dos sistemas Dish-Stirling foi fundamentada na relação entre os concentradores solares dish e os ventos. Esta proposta de hibridização consiste essencialmente na integração da conversão de energia eólica ao sistema Dish-Stirling através do desenvolvimento do concentrador híbrido dish.

A proposta de hibridização fomentou a realização de pesquisas sobre projetos estabelecidos sob a premissa de integração de conversão de energia eólica ao sistema de conversão de energia solar através do desenvolvimento de um novo conceito de concentrador. As informações obtidas nesta pesquisa evidenciaram um projeto de 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 relevância da proposta técnica referente à hibridização de sistemas Dish-Stirling é demonstrada no tópico 1.2.2 mediante análise estabelecida entre suas limitações operacionais e resultados apresentados pelo projeto híbrido identificado na pesquisa. Concomitantemente neste tópico, a proposta de hibridização do sistema Dish-Stirling é comparada as características construtivas do sistema desenvolvido por Su et al. (2011) e Tao et al. (2011).

1.2.1. Os concentradores solares dish e os ventos

A incidência de ventos em concentradores solares dish é uma temática amplamente estudada, visto que influencia na eficiência de conversão de energia e estabelece as cargas aplicadas na estrutura do sistema Dish-Stirling (Paetzold et al., 2014).

A influência dos ventos na eficiência de sistemas Dish-Stirling é comprovada através dos estudos desenvolvidos por Reddy et al. (2016), Castellanos et al. (2017), Paetzold et al. (2014) e Sun et al. (2014).

O estudo desenvolvido por Reddy et al. (2016) relaciona a influência da velocidade, direção e sentido dos ventos incidentes em concentradores solares dish com as perdas de calor por convecção no receptor. O modelo matemático aplicado na análise de eficiência de conversão de energia de sistemas Dish-Stirling desenvolvido por Castellanos et al. (2017) evidencia a relevância das perdas por convecção oriundas da incidência de ventos no receptor.

O estudo desenvolvido por Paetzold et al. (2014) estabelece pesquisas relativas ao perfil de concentradores solares a fim de minimizar a influência dos ventos nas perdas de calor por convecção na tubulação do receptor. Este estudo relaciona os resultados de eficiência de conversão de energia e os efeitos estruturais resultantes da modificação do perfil parabólico.

O estudo desenvolvido por Sun et al. (2014) demonstra que 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. Por meio destes mesmos estudos, Sun et al. (2014) comprova que estas cargas aplicadas na estrutura de sistemas Dish-Stirling oriundas dos ventos devem ser estimadas mediante estudo da distribuição de pressão na superfície dos concentradores solares dish. Portanto, conforme Hafez et al. (2016), uma característica fundamental dos projetos de concentradores solares dish consiste na sua resistência a cargas oriundas da incidência de ventos. Reddy et al. (2016) demonstrou, através da figura 1.1, as posições do concentrador solar dish durante sua operação, as direções e sentidos dos ventos incidentes a cada posição.

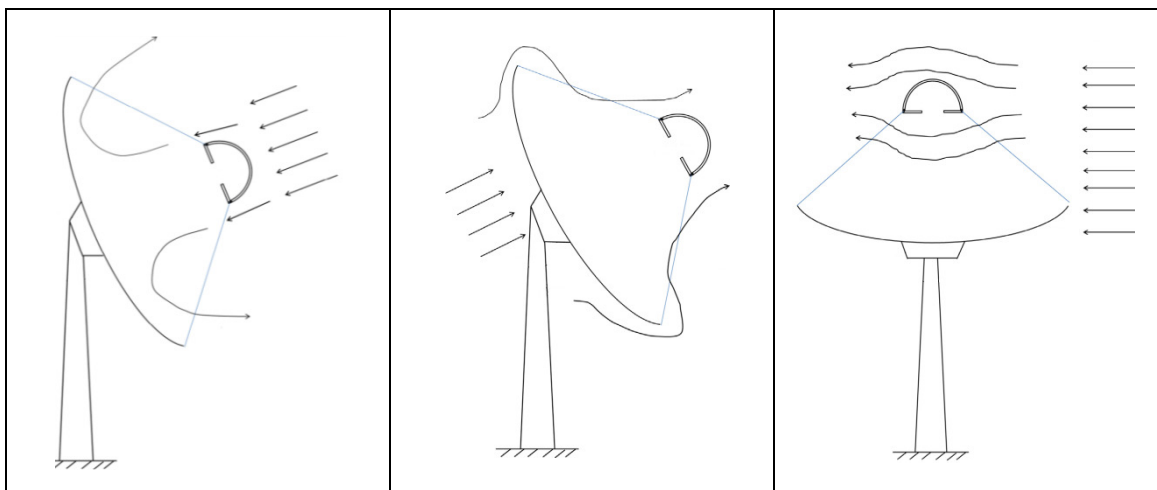


Figura 1.1 - Direções e sentidos de incidência dos ventos em concentradores dish
Fonte: Adaptado de Reddy et al. (2016)

Segundo Sun et al. (2014), a velocidade crítica consiste no valor máximo relativo a velocidade do vento incidente no concentrador solar dish o qual não acarreta dano ao mesmo. Os concentradores solares dish durante, sua operação, assumindo qualquer posição definida pelo sistema de rastreamento solar, podem ser expostos a ventos de até 16m/s sem que haja danos ao mesmo (Sun et al., 2014). Em suma, a velocidade crítica do vento durante a operação do concentrador solar dish é de 16 m/s (Sun et al., 2014). Portanto, a ocorrência de ventos a velocidades superiores a 16 m/s durante a operação de sistemas Dish-Stirling torna imperativo que mesmo interrompa seu funcionamento assumindo a posição “*stow*”, conforme mostrado na figura 1.2 (direita).

Na posição “*stow*”, o concentrador solar dish é posicionado com a sua face para baixo (Coventry e Andraka, 2017). Esta posição é aplicada na manutenção do sistema de conversão,

limpeza dos refletores, proteção contra granizo e ventos (Coventry e Andraka, 2017). Na posição stow o concentrador solar dish apresenta maior resistência aos ventos incidentes, porém não há conversão de energia (Coventry e Andraka, 2017). Conforme Sun et al. (2014), os concentradores solares dish na posição stow podem ser expostos a velocidade máxima de 44 m/s sem que haja danos ao mesmo.



Figura 1.2 - Concentrador dish em operação (esquerda) e na posição stow (direita)
Fonte: Adaptado de Innova (2017)

Desenvolvimentos de novos conceitos resultaram em importantes contribuições para a minimização das cargas dos ventos em concentradores solares. Conforme Coventry e Andraka (2017), entre os anos de 1997 e 1999 a empresa SAIC desenvolveu e produziu o protótipo do sistema Dish-Stirling modelo Sundish[®], o qual é apresentado na figura 1.3.

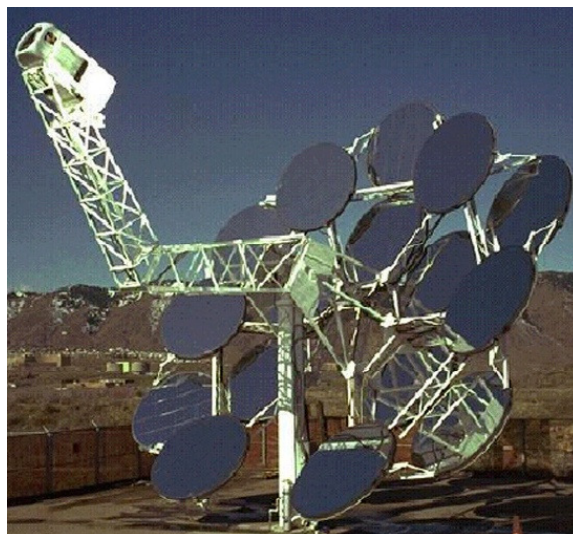


Figura 1.3 - Sistema Dish-Stirling modelo Sundish[®]
Fonte: Coventry e Andraka (2017)

O singular concentrador característico do sistema Dish-Stirling modelo Sundish[®] é constituído essencialmente por 16 refletores dispostos em posições escalonadas de modo a reduzir as cargas oriundas dos ventos (Coventry e Andraka, 2017).

1.2.2. A hibridização do sistema Dish-Stirling

A proposta técnica de hibridização determina a ampliação no período de geração de energia elétrica de sistemas Dish-Stirling mediante inclusão de conversão de energia eólica no período noturno e, conseqüentemente, a produção de energia elétrica durante todo o dia. Portanto, esta proposta técnica soluciona efetivamente a segunda limitação observada em sistemas Dish-Stirling. Conforme Kalogirou (2009) e Palenzuela et al. (2015), os sistemas Dish-Stirling comumente não apresentam capacidade de armazenamento térmico, portanto ao constituírem sistemas híbridos, proporcionam conversão de energia elétrica durante os períodos sem radiação solar.

Os estudos desenvolvidos por Su et al. (2011) e Tao et al. (2011) 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. A singular geometria desenvolvida ao concentrador solar funil possibilitou a associação deste a uma turbina eólica Rutland 503, originando o sistema híbrido eólico solar.

Os resultados obtidos pelos estudos de Su et al. (2011) e Tao et al. (2011) ratificam a viabilidade econômica do desenvolvimento de sistemas híbridos eólicos solares pela integração de concentradores solares a turbinas eólicas. A hibridização desenvolvida por Su et al. (2011) e Tao et al. (2011), aplicada em determinadas condições climáticas, proporcionaram aumento de 50% na capacidade de geração de energia elétrica quando comparado unicamente ao seu sistema de conversão de energia solar.

Os aspectos construtivos e a metodologia aplicada ao projeto do sistema híbrido desenvolvido por Su et al. (2011) e Tao et al. (2011) serão detalhadas no tópico 2.6.1.1.

1.3.OBJETIVOS

O objetivo primordial desta dissertação consiste na definição de um novo conceito de sistema híbrido, fundamentado na integração de conversão de energia eólica ao sistema Dish-Stirling, estabelecendo um sistema tecnicamente viável sob a premissa de apresentar maior capacidade de geração de energia elétrica que seu sistema Dish-Stirling correspondente.

Os objetivos complementares são apresentados nos seguintes tópicos:

- Desenvolvimento do projeto conceitual do sistema híbrido e concentrador híbrido dish;
- Dimensionamento geométrico e térmico do sistema híbrido e Dish-Stirling correspondente;
- Projeto das pás eólicas constituintes do concentrador híbrido dish;
- Análise fluidodinâmica computacional desenvolvida sob o concentrador híbrido dish;
- Determinação da energia elétrica anual gerada pelo sistema híbrido e Dish-Stirling correspondente;
- Análise de viabilidade técnica estabelecida sob o estudo comparativo entre a geração anual de energia elétrica do sistema híbrido e Dish-Stirling correspondente.

1.4. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A dissertação foi estruturada fundamentalmente sob cinco capítulos compreendidos pela introdução, revisão bibliográfica, metodologias e as formulações matemáticas, resultados e conclusões. Os conteúdos apresentados nos capítulos serão discriminados neste tópico.

O capítulo 1, a introdução, apresenta considerações iniciais concernentes à temática elementar ao desenvolvimento da dissertação. As relevâncias e justificativas referentes à temática e a proposta são fundamentadas neste tópico. Subseqüentemente, os objetivos desta dissertação são apresentados seguidos pela presente estrutura da dissertação.

O Capítulo 2 apresenta a revisão bibliográfica fundamental ao desenvolvimento da dissertação. Este capítulo é estruturado sob tópicos compreendidos pelas temáticas de sistemas Dish-Stirling, turbinas eólicas e sistemas híbridos de energia renovável.

O Capítulo 3 apresenta as metodologias e formulações matemáticas aplicadas ao desenvolvimento da dissertação. Este capítulo é estruturado sob tópicos, elucidando o método e equações aplicadas na definição da localização geográfica de instalação do sistema híbrido, o projeto solar do sistema híbrido, o projeto eólico do sistema híbrido, os softwares e métodos aplicados ao desenvolvimento dos desenhos 3D e a análise fluidodinâmica computacional desenvolvida sob o projeto eólico do sistema híbrido.

O Capítulo 4 apresenta essencialmente os resultados estabelecidos pela aplicação das metodologias detalhadas no capítulo 3, associada a análise de dados.

O capítulo 5 apresenta as conclusões estabelecidas pela análise dos resultados evidenciados no capítulo 4, as contribuições estabelecidas pelo desenvolvimento do sistema híbrido e as recomendações aos estudos futuros fundamentados nesta dissertação.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. A ENERGIA SOLAR

A energia solar é gerada a partir da fusão nuclear de átomos de hidrogênio (H) em hélio (He) realizada continuamente no Sol (Tong, 2010). A fusão nuclear é um processo exotérmico, portanto libera energia na forma de calor e radiação eletromagnética, a qual comumente é denominada radiação solar (Tong, 2010). A Terra recebe apenas uma pequena parcela relativa ao montante total de radiação solar, porém é suficiente para suportar toda vida terrestre e atender plenamente as necessidades energéticas da civilização moderna. (Kalogirou, 2009; Tong, 2010).

A energia solar anual fornecida à atmosfera terrestre corresponde aproximadamente a um montante de $3,8 \times 10^{23}$ J (Blakers, 2015). Esta energia disponível na atmosfera terrestre representa cinquenta mil vezes o consumo anual mundial de eletricidade (Blakers, 2015).

A radiação solar incidente na atmosfera terrestre disponibiliza 50% de seu montante total à superfície terrestre, conforme distribuição de radiação apresentada na figura 2.1 (Pereira et al. 2017).

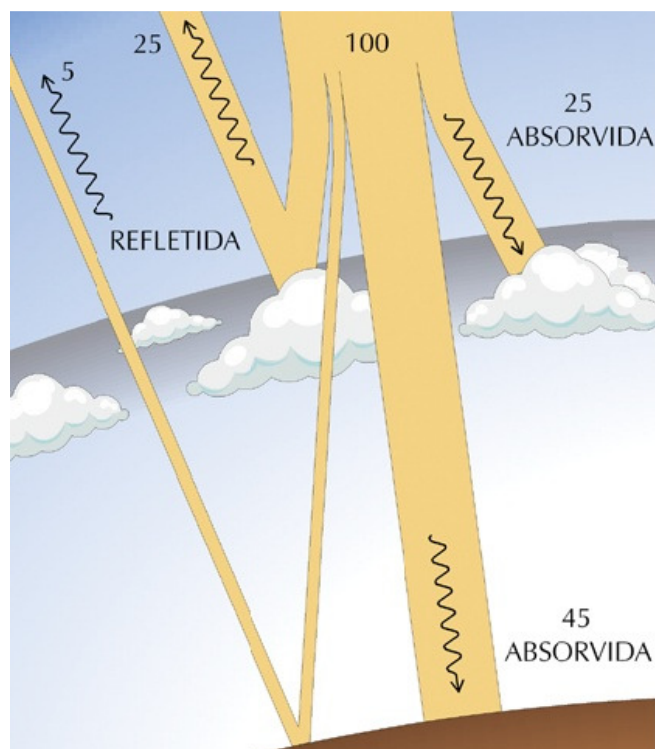


Figura 2.1 - Distribuição de radiação solar incidente na atmosfera terrestre
Fonte: Adaptado de Pereira et al. (2017)

A irradiância solar (I) consiste na potência desenvolvida pela radiação solar em uma determinada área, portanto no sistema internacional de unidades (SI), é estabelecida em Watt por metro quadrado (W/m^2) (Pereira et al. 2017).

O Sol disponibiliza a irradiância média de $1,3 \text{ kW/m}^2$ na atmosfera terrestre (Blakers, 2015). Na superfície terrestre, em dia ensolarado ao meio-dia, a irradiância solar média é aproximadamente 1 kW/m^2 (Blakers, 2015).

A irradiância solar global é constituída por duas componentes, a direta e a difusa (Blakers, 2015). A componente direta, denominada irradiância solar direta, consiste na parcela livre dos processos radiativos de absorção e espalhamento na atmosfera (Pereira et al. 2017). A componente difusa, denominada irradiância solar difusa, consiste na parcela decorrente dos processos de espalhamento gerado pelos gases e particulados presentes na atmosfera (Pereira et al. 2017).

A irradiação solar consiste na integral da irradiância no tempo, sendo comumente definida como a energia radiante acumulada em um intervalo de tempo (Pereira et al. 2017). A irradiação solar no sistema internacional de unidades (SI) é estabelecida em watt-hora por metro quadrado (Wh/m^2) (Pereira et al. 2017).

A irradiação solar global é constituída pelas mesmas duas componentes (direta e difusa) relativas à irradiância solar global, denominadas irradiação solar direta e irradiação solar difusa (Pereira et al. 2017). A definição física relativa à irradiância solar direta e irradiância solar difusa é igualmente aplicável a irradiação solar direta e irradiação solar difusa (Pereira et al. 2017).

Os painéis fotovoltaicos não associados a concentradores solares e os sistemas de aquecimento de água aplicam em sua conversão de energia as componentes direta e difusa da irradiação solar (Blakers, 2015). Os concentradores solares associados a sistemas térmicos ou fotovoltaicos aplicam exclusivamente a componente direta da irradiação solar devido a limitações ópticas relativas à concentração difusa (Blakers, 2015). Portanto a irradiação solar direta é a parcela da irradiação global aplicada ao projeto de concentradores solares, sendo comumente denominada irradiação normal direta (DNI) (Blanc et al., 2014; Lovegrove e Stein, 2012).

A disponibilidade de irradiação solar depende da latitude, padrões climáticos e níveis de poluição atmosférica local (Blakers, 2015). A disponibilidade de irradiação solar está sujeita ao efeito da sazonalidade, tornando-se menos significativa a baixas latitudes (Blakers, 2015). A figura 2.2 demonstra a distribuição de irradiação normal direta média diária (DNI_D) na superfície terrestre.

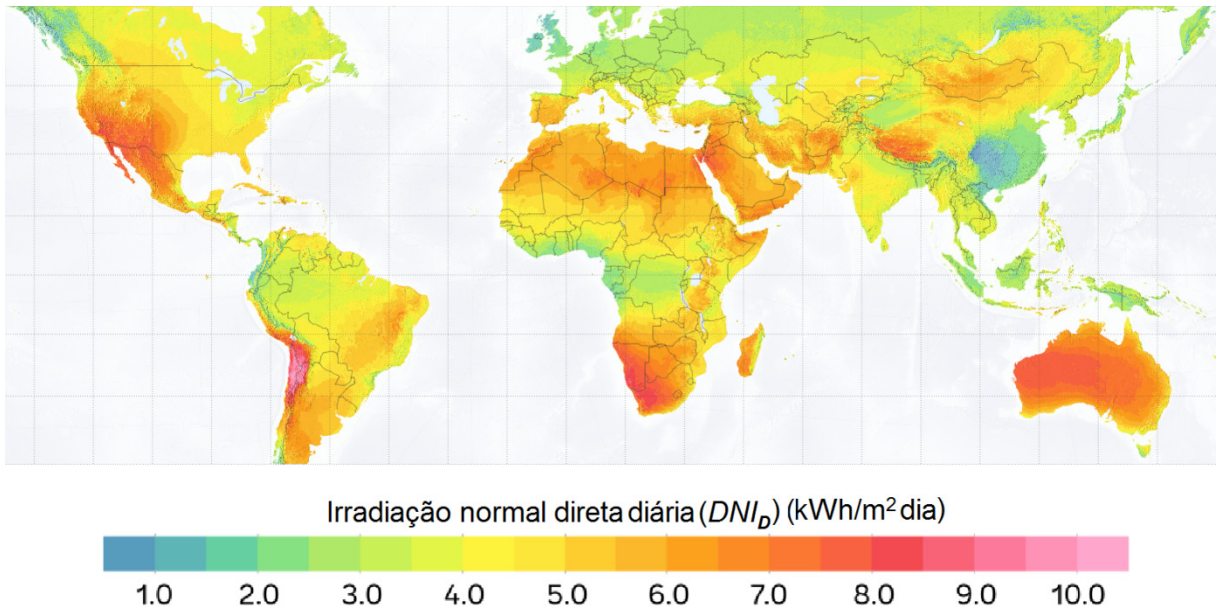


Figura 2.2 - Distribuição de irradiação normal direta média diária (DNI_D) na Terra
 Fonte: Adaptado de Energydata.info (2018)

2.2.SISTEMAS DISH-STIRLING

Os sistemas Dish-Stirling, apresentados na figura 2.3, são reconhecidos como a tecnologia em concentradores solares mais eficientes na conversão de energia solar em energia elétrica (Coventry e Andraka, 2017).



Figura 2.3 - Sistemas Dish-Stirling
 Fonte: Adaptado de Coventry e Andraka (2017)

Este sistema de conversão de energia solar é caracterizado pela sua modularidade, flexibilidade, operação autônoma e pela sua singular característica antagônica à maioria dos

sistemas de conversão de energia térmica, compreendida pelo baixo consumo de água em sua operação (Enteria e Akbarzadeh, 2014; Palenzuela et al., 2015).

Os sistemas Dish-Stirling são comumente instalados em localidades geograficamente remotas e isoladas, constituindo sistemas autônomos ou agrupados em usinas solares para aplicações “*on grid*” ou “*off grid*” (Kalogirou, 2009; Palenzuela et al., 2015). Os sistemas Dish-Stirling apresentam desvantagens compreendidas pelos altos custos dos equipamentos e problemas de confiabilidade relacionada ao conjunto receptor e motor Stirling, decorrentes das altas temperaturas de trabalho (Enteria e Akbarzadeh, 2014).

Os sistemas Dish-Stirling são constituídos de refletores que, dispostos em estruturas parabólicas e associados a sistemas de rastreamento solar, coletam radiação solar em uma grande área e concentram-na em uma pequena área, localizada no receptor (Lovegrove e Stein, 2012; Palenzuela et al., 2015). Comumente, a energia solar concentrada no receptor é transferida na forma de calor a um fluido (Enteria e Akbarzadeh, 2014). Este fluido fornece calor a um motor Stirling que, acoplado a um gerador elétrico, determina a energia elétrica desenvolvida pelo sistema Dish-Stirling (Enteria e Akbarzadeh, 2014; Palenzuela et al., 2015).

Os sistemas Dish-Stirling são constituídos essencialmente de concentrador solar dish, receptor, refletor, motor Stirling, sistema de rastreamento solar, estrutura e fundação (Coventry e Andraka, 2017), conforme demonstrado na figura 2.4.

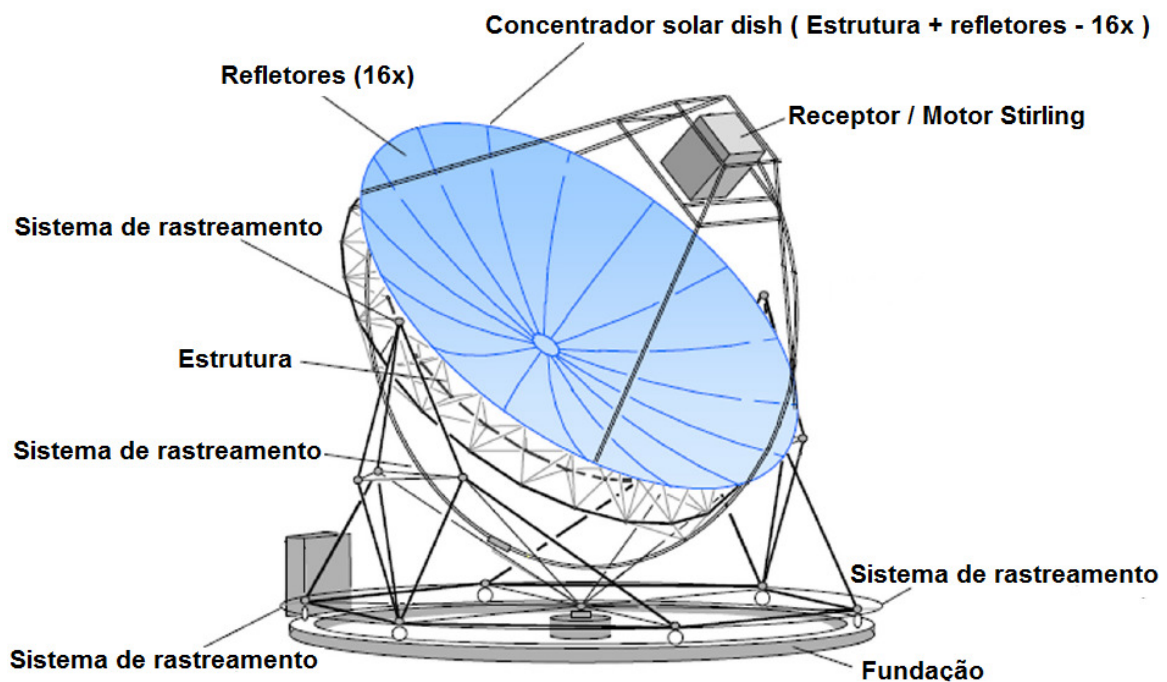


Figura 2.4 - Principais componentes de sistemas Dish-Stirling
Fonte: Adaptado de Coventry e Andraka (2017)

2.2.1. Concentradores solares dish

Os concentradores solares dish são aplicados na conversão de energia térmica para fornecimento de calor a fornos, aquecimento de água, fornecimento de energia para irrigação, dessalinização e destilação de água (Hafez et al.,2017). Porém, a principal aplicação dos concentradores solares dish consiste na geração de energia elétrica através dos sistemas Dish-Stirling (Baharoon et al., 2015; Lovegrove e Stein, 2012).

Os concentradores solares dish são reconhecidos por apresentarem as mais altas eficiências ópticas (η_C), as maiores razões de concentração geométrica (C_G) e as maiores eficiências entre todas as tecnologias de concentradores solares parabólicos (Lovegrove e Stein, 2012).

A geometria do concentrador solar dish consiste em um parabolóide truncado, forma obtida a partir da rotação da parábola em torno de seu eixo (Coventry e Andraka, 2017). A geometria aplicada ao concentrador dish é o formato ideal de concentradores solares (Kalogirou, 2009). O design óptico do concentrador solar dish e a precisão de sua fabricação determinam a interceptação da radiação solar e sua razão de concentração geométrica (C_G) (Enteria e Akbarzadeh, 2014).

Os concentradores solares dish apresentam comumente diâmetro entre cinco e quinze metros, sendo aplicados ao desenvolvimento de potência líquida de 1 a 50 kW (Kalogirou, 2009; Baharoon et al., 2015). Estudos relativos à otimização de custos em concentradores solares dish indicam que o diâmetro máximo aplicado esteja entre 10 e 12 metros, limitando sua potência líquida a aproximadamente 25 kW, sob radiação solar de 1000 W/m^2 (Enteria e Akbarzadeh, 2014).

O concentrador solar dish é constituído essencialmente por um único refletor ou múltiplos refletores (Kalogirou, 2009) associados a sua estrutura (Coventry e Andraka, 2017).

2.2.2. Refletor

O refletor consiste no componente de sistemas Dish-Stirling constituído de material espelhado, contínuo ou facetado, o qual promove a reflexão e focalização da radiação solar em concentradores solares (Hafez et al.,2016; Coventry e Andraka, 2017). A figura 2.5 mostra um típico refletor de concentrador solar dish.

Os materiais constituintes de refletores consistem num fator de expressiva relevância na manufatura de concentradores solares, uma vez que os refletores são montados na estrutura do concentrador (Baharoon et al., 2015; Hafez et al.,2016). Estes materiais apresentam alta

reflexibilidade, estabelecendo alta porcentagem de reflexão de radiação solar no receptor, sendo comumente submetidos a tratamentos, os quais estabelecem propriedades mecânicas suficientes para resistir a altas temperaturas (Coventry e Andraka, 2017). O alumínio, aço inoxidável e espelhos são exemplos de materiais reconhecidos pela sua alta reflexibilidade, aplicados comumente na manufatura de refletores (Hafez et al.,2016). O espelho de prata apresenta propriedades mecânicas as quais o confere à denominação de material constituinte de refletores de maior durabilidade (Baharoon et al., 2015).

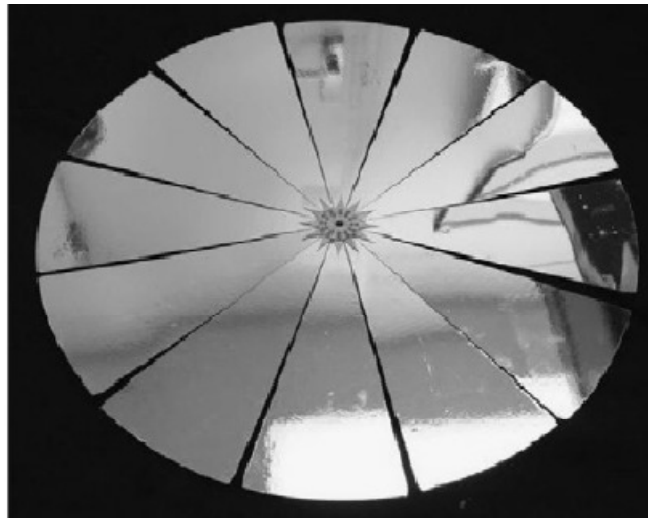


Figura 2.5 - Refletor de concentrador solar dish
Fonte: Li e Dubowsky (2011)

2.2.3. Receptor

O receptor é o componente do sistema Dish-Stirling que desempenha a função de absorver a radiação solar refletida pelo concentrador, convertendo-a na forma de calor e transferindo-a ao fluido de trabalho (Lovegrove e Stein, 2012). Portanto, os receptores estão sujeitos a energia solar concentrada a temperaturas acima de 1.000°C (Baharoon et al., 2015) e convertem-na em energia térmica a ser transferida ao fluido, comumente através de superfícies metálica tubular (Coventry e Andraka, 2017).

Os receptores de sistemas Dish-Stirling são constituídos por pequena cavidade denominada abertura do receptor, a qual permite a entrada da radiação solar concentrada em seu interior (Lovegrove e Stein, 2012). A abertura do receptor otimizada apresenta dimensão a qual admite a máxima radiação solar concentrada e impede as perdas por convecção e radiação (Lovegrove e Stein, 2012).

A superfície de absorção do receptor é comumente posicionada atrás do foco do concentrador (Enteria e Akbarzadeh, 2014). A principal função atribuída à superfície de absorção do receptor é limitar a intensidade do fluxo solar térmico incidente a valores de aproximadamente $750 \text{ kW} / \text{m}^2$ (Enteria e Akbarzadeh, 2014). O isolamento térmico presente entre a abertura do receptor e a superfície de absorção diminui as perdas de calor no receptor (Lovegrove e Stein, 2012).

O receptor de tubos, demonstrado na figura 2.6, apresenta absorvedor constituído por conjunto de tubos e emprega o fluido dedicado à transferência de calor diretamente no ciclo termodinâmico do motor Stirling (Coventry e Andraka, 2017).



Figura 2.6 - Receptor tubo de calor
Fonte: Adaptado de Enteria e Akbarzadeh (2014)

2.2.4. Sistema de rastreamento solar

Os concentradores solares dish demandam impreterivelmente movimentar-se durante sua operação em torno de dois eixos pela finalidade preponderante de acompanhar o Sol (Baharoon et al., 2015; Coventry e Andraka, 2017). Esta demanda operacional relativa aos concentradores solares dish determina invariavelmente aos sistemas Dish-Stirling que estes apresentem sistema de rastreamento solar (Coventry e Andraka, 2017).

O sistema de rastreamento estabelece essencialmente o acompanhamento solar do concentrador, determinando seu melhor posicionamento em relação ao Sol e maximizando a energia solar disponibilizada ao sistema Dish-Stirling (Baharoon et al., 2015; Coventry e Andraka, 2017).

Os dois principais sistemas de rastreamento solares comumente aplicados aos sistemas Dish-Stirling compreendem os modelos azimute-elevação e polar (Hafez et al., 2016). O sistema de rastreamento solar azimute-elevação, demonstrado na figura 2.7.

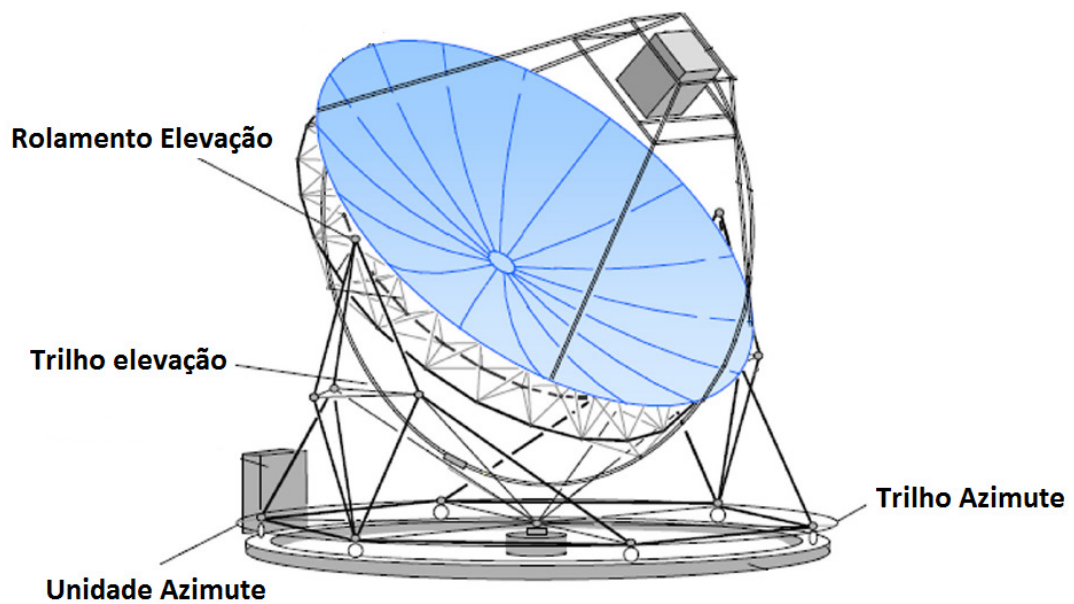


Figura 2.7 - Sistema de rastreamento solar azimute-elevação
 Fonte: Adaptado de Hafez et al. (2016)

2.2.5. Estrutura e fundação

A estrutura de sistemas Dish-Stirling, mostrada na figura 2.8, desempenha a função primordial de garantir sua integridade estrutural sob cargas gravitacionais e eólicas aplicadas sob diferentes orientações (Coventry e Andraka, 2017). As fundações apresentam a função de ancorar a estrutura do sistema de conversão de energia ao solo, garantindo deste modo, sua estabilidade estrutural (Coventry e Andraka, 2017).



Figura 2.8 - Estrutura de sistema Dish-Stirling
 Fonte: Adaptado de Coventry e Andraka (2017)

2.2.6. Motores Stirling

O motor Stirling é caracterizado por apresentar alta eficiência térmica teórica quando comparado aos demais modelos de motores, operando sob baixo nível de ruído e ampla faixa de temperaturas (Ahmadi et al., 2017). Este motor aplica ar, hélio e hidrogênio enquanto fluido de trabalho e distintos combustíveis ou fontes de energia renováveis, inclusive a solar térmica (Ahmadi et al., 2017).

O motor Stirling opera sob um ciclo termodinâmico fechado e regenerativo igualmente denominado Stirling, apresentando compressões e expansões cíclicas do fluido de trabalho a diferentes temperaturas (Thombare e Verma, 2008). As variações de volume concernentes ao fluido de trabalho, efetivamente estabelecidas durante o ciclo Stirling, proporcionam a conversão de calor em trabalho (Thombare e Verma, 2008).

O ciclo Stirling é descrito em diagramas apresentados na figura 2.9, especificamente pelo diagrama de pressão e volume (PV) no lado esquerdo desta figura, e a sua direita, pelo diagrama de temperatura e entropia (TS). A partir do instante inicial, quatro processos termodinâmicos são desenvolvidos sob o fluido de trabalho no ciclo Stirling, sendo estes de 1 a 2 compressão isotérmica, 2 a 3 absorção de calor isobárica e isentrópica, 3 a 4 expansão isotérmica e 4 a 1 rejeição de calor isobárica e isentrópica.

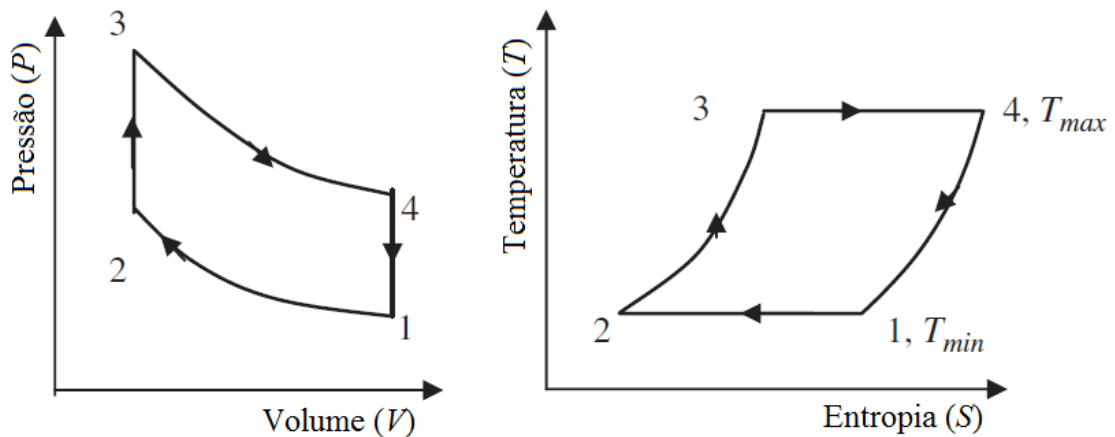


Figura 2.9 - Diagrama PV e TS concernente ao ciclo Stirling
Fonte: Adaptado de Thombare e Verma (2008)

Os motores Stirling são essencialmente classificados segundo seu modo de operação, estabelecido fundamentalmente sob duas categorias, denominadas simples ação e dupla ação (Thombare e Verma, 2008).

Os motores Stirling de simples ação são estabelecidos sob configurações nas quais o fluido de trabalho apresenta contato em apenas um dos lados do pistão no processo de deslocamento deste fluido entre cilindros (Thombare e Verma, 2008). Estes motores operam efetivamente sob configurações monocilíndricas ou sob configurações constituídas por múltiplas unidades monocilíndricas dispostas em cárter e virabrequim comum (Thombare e Verma, 2008).

Os motores Stirling de dupla ação são caracterizados essencialmente por aplicarem ambos os lados de seus pistões no processo de deslocamento do fluido de trabalho entre cilindros (Thombare e Verma, 2008). Os motores estabelecidos sob o princípio do duplo efeito operam sob configurações constituídas minimamente por três pistões (Thombare e Verma, 2008). Portanto, este modelo é efetivamente constituído por múltiplos cilindros, apresentando dutos aplicados a conexão dos cilindros ao regenerador (Thombare e Verma, 2008).

Os motores Stirling são construtivamente classificados segundo configuração alfa, beta e gama (Thombare e Verma, 2008).

2.2.6.1. Motor Stirling alfa

Os motores Stirling alfa apresentam arranjo físico constituído por pistões de deslocamento e potência dispostos em cilindros separados, conforme mostrado na figura 2.10 (Thombare e Verma, 2008).

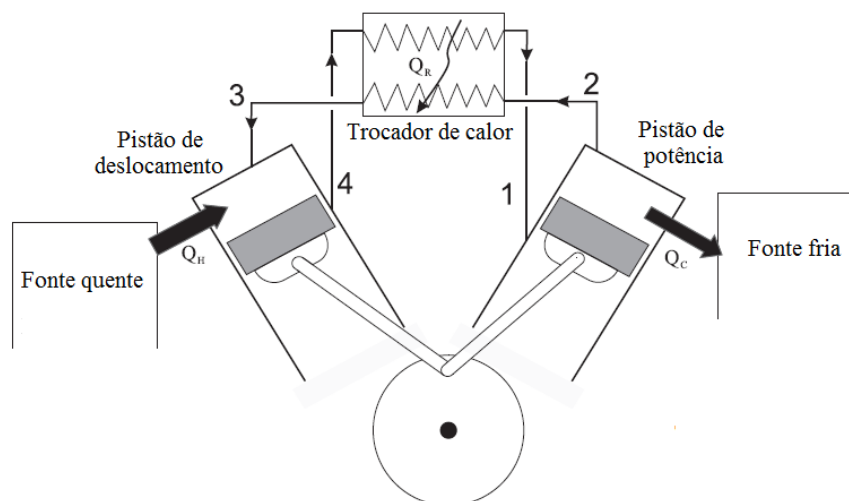


Figura 2.10 - Motor Stirling alfa
Fonte: Adaptado de Ahmadi et al. (2017)

A configuração alfa é conceitualmente a mais simples dentre os motores Stirling, apresentando a principal desvantagem de que ambos os pistões necessitam de vedações para conter vazamentos do fluido de trabalho (Thombare e Verma, 2008). A capacidade intrínseca

aos motores Stirling alfa de estabelecer arranjos compostos por múltiplos pares de cilindros constituí numa relevante vantagem, determinando o desenvolvimento de altas potências específicas (Thombare e Verma, 2008). O arranjo composto por múltiplos pares de cilindros estabelece que estes estejam conectados entre si, de modo que o volume de expansão de um cilindro esteja conectado ao volume de compressão do outro (Thombare e Verma, 2008). Os pistões de deslocamento e potência relativos a motores Stirling alfa são acoplados a placas circulares ou discos por meio de bielas, determinando movimento alternativo senoidal entre os pistões com uma diferença de fase de 90° (Thombare e Verma, 2008).

2.2.6.2. Motor Stirling beta

O arranjo físico característico dos motores Stirling beta estabelece a disposição de ambos os pistões (deslocamento e potência) em um mesmo cilindro, conforme demonstrado na figura 2.11 (Thombare e Verma, 2008).

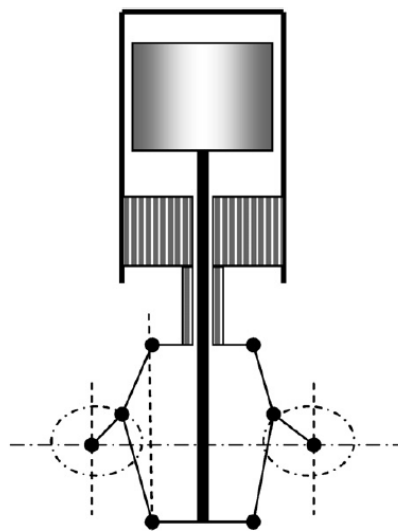


Figura 2.11 - Motor Stirling beta
Fonte: Adaptado de Thombare e Verma (2008)

O volume de compressão relativo a motores Stirling beta consiste no volume varrido pela cabeça do pistão de potência e base do pistão deslocador (Thombare e Verma, 2008). Os motores Stirling beta apresentam uma característica operacional singular presente exclusivamente nesta configuração de motor, a qual consiste no eventual contato físico entre o pistão de potência e o pistão deslocador (Thombare e Verma, 2008). Uma característica construtiva intrínseca aos motores Stirling beta consiste no singular sistema de acoplamento aplicado à conexão dos pistões (deslocador e potência) ao virabrequim (Thombare e Verma,

2008). Este sistema de acoplamento estabelece a transmissão de potência entre os pistões e virabrequim sob o ângulo de fase requerido ao funcionamento do motor Stirling beta (Thombare e Verma, 2008).

2.2.6.3. Motor Stirling gamma

Os motores Stirling gamma analogamente à configuração alfa apresentam o pistão de deslocamento e o pistão de potência dispostos em cilindros separados, conforme mostrado na figura 2.12 (Thombare e Verma, 2008).

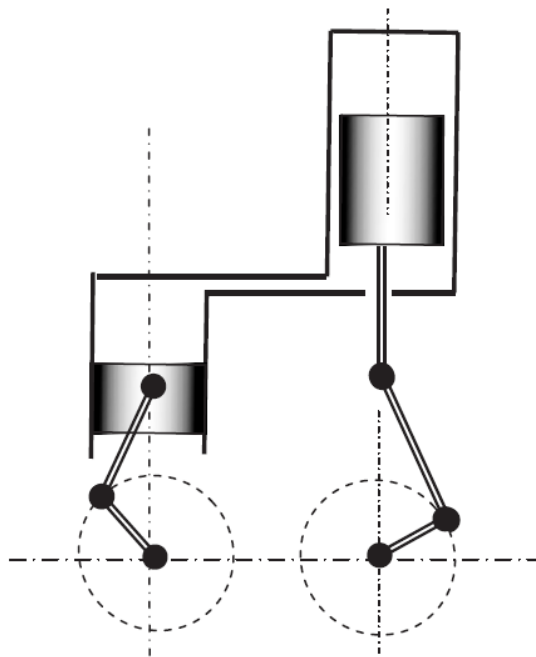


Figura 2.12 - Motor Stirling gamma
Fonte: Adaptado de Ahmadi et al. (2017)

Na configuração gamma, o espaço dedicado a compressão é estabelecido em ambos os cilindros através de uma conexão tubular (Thombare e Verma, 2008). Os motores Stirling gamma apresentam uma singular vantagem em relação aos modelos alfa e beta, estabelecida pela aplicação de manivela simples em seu sistema de transmissão de movimento (Thombare e Verma, 2008).

2.2.6.4. Motores Stirling aplicados aos sistemas Dish-Stirling

John Ericsson é reconhecido como o pioneiro no desenvolvimento de sistemas de conversão de energia solar constituídos de concentradores solares dish associados a motores Stirling (Coventry e Andraka, 2017). Durante a década de 1880, John Ericsson projetou e

construiu diversos protótipos deste sistema de conversão de energia solar denominado por ele mesmo de “*Sun-motor*” (Coventry e Andraka, 2017).

Os modelos de motores Stirling comumente aplicados aos sistemas Dish-Stirling são os denominados de pistão livre e cinemáticos (Baharoon et al., 2015). O motor de pistão livre é o modelo de motor Stirling o qual aplica o fluido de trabalho hélio, apresentando baixíssimo atrito em sua operação e proporcionando redução no custo de manutenção (Baharoon et al., 2015). O motor cinemático é o modelo de motor Stirling o qual aplica o fluido de trabalho hidrogênio, apresentando maior eficiência em relação ao motor de pistão livre (Baharoon et al., 2015). Outros motores Stirling aplicados aos sistemas Dish-Stirling utilizam ar ou nitrogênio como fluido de trabalho (Hafez et al., 2016). Os motores Stirling comumente aplicados aos sistemas Dish-Stirling apresentam a configuração alfa, beta e gamma (Hafez et al., 2016).

A associação de motores Stirling a concentradores solares dish constitui um sistema de conversão de energia solar de alta eficiência, apresentando picos de rendimento superiores a 30% (Coventry e Andraka, 2017). O motor Stirling é adequado às características operacionais do concentrador solar dish, proporcionando irradiação solar concentrada a altas temperaturas e desenvolvendo altas eficiências (Coventry e Andraka, 2017).

A figura 2.13 apresenta o desenho e a descrição concernente ao conjunto motor Stirling de pistão livre e gerador elétrico desenvolvido para aplicações em sistemas Dish-Stirling.

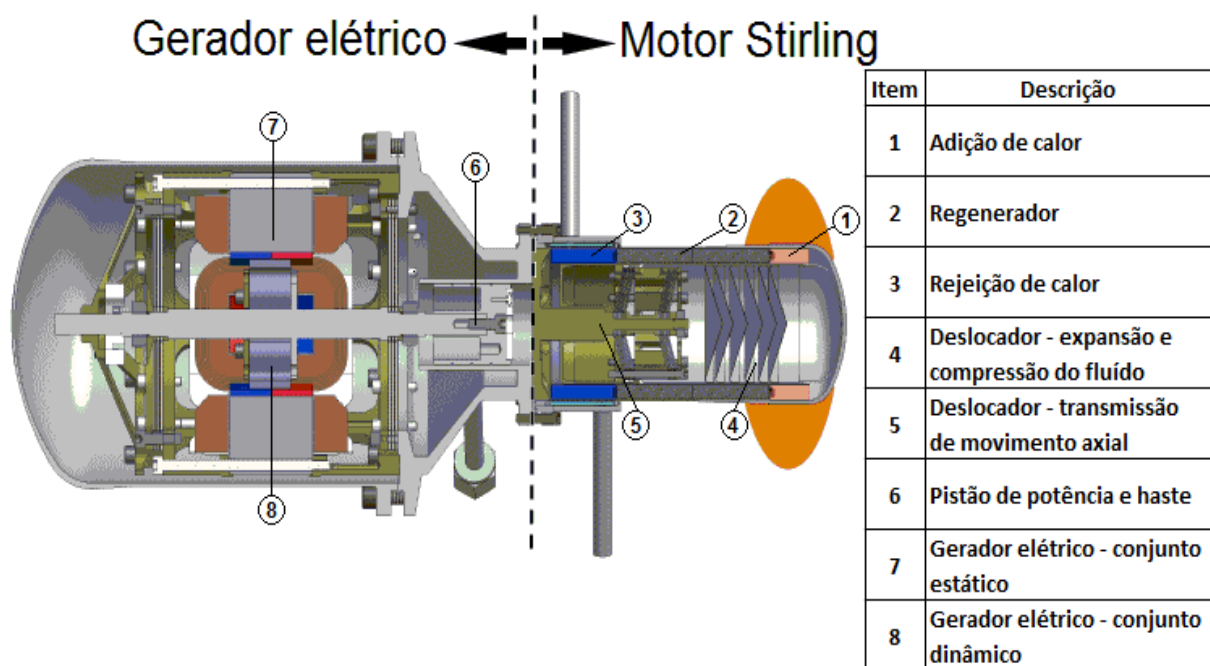


Figura 2.13 - Conjunto motor Stirling de pistão livre e gerador elétrico
Fonte: EERE (2018)

2.3.USINAS SOLARES DISH-STIRLING

Os sistemas Dish-Stirling comumente apresentam capacidade de geração de potência elétrica entre 1 kW e 50 kW, sendo usualmente aplicados a projetos que demandam potência instalada entre 0,5 MW e 2 MW (Baharoon et al., 2015; Coventry and Andraka, 2017). A análise fundamentada nas capacidades de geração de potência elétrica do sistema Dish-Stirling (1 kW a 50 kW) e as demandas de potência instaladas (0,5 MW a 2 MW), determina que a aplicação deste sistema de conversão de energia seja comumente estabelecida sob o conceito de usinas solares (Coventry and Andraka, 2017).

As usinas solares Dish-Stirling são projetadas sob a premissa de estabelecer potência instalada máxima de 10 MW, pois estas se tornam inviáveis sob o aspecto econômico e de eficiência energética a potências instaladas superiores a 10 MW (Lovegrove e Stein, 2012).

A figura 2.14 apresenta a usina solar Dish-Stirling de Maricopa, localizada no Arizona, Estados Unidos (Coventry and Andraka, 2017). Esta usina solar apresenta potência instalada de 1,5 MW, sendo constituída por 60 sistemas Dish-Stirling SunCatcher™, projetados sob potência elétrica líquida de 25 kW (Baharoon et al., 2015; Coventry and Andraka, 2017).

A usina solar Dish-Stirling de Tooele Army Depot, localizada em Utha, Estados Unidos, apresenta potência instalada de 1,5 MW (Coventry and Andraka, 2017). Esta usina solar é constituída por 430 sistemas Dish-Stirling Power Dish IV®, projetados sob potência elétrica líquida de 3,5 kW (Coventry and Andraka, 2017).



Figura 2.14 - Usina solar Dish-Stirling de Maricopa
Fonte: Coventry e Andraka (2017)

2.4.A ENERGIA EÓLICA

A potência solar disponibilizada ao planeta Terra é de aproximadamente $1,8 \times 10^{11}$ MW, sendo apenas 2% ($3,6 \times 10^9$ MW) convertida em energia eólica (Tong, 2010). Deste montante relativo à potência eólica, apenas 35% ($1,26 \times 10^9$ MW) é disponibilizada na superfície terrestre até uma altura de 1000 metros, onde os sistemas de conversão de energia eólica estão instalados (Tong, 2010). A figura 2.15 apresenta a distribuição de densidade de potência eólica na Terra à altura de 100 metros do solo. O montante relativo à potência eólica disponível à conversão ($1,26 \times 10^9$ MW) apresenta potencial de geração de energia elétrica vinte vezes maior que a taxa atual de consumo global (Tong, 2010). Portanto, a energia eólica apresenta capacidade teórica de atendimento da necessidade energética mundial (Tong, 2010).

A energia eólica é proveniente dos movimentos do ar ocasionados pelos gradientes de pressão atmosférica (Tong, 2010). O ar flui das regiões de maior pressão para regiões de menor pressão, portanto quanto maior os gradientes de pressão atmosférica, maior a velocidade imposta ao ar, e conseqüentemente, maior a energia eólica (Tong, 2010).

Os mecanismos de geração de movimento do ar são extremamente complexos, sendo dependentes de inúmeros fatores (Tong, 2010). Os fatores de maior relevância são o aquecimento solar irregular, o efeito Coriolis devido à rotação da Terra e as condições geográficas locais (Tong, 2010).

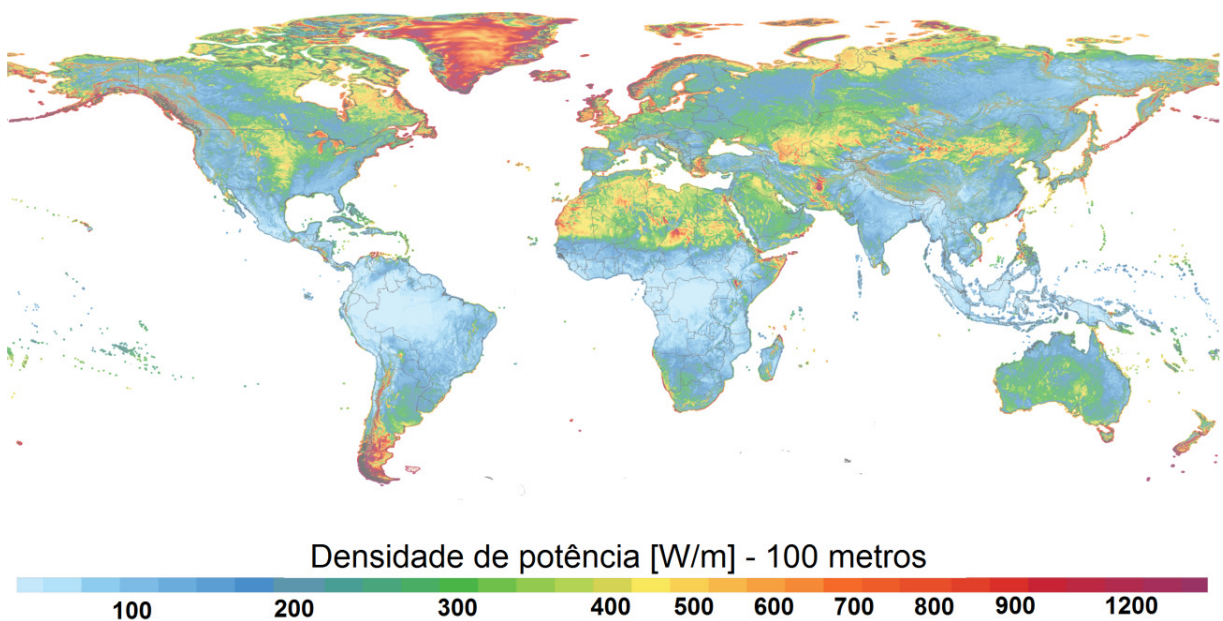


Figura 2.15 - Distribuição de densidade de potência eólica na Terra
Fonte: Adaptado de Energydata.info (2018)

O aproveitamento de energia eólica é extremamente vantajoso, pois esta fonte de energia apresenta-se disponível em abundância na Terra, estabelecendo geração de energia elétrica sob baixo custo (Tong, 2010).

2.5. TURBINAS EÓLICAS

A conversão de energia eólica é uma prática executada a milhares de anos, inicialmente em mecanismos denominados cata-ventos ou moinhos de vento (Schubel e Crossley, 2012). Estes primitivos sistemas de conversão de energia eólico-mecânica eram construídos em madeira, pano e pedra, sendo aplicados ao bombeamento de água e moagem de grãos (Schubel e Crossley, 2012). O desenvolvimento de materiais como os polímeros associados ao conhecimento em aerodinâmica, culminaram em relevantes avanços nos sistemas de conversão de energia eólica durante o século XIX (Schubel e Crossley, 2012).

Os mecanismos atualmente aplicados à conversão de energia eólica são as turbinas eólicas, desenvolvidos em sua pluralidade para geração de energia elétrica (Schubel e Crossley, 2012). A figura 2.16 demonstra três modelos de turbinas eólicas.



Figura 2.16 - Turbina eólica multipás (esquerda), três pás (centro) e Darrieus (direita)

Fonte: Adaptado de Fagbenro et al. (2014) (esquerda), Larwood et al. (2014) (centro) e Schaffarczyk (2014) (direita)

As turbinas eólicas são projetadas considerando impreterivelmente a localização de sua instalação (Manwell et al., 2010). A energia eólica está disponível nas regiões continentais e oceânicas (Tong, 2010), portanto são desenvolvidos projetos específicos de turbinas eólicas

para aplicações em regiões continentais e regiões oceânicas (Schubel e Crossley, 2012). Esta característica concernente à região de instalação (continental ou oceânica) estabelece uma relevante classificação das turbinas eólicas (Schubel e Crossley, 2012). Os projetos desenvolvidos para aplicações em regiões continentais originam as turbinas eólicas on-shore (Schubel e Crossley, 2012). Os projetos desenvolvidos para aplicações em regiões oceânicas originam as turbinas eólicas off-shore (Schubel e Crossley, 2012).

A orientação do eixo do rotor estabelece a classificação fundamental das turbinas eólicas (Schubel e Crossley, 2012). A turbina de eixo do rotor montado horizontalmente, paralelo ao solo, é classificada como turbina eólica horizontal (Schubel e Crossley, 2012). A turbina com o eixo do rotor montado verticalmente, perpendicular ao solo, é classificada como turbina eólica vertical (Schubel e Crossley, 2012). As turbinas eólicas verticais e horizontais apresentam características geométricas distintas entre si (Schubel e Crossley, 2012).

A figura 2.17 demonstra turbinas eólicas horizontais e turbinas eólicas verticais.

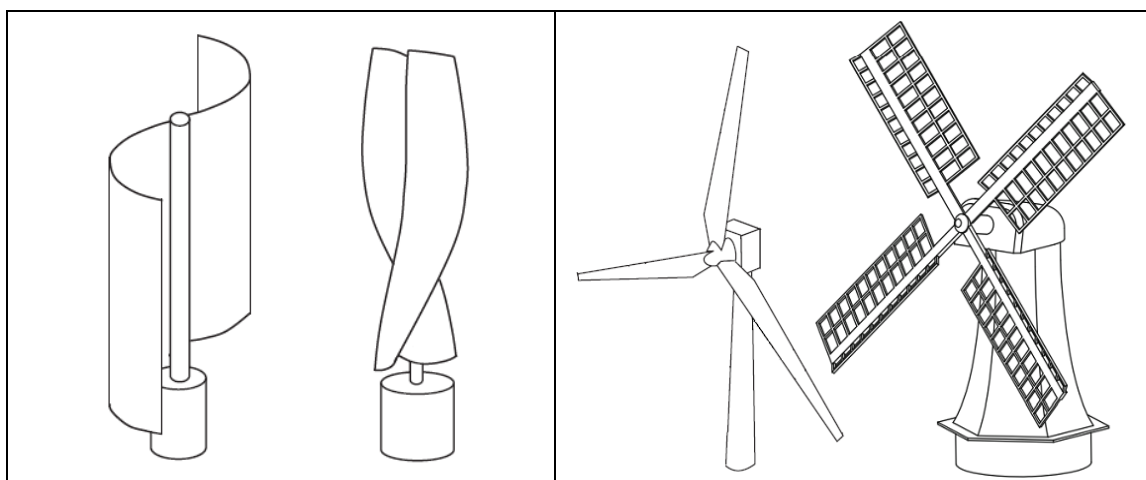


Figura 2.17 - Turbinas eólicas verticais (esquerda) e horizontais (direita)

Fonte: Adaptado de Tong (2010)

2.5.1. Princípio de funcionamento das turbinas eólicas

O estudo do princípio de funcionamento das turbinas eólicas é inicialmente desenvolvido por meio da análise relativa à conjuntura apresentada na figura 2.18. Esta figura é constituída essencialmente por uma turbina eólica associada a um determinado fluxo de ar que atravessa o seu rotor. A direção e o sentido deste fluxo de ar estão indicados nesta mesma figura.

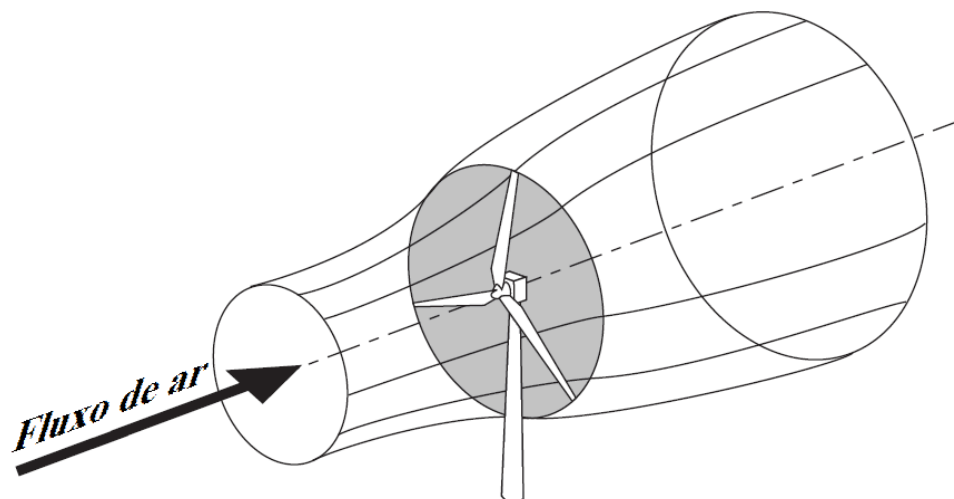


Figura 2.18 - Turbina eólica e fluxo de ar
 Fonte: Adaptado de Burton et al. (2011)

O princípio físico de funcionamento deste sistema de conversão de energia eólica é fundamentado em três premissas (Burton et al., 2011). A primeira premissa consiste na idealização do rotor eólico estabelecida pela aplicação do conceito de disco atuador (Burton et al., 2011). A segunda premissa estabelece que a massa de ar compreendida pelo fluxo que atravessa o rotor permanecerá separada da massa de ar compreendida pelo fluxo que não atravessa o rotor (Burton et al., 2011). A terceira premissa estabelece que o fluxo de ar que não atravessa o rotor eólico não sofrerá desaceleração a montante e jusante da turbina (Burton et al., 2011).

A primeira premissa estabelece a aplicação do conceito do disco atuador, uma antiga representação matemática aplicada ao estudo de dinâmica dos fluídos em hélices e rotores hidráulicos (Okulov e Van Kuik, 2012). A interpretação e aplicação adequada deste conceito ocorreram em 1889, através dos estudos desenvolvidos por William Froude (Smulders, 1976).

O conceito de disco atuador fundamentalmente substitui o rotor eólico real pelo modelo idealizado constituído essencialmente por um disco de mesmo raio infinitamente fino e permeável (Smulders, 1976). Por conseguinte, este conceito estabelece a aplicação de um rotor eólico ideal constituído por um número infinito de pás, permitindo a passagem integral do fluxo de ar em toda a sua superfície proporcionando impulso ao disco (Smulders, 1976).

A aplicação do modelo idealizado do disco atuador estabelece que a carga aplicada ao rotor seja substituída por uma distribuição uniforme de pressão neste disco infinitamente fino e permeável (Okulov e Van Kuik, 2012). Conclusivamente, a carga aplicada no disco atuador é considerada uniforme e normal, pois o rotor é submetido essencialmente a um fluxo axial (Okulov e Van Kuik, 2012).

A segunda e a terceira premissas estabelecem uma região constituída por linhas de corrente que atravessam o rotor, delimitando o fluxo de ar que atravessa o rotor e fluxo de ar que não atravessa o rotor (Burton et al., 2011). Estas linhas de corrente definem uma região tubular denominada tubo de corrente (Hau, 2013), conforme mostrado na figura 2.19.

O conceito do tubo de corrente estabelece um volume de controle, oportunizando a aplicação do princípio da conservação da massa, imprescindível no desenvolvimento da formulação matemáticas de turbinas eólicas (Burton et al., 2011). Os modelos apresentados na figura 2.18 e 2.19 não representam a rotação de esteira (Burton et al., 2011).

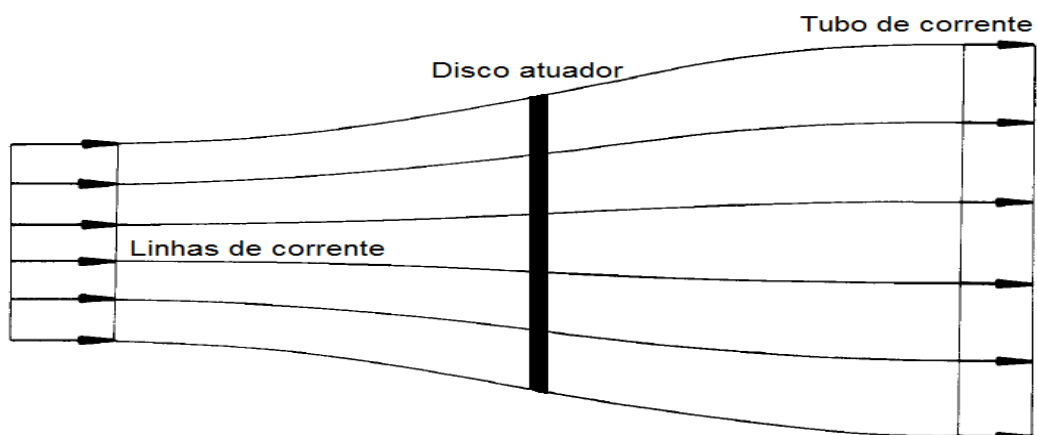


Figura 2.19 - Linhas de corrente, tubo de corrente e disco atuador
Fonte: Adaptado de Hau (2013)

O fluxo de ar a montante do disco atuador não apresenta movimento de rotação (Burton et al., 2011). O fluxo de ar a jusante do disco atuador apresenta rotação devido ao movimento induzido pelo disco atuador ao fluxo de ar, ou seja, a rotação na esteira (Burton et al., 2011). A rotação na esteira é descrita na figura 2.20 através da trajetória de uma partícula do fluxo de ar ao longo do tubo de corrente (Burton et al., 2011).

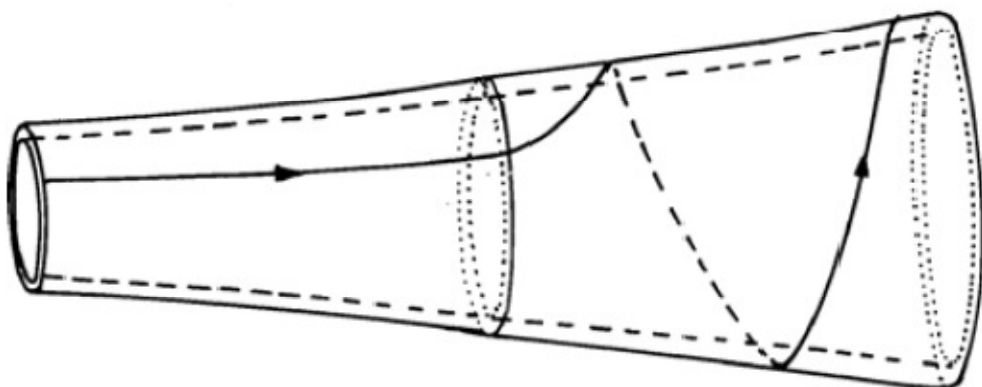


Figura 2.20 - Trajetória de uma partícula do fluxo de ar através do tubo de corrente
Fonte: Adaptado de Manwell et al.(2010)

A indução de movimento rotativo do disco atuador ao fluxo de ar determina uma variação na velocidade tangencial do rotor, a qual é expressa através do fator de indução tangencial (a') (Burton et al., 2011).

O estudo do princípio físico de funcionamento das turbinas eólicas está fundamentado essencialmente na análise da distribuição de velocidades e pressão no tubo de corrente (Burton et al., 2011). A figura 2.21 apresenta esta distribuição de velocidades e pressões, discriminados particularmente em três regiões no tubo de corrente, estabelecidas no disco atuador, a montante e a jusante do fluxo de ar (Burton et al., 2011).

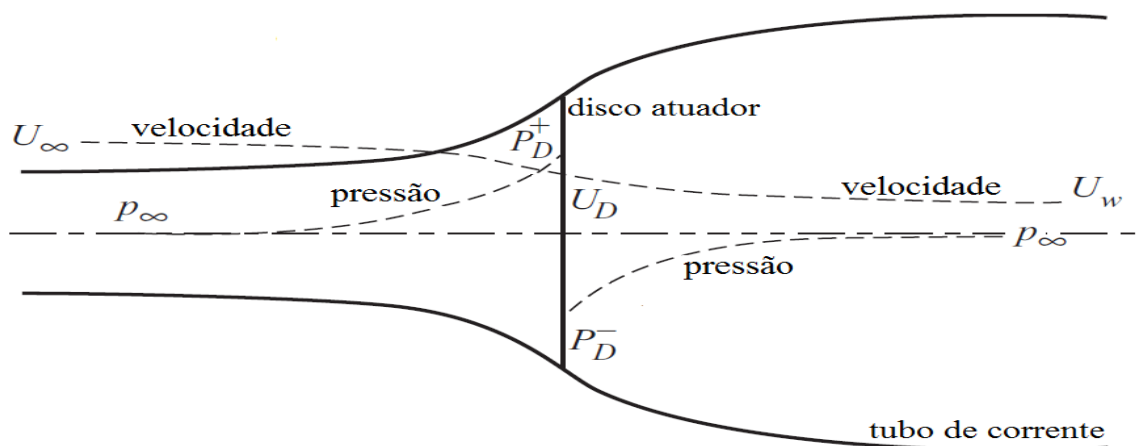


Figura 2.21 - Distribuição de velocidades e pressão ao longo do tubo de corrente
Fonte: Adaptado de Burton et al. (2011)

A figura 2.21 demonstra a velocidade do fluxo de ar no disco atuador (U_D) e as velocidades do fluxo de ar a montante (U_∞) e a jusante (U_w) do disco atuador (Burton et al., 2011). O princípio fundamental de funcionamento das turbinas eólicas estabelece que uma parcela da energia cinética relativa ao fluxo de ar que atravessa seu rotor seja convertida em energia mecânica, determinado a energia cinética do fluxo de ar no disco atuador (E_D) (Burton et al., 2011). Esta conversão de energia desenvolvida no rotor eólico determina que a energia cinética à jusante (E_w) seja menor que a energia cinética a montante (E_∞) (Burton et al., 2011). A energia cinética no disco atuador (E_D) constitui-se num valor entre a energia cinética à montante (E_∞) e a energia cinética jusante (E_w) (Burton et al., 2011).

As velocidades do fluxo de ar a montante (U_∞), no disco atuador (U_D) e a jusante (U_w) são estabelecidas proporcionalmente as energia cinética a montante (E_∞), no disco atuador (E_D) e a jusante (E_w) (Burton et al., 2011). Portanto, a velocidade do fluxo de ar à jusante (U_w) é menor que a velocidade à montante (U_∞) e a velocidade do fluxo de ar no disco atuador (U_D) constitui-se num valor entre a velocidade à montante (E_∞) e a jusante (E_w) (Burton et al.,

2011). A figura 2.21 apresenta a curva que descreve o decréscimo de velocidade do fluxo de ar ao longo do tubo de corrente, estabelecido fundamentalmente pela conversão de energia eólica e indução desenvolvida pelo disco atuador na velocidade axial do fluxo de ar (Burton et al., 2011). Esta variação de velocidade axial no fluxo de ar induzido pelo rotor é expressa em termos do fator de indução axial (a) (Burton et al., 2011).

A figura 2.21 estabelece ambas as pressões no disco atuador, (P_D^+) e (P_D^-), e a pressão nas regiões à montante e a jusante do disco atuador (P_∞) (Burton et al., 2011). A pressão à montante e a jusante do disco atuador (P_∞) constitui-se na pressão atmosférica (Burton et al., 2011). A figura 2.21 demonstra a velocidade do fluxo de ar a montante (U_∞) diminuindo gradualmente à medida que se aproxima do disco atuador (Burton et al., 2011). O tubo de corrente, por conseguinte, se expande nesta região pelo resultado da desaceleração do fluxo de ar à medida que se aproxima do disco atuador (Burton et al., 2011). Esta expansão ocorre, pois nenhum trabalho é realizado antes do disco atuador, portanto a pressão estática do fluxo de ar aumenta para absorver a diminuição da energia cinética (Burton et al., 2011). A pressão estática atinge seu valor máximo (P_D^+) justamente na região que antecede o disco atuador (Burton et al., 2011). À medida que o fluxo de ar atravessa o disco atuador, há uma queda sensível na pressão estática de tal forma que, ao sair, o fluxo de ar apresenta pressão (P_D^-) abaixo da pressão atmosférica (P_∞) (Burton et al., 2011). À medida que o fluxo de ar se afasta do disco atuador a jusante, a pressão estática aumenta até atingir a pressão atmosférica (P_∞) (Burton et al., 2011). O aumento da pressão estática invariavelmente estabelece a diminuição da energia cinética, conseqüentemente provocando uma desaceleração adicional no fluxo de ar (Burton et al., 2011). Deste modo, pode-se concluir que a montante e jusante não há alteração na pressão estática, porém há redução na energia cinética (Burton et al., 2011).

O estudo desenvolvido sobre a conjuntura apresentada figura 2.21 demonstra que a energia cinética concernente ao fluxo de ar não pode ser completamente convertida pelo rotor eólico, pois este fluxo a jusante deverá impreterivelmente conter energia cinética residual (Burton et al., 2011). Portanto, verifica-se a existência de um limite físico para a conversão de energia eólica (Burton et al., 2011).

O físico alemão Albert Betz desenvolveu estudos em 1920 que estabeleceram o valor máximo (ou o limite) de aproveitamento de energia intrínseco aos sistemas de conversão de energia eólica (Jiang et al., 2015; Okulov e Van Kuik, 2012). Neste mesmo ano, o cientista russo Nikolay Yegorovich Zhukovsky desenvolveu um estudo que apresentou o mesmo resultado estabelecido na análise de Betz (Jiang et al., 2015; Okulov e Van Kuik, 2012). Em 1915, o cientista britânico Frederick William Lanchester havia desenvolvido um estudo que

obteve um resultado similar aos apresentados por Betz e Zhukovsky (Jiang et al., 2015; Okulov e Van Kuik, 2012). Devido a estes três estudos, eventualmente apresenta-se na literatura a denominação limite de Lanchester-Betz-Joukowsky ou limite de Betz-Joukowsky (Jiang et al., 2015; Okulov e Van Kuik, 2012). A denominação comumente enunciada na literatura é o limite de Betz, a qual será adotada nesta dissertação.

Os estudos realizados por Betz foram estabelecidos sob a conjuntura apresentada na figura 2.18 e fundamentados na análise relativa às velocidades do fluxo de ar a montante (U_∞), no disco atuador (U_D) e a jusante (U_W), conforme mostrado na figura 2.21 (Manwell et al., 2010; Burton et al., 2011). Betz estabeleceu em sua análise a aplicação de três princípios físicos ao tubo de corrente e ao disco atuador, tal como premissas concernentes ao fluxo de ar estabelecido no tubo de corrente (Burton et al., 2011). Os três princípios consistem respectivamente no conceito de volume de controle, disco atuador e conservação do momento linear (Burton et al., 2011). O primeiro princípio estabelece ao tubo de corrente constituir-se num volume de controle (Burton et al., 2011). O segundo princípio estabelece ao rotor eólico constituir-se num disco atuador (Burton et al., 2011). O terceiro princípio estabelece a aplicação da conservação de momento linear no disco atuador e nas regiões a montante e a jusante do tubo de corrente (Manwell et al., 2010; Burton et al., 2011). As premissas caracterizam o fluxo de ar estabelecido no tubo de corrente em homogêneo, incompressível e regime permanente, não apresentando arrasto ou turbulência (Manwell et al., 2010).

Os resultados obtidos por Betz estabeleceram relações de proporcionalidade entre as velocidades (U_∞), (U_D) e (U_W), determinando as velocidades (U_D) e (U_W) em função de (U_∞) para a condição de máxima capacidade de conversão de energia eólica teórica (Okulov e Van Kuik, 2012). Esta relação de velocidades estabelecida sob a condição de máxima capacidade de conversão de energia eólica teórica é mostrada na figura 2.22.

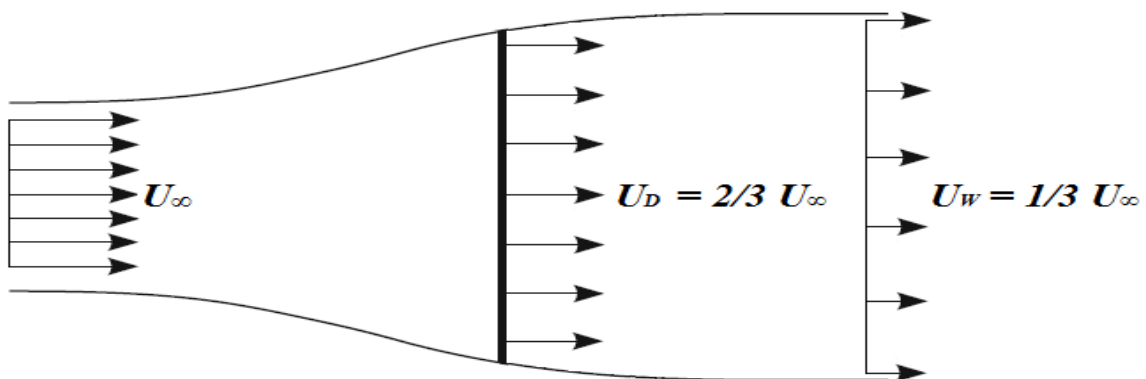


Figura 2.22 - Relação entre as velocidades (U_∞), (U_D) e (U_W) no tubo de corrente
Fonte: Adaptado de Okulov e Van Kuik (2012)

A capacidade máxima de conversão de energia teórica estabelece o limite de Betz (B), parâmetro adimensional que expressa o coeficiente de potência máximo teórico (C_{PMT}) inerente as turbinas eólicas (Schubel e Crossley, 2012). O valor numérico do limite de Betz (B) é definido pela equação 2.1 (Burton et al., 2011).

$$B = \frac{16}{25} \approx 0,5926 \quad (2.1)$$

O limite de Betz (B) é comumente denominado na literatura de “*limite de Carnot das turbinas eólica*”, pois seu valor independe das características construtivas do equipamento empregado na conversão energia (Okulov e Van Kuik, 2012). Conclusivamente, o limite de Betz (B) é válido para todos os modelos de turbina eólica (Schubel e Crossley, 2012).

2.5.2. Comportamento das turbinas eólicas

A análise do comportamento de turbinas eólicas é fundamentalmente desenvolvida através de parâmetros de entrada e saída deste sistema de conversão de energia (Smulders, 1976).

Os parâmetros de entrada consistem essencialmente em duas propriedades do ar e duas características geométricas do rotor (Smulders, 1976). As propriedades do ar compreendem sua velocidade (U_{∞}) e massa específica (ρ_{AR}) (Smulders, 1976). As características geométricas intrínsecas ao rotor consistem em seu raio (R) e número de pás (N_{PA}) (Smulders, 1976).

Os parâmetros de saída compreendem essencialmente as grandezas relativas ao seu funcionamento e a energia convertida por este sistema (Smulders, 1976). Os parâmetros de saída relativos ao funcionamento consistem nas frequências de eixo em rps (n) e rad/s (Ω) (Smulders, 1976). Os parâmetros de saída relativos à conversão de energia consistem no torque (T_{EI}) e na potência de eixo (P_E) (Smulders, 1976).

Os parâmetros de entrada e saída são aplicados na definição de distintas grandezas adimensionais, as quais efetivamente estabelecem a análise do comportamento de turbinas eólica (Smulders, 1976). Estas grandezas adimensionais são o coeficiente de potência (C_P), coeficiente de torque (C_T) e razão de velocidades na ponta da pá (λ) (Smulders, 1976).

O coeficiente de potência (C_P) consiste no parâmetro adimensional estabelecido pela razão entre potência de eixo (P_E) e a potência eólica disponível (P_{ED}) ao sistema de conversão (Manwell et al., 2010; Burton et al., 2011). A potência eólica disponível (P_{ED}) é definida pelo produto entre energia cinética do vento, a respectiva área varrida pelas pás do rotor e a velocidade do vento (Smulders, 1976).

O coeficiente de torque (C_T) consiste no parâmetro adimensional estabelecido através da razão entre torque no eixo (T_{EI}) e o produto da energia cinética do vento, a respectiva área varrida pelas pás do rotor e o raio do rotor eólico (Smulders, 1976).

A razão de velocidades na ponta da pá (λ) consiste na grandeza adimensional definida pela razão estabelecida entre a velocidade na ponta da pá do rotor eólico e a velocidade da corrente livre (Manwell et al., 2010; Burton et al., 2011).

O coeficiente de potência (C_P), coeficiente de torque (C_T) e razão de velocidades na ponta da pá (λ) constituem as grandezas adimensionais efetivamente aplicadas na análise do comportamento de turbinas eólicas (Smulders, 1976). Estes parâmetros adimensionais são sistematicamente relacionados em diagramas, conforme demonstrado nas figuras 2.23 e 2.24.

A figura 2.23 apresenta o diagrama de coeficiente de potência (C_P) em função da razão de velocidades na ponta da pá (λ) e concomitantemente, as curvas características concernentes a diversos modelos de rotores eólicos.

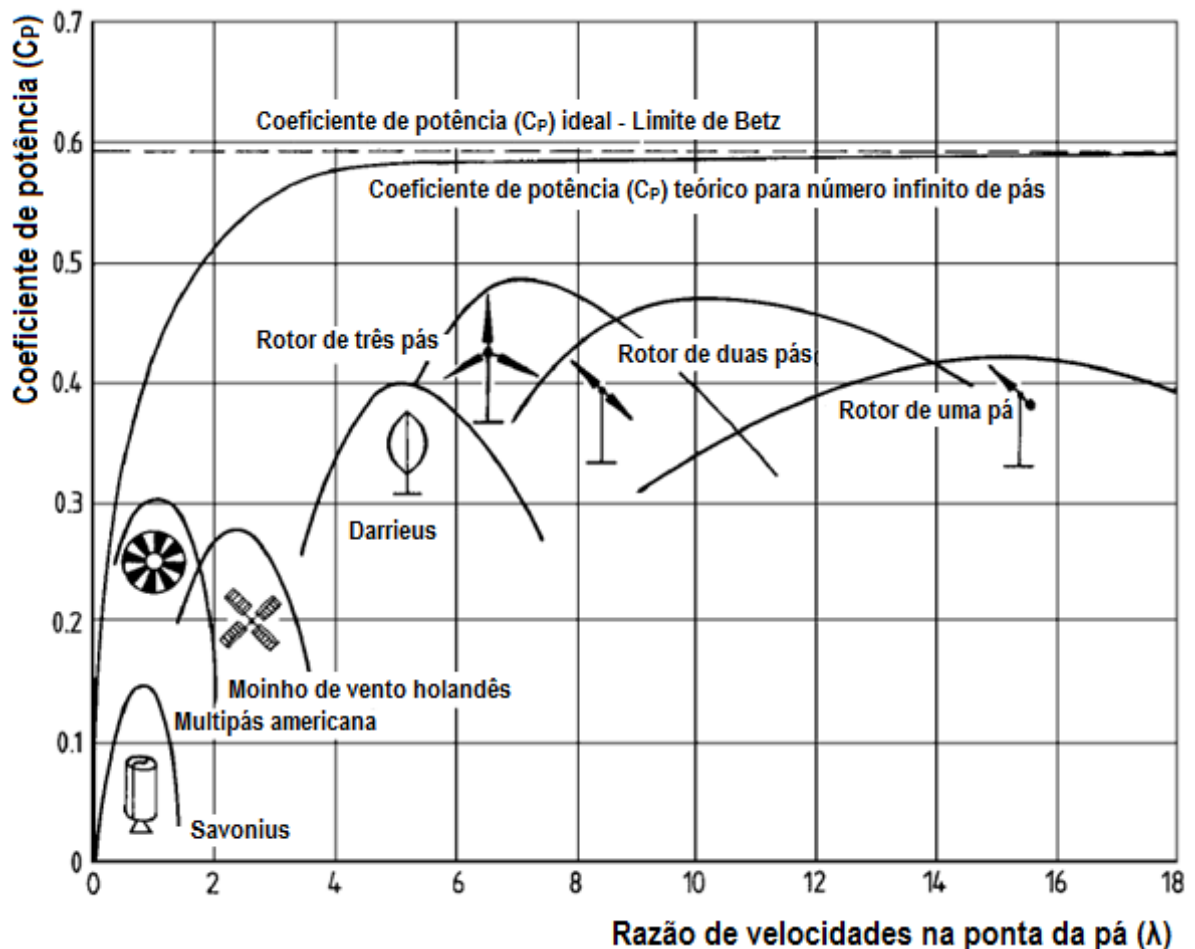


Figura 2.23 - Diagrama do coeficiente de potência (C_P) x velocidades na ponta da pá (λ) e as curvas características concernentes aos modelos de rotores eólicos
Fonte: Adaptado de Hau (2013)

Conforme Schubel e Crossley (2012) e o diagrama da figura 2.23, os coeficientes de potência máximos (C_{PM}) intrínsecos aos rotores eólicos são mostrados na tabela 2.1.

Tabela 2.1 - Coeficientes de potência máximos (C_{PM}) intrínsecos aos modelos de rotores

Modelos	Denominação	(C_{PM}) - Coeficiente de potência máximo [%]
A	Rotor multipás	31,0
B	Rotor holandês	27,0
C	Rotor de três pás	49,0
D	Rotor de duas pás	47,0
E	Rotor de uma pá	43,0
F	Rotor Savonius	16,0
G	Rotor Darrieus	40,0

Fonte: Adaptado de Schubel e Crossley (2012)

Os modelos de rotores de eixo horizontal, discriminados na tabela 2.1 (A, B, C, D e E), apresentam curvas de coeficientes de torque (C_T) em função da razão de velocidades na ponta da pá (λ) que são demonstradas no diagrama da figura 2.24.

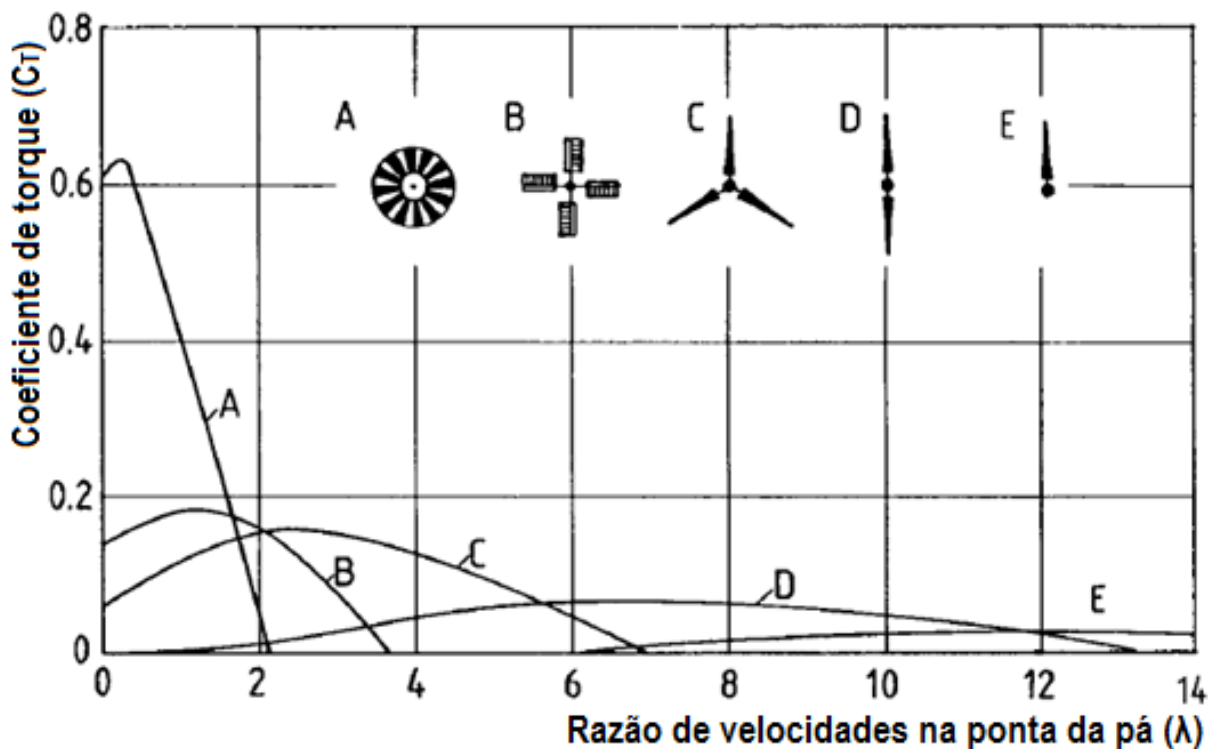


Figura 2.24 - Coeficiente de torque (C_T) x razão de velocidades na ponta da pá (λ)

Fonte: Adaptado de Hau (2013)

A solidez (σ), tal como o coeficiente de torque (C_T), coeficiente de potência (C_P) e a razão de velocidades na ponta da pá (λ), consiste num parâmetro adimensional inerente ao rotor eólico de grande relevância no comportamento de turbinas eólicas (Manwell et al., 2010).

A solidez do rotor (σ_s) consiste no parâmetro adimensional definido através da relação entre a área estabelecida pela soma das áreas das pás do rotor e a área “varrida” (A_V) por estas pás (Burton et al., 2011).

2.5.3. Turbinas eólicas de alta solidez

As turbinas eólicas constituídas por rotores de alta solidez estabelecem sua conversão de energia eólica aplicada essencialmente no bombeamento de água, moagem de trigo e conversão de energia elétrica (Schubel e Crossley, 2012).

As turbinas eólicas de alta solidez são constituídas invariavelmente por elevados números de pás (N_{PA}) e caracterizadas pela baixa razão de velocidades na ponta da pá (λ) (Khan et al., 2015). Portanto, seus rotores operam sob baixas velocidades angulares, estabelecendo uma operação silenciosa, determinada essencialmente pela baixa ocorrência de problemas de balanceamento e vibração (Khan et al., 2015). As turbinas eólicas constituídas por rotores de alta solidez apresentam boas características de partida devido ao seu alto torque (T_{EI}), desenvolvendo potência de eixo (P_E) inferior a obtida em turbinas eólicas de baixa solidez de mesmo diâmetro (Khan et al., 2015; Smulders, 1976). A singular desvantagem atribuída às turbinas eólicas de alta solidez consiste na sensível força axial que seu rotor é submetido durante sua operação (Smulders, 1976).

2.5.3.1. Turbina eólica de Charles Bush

O inventor norte americano Charles Francis Bush desenvolveu, em 1888, uma turbina eólica para fornecimento de energia elétrica a sua mansão e laboratório (King, 2011).

A turbina eólica desenvolvida por Bush apresentava dimensões “colossais” pesando quatro toneladas, sendo constituído de um rotor com 70 pás em madeira (cedro) e diâmetro de 17 metros (King, 2011). O eixo do rotor apresentava comprimento de 6 metros, sendo montado em dois mancais de rolamento de dimensão de 7,8 metros (King, 2011). A relação de transmissão entre o rotor da turbina eólica e o gerador era de 1/50 com aplicação de correias de diâmetro de 0,8 metros. A torre que acomodava todo o sistema de conversão apresentava uma altura de 18 metros (King, 2011). O gerador elétrico aplicado a esta turbina eólica

fornecia potência elétrica de 12 kW operando sob rotação de 500 rpm (King, 2011). A figura 2.25 apresenta a turbina eólica desenvolvida por Charles Bush.

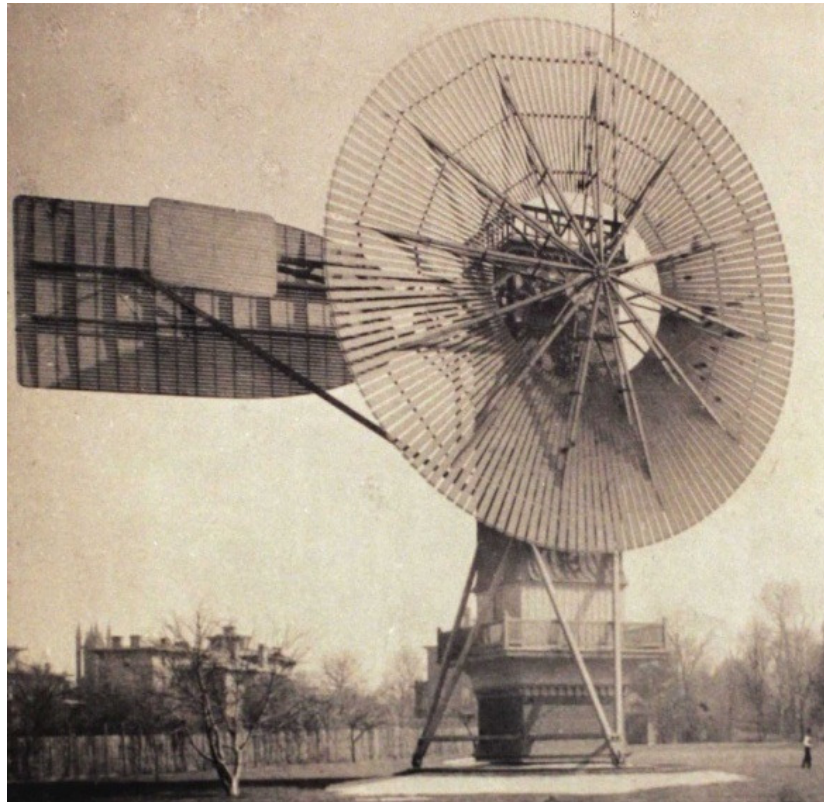


Figura 2.25 - Turbina eólica de Charles Bush
Fonte: Lyatkher (2013)

2.6. SISTEMAS HÍBRIDOS DE CONVERSÃO DE ENERGIA RENOVÁVEL

A conversão de energia a partir de fontes não-renováveis ou convencionais enfrenta atualmente adversidades no âmbito ambiental, custos envolvidos e o esgotamento de combustíveis fósseis (Baharoon et al., 2015; Aziz et al., 2017). A aplicação de fontes não-renováveis é a solução destas implicações na conversão limpa e sustentável de energia (Baharoon et al., 2015; Aziz et al., 2017).

As fontes de energia renováveis são continuamente reabastecidas a partir de processos que ocorrem em escala de tempo humana (Aziz et al., 2017). As principais fontes de energia renováveis são a eólica, solar, marítima (maremotriz e ondomotriz), geotérmica e biomassa (Aziz et al., 2017).

As fontes de energia convencionais ou não-renováveis foram originadas a partir de processos em escala de tempo geológica, outros durante a formação do sistema solar (Aziz et

al., 2017). As principais fontes de energia não-renováveis ou convencionais são os combustíveis fósseis (petróleo, carvão mineral e gás natural) e os combustíveis nucleares (Aziz et al., 2017).

Os sistemas conversão de energia são constituídos de uma única fonte renovável ou não-renovável (Khare et al., 2016; Aziz et al., 2017). Os sistemas híbridos de conversão de energia são constituídos por duas ou mais fontes renováveis ou não-renováveis (Khare et al., 2016; Aziz et al., 2017).

Os sistemas híbridos de conversão de energia renovável são constituídos basicamente de combinações de fontes de energia renováveis e convencionais ou combinações de duas ou mais fontes de energia renováveis (Khare et al., 2016).

Os sistemas híbridos de energia renovável aplicam combinações de duas ou mais tecnologias de conversão a duas ou mais fontes de energia (renovável ou convencional) obtendo deste modo eficiências superiores às alcançadas em sistemas de conversão que aplicam apenas uma fonte de energia (Khare et al., 2016).

O sistema híbrido de conversão de energia renovável o qual aplica a combinação de duas fontes de energia renováveis, especificamente, eólica e solar, é denominado sistema híbrido de conversão de energia renovável eólico solar (Khare et al., 2016).

2.6.1. Sistemas híbridos eólicos solares

Os sistemas híbridos eólicos solares apresentam duas disposições de operação, denominados simultâneo e seqüencial (Khare et al., 2016). A disposição simultânea do sistema híbrido eólico solar opera as conversões de energia solar e eólica simultaneamente (Khare et al., 2016). A disposição seqüencial do sistema híbrido eólico solar opera as conversões de energia solar e eólica alternativamente (Khare et al., 2016).

2.6.1.1. O sistema híbrido eólico solar CSCWA

O sistema híbrido de conversão de energia eólica solar CSCWA, mostrado a direita da figura 2.26, foi desenvolvido por Su et al. (2011) e Tao et al. (2011). O sistema CSCWA é basicamente constituído de concentrador solar associado ao módulo fotovoltaico e turbina eólica Rutland 503. O lado esquerdo da figura 2.26 apresenta o desenho esquemático deste sistema híbrido, demonstrando seus principais componentes.

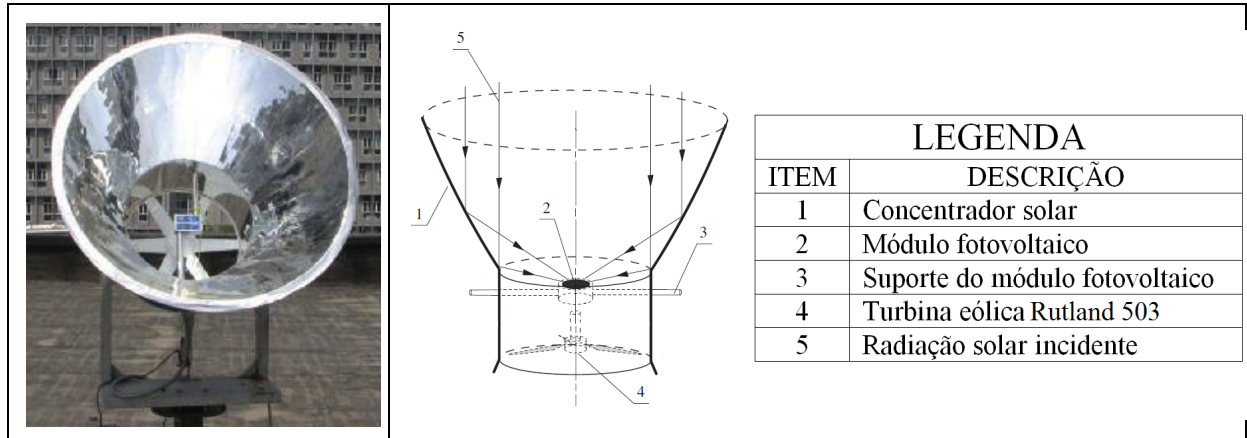


Figura 2.26- Sistema híbrido CSCWA (esquerda) e seu desenho esquemático (direita)
Fonte: Tao et al. (2011)

O desenvolvimento do sistema híbrido CSCWA consistiu essencialmente na definição do conceito do concentrador solar funil a partir de estudos ópticos associados a estudos de escoamento aplicando CFD (Su et al., 2011). A figura 2.27 apresenta a análise fluidodinâmica computacional (CFD) estabelecida ao concentrador solar funil.

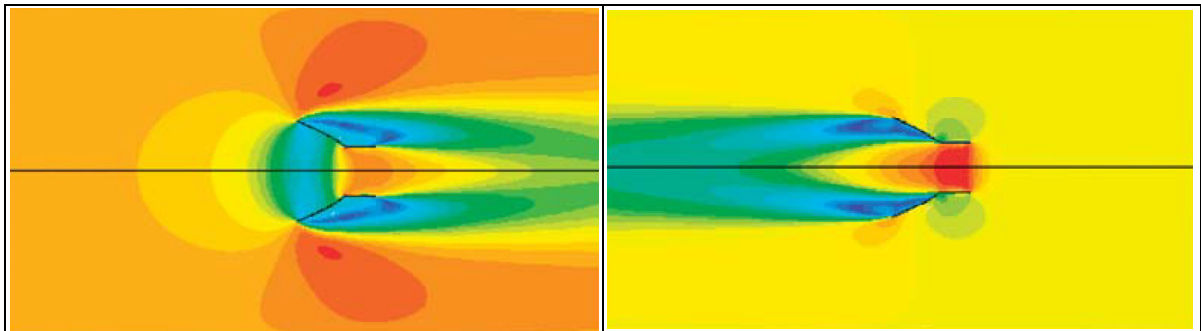


Figura 2.27 - Análise fluidodinâmica computacional (CFD) do concentrador funil
Fonte: Adaptado de Su et al. (2011)

A conclusão da análise de viabilidade do sistema CSCWA realizada por Su et al. (2011) afirma que este sistema híbrido é vantajoso sob condições climáticas de disponibilidade solar e eólica. Esta conclusão ratifica um enunciado de Khare et al. (2016), o qual afirma que sistemas híbridos obtêm eficiências superiores às alcançadas em sistemas de conversão que aplicam apenas uma fonte de energia.

3. METODOLOGIA E FORMULAÇÃO MATEMÁTICA

3.1. INTRODUÇÃO

O conceito do concentrador híbrido dish proposto consiste fundamentalmente num concentrador solar dish constituído de pás de turbinas eólicas associadas a sua estrutura. A figura 3.1 apresenta o primeiro modelo conceitual do concentrador híbrido dish desenvolvido unicamente com a finalidade de elucidar o conceito incipiente do concentrador híbrido dish. Este primeiro modelo conceitual desconsidera quaisquer metodologias de projeto, portanto seu número de pás foi definido de maneira arbitrária.

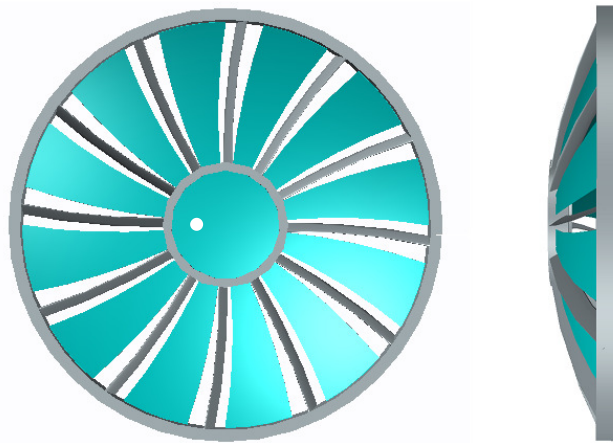


Figura 3.1- Modelo conceitual do concentrador híbrido dish

A figura 3.2 mostra os dois principais componentes constituintes do concentrador híbrido dish: o conjunto de refletores e o rotor eólico/estrutura do concentrador. O conjunto de refletores dispostos no concentrador híbrido dish estabelece uma região destinada ao escoamento de ar e posicionamento das pás eólicas, denominada lacunas.

A característica essencial ao funcionamento do concentrador híbrido dish são as lacunas, compreendidas pelos espaços vazios entre os refletores. As lacunas determinam simultaneamente a área livre ao escoamento de ar através do concentrador híbrido dish e pás, assim como a área relativa aos refletores do concentrador solar. A área livre ao escoamento de ar através do concentrador híbrido dish e pás determina a vazão de ar aplicada ao projeto (Bran e Souza, 1969). 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 relativas às lacunas são concomitantemente determinantes na conversão de energia solar e eólica.

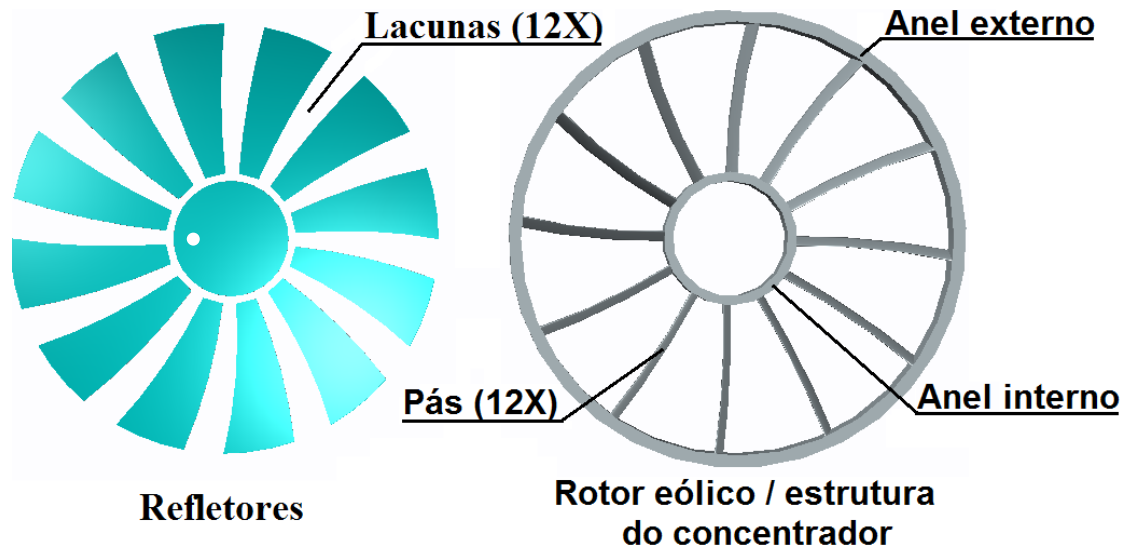


Figura 3.2 - Refletores e rotor eólico constituintes do concentrador híbrido dish

O rotor eólico/estrutura do concentrador é constituído basicamente por pás e anéis externo e interno, conforme figura 3.2. As pás são destinadas a conversão de energia eólica. O anel externo e anel interno são aplicados essencialmente na função estrutural, pois associados ao conjunto de pás, formam uma estrutura rígida denominada estrutura do concentrador que, por conseguinte, suportam os refletores (exceto o refletor circular interno). O refletor circular interno não apresenta qualquer tipo de união ou engaste ao anel interno.

A aplicação do concentrador híbrido dish em substituição ao concentrador solar dish em sistemas de Dish-Stirling estabelece fundamentalmente o conceito de hibridização proposto, originando o sistema híbrido representado pelo modelo conceitual apresentado na figura 3.3.

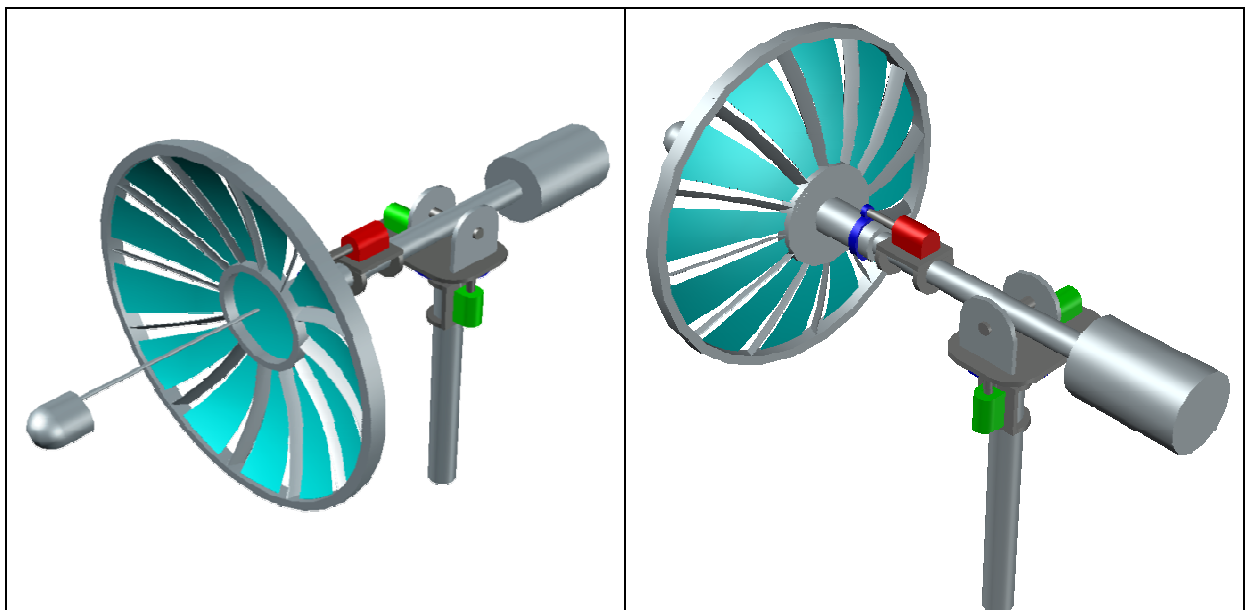


Figura 3.3 - Modelo conceitual do sistema híbrido proposto

Este sistema híbrido foi essencialmente dividido em dois conjuntos, conforme escopo dos estudos desenvolvidos nesta dissertação, denominados de estrutural / rastreamento e geração de energia elétrica.

O modelo conceitual do conjunto estrutural / rastreamento, apresentado na figura 3.4, é constituído basicamente por elementos mecânicos aplicados a sustentação do sistema e movimentação do concentrador híbrido dish no rastreamento solar e eólico. Este conjunto mecânico é essencialmente comum aos sistemas Dish-Stirling e híbrido proposto, exceto pela sua aplicação, a qual se apresenta abrangente no sistema híbrido (rastreamento solar e eólico) e restrita no sistema Dish-Stirling (rastreamento solar). O conjunto estrutural / rastreamento não compreende um elemento de grande relevância ao escopo dos estudos desenvolvidos nesta dissertação, portanto este é apresentado no intuito de elucidar o conceito de sistema híbrido proposto.

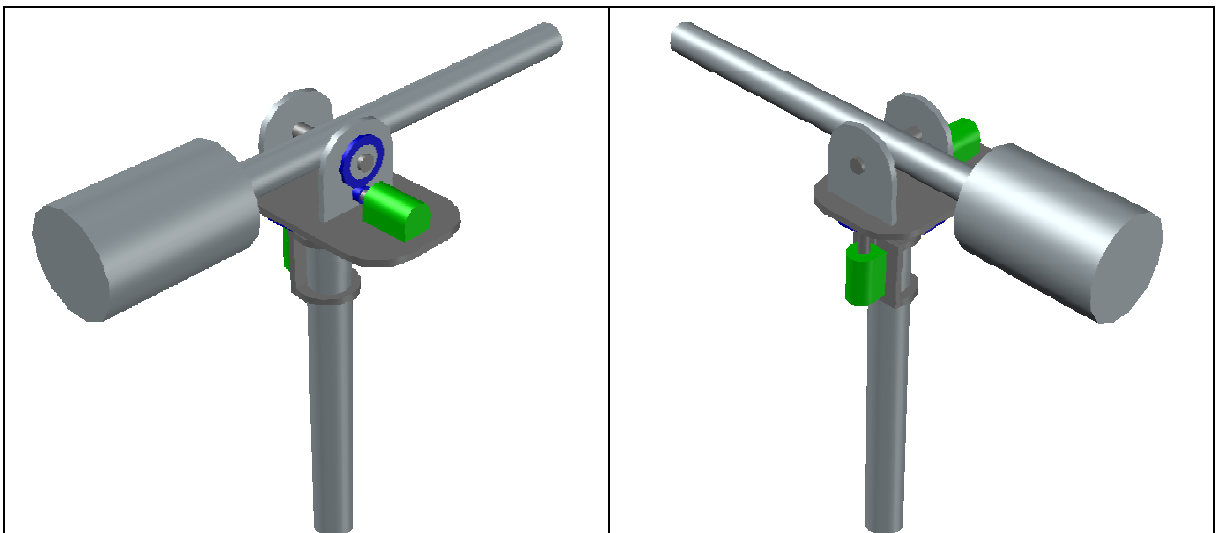


Figura 3.4 - Modelo conceitual do conjunto estrutural / rastreamento

O conjunto geração de energia elétrica, apresentado na figura 3.5, consiste no modelo conceitual primordial do sistema híbrido proposto, pois este estabelece as conversões de energia solar / eólica em energia elétrica. Este conjunto e sobretudo o concentrador híbrido dish consistem nos conceitos fundamentais propostos nesta dissertação; os quais efetivamente definem o sistema híbrido. Portanto, o projeto desenvolvido concernente ao sistema proposto restringiu-se ao conjunto geração de energia elétrica, fundamentado no seu dimensionamento térmico e geométrico, entretanto desconsiderando seu dimensionamento mecânico-estrutural.

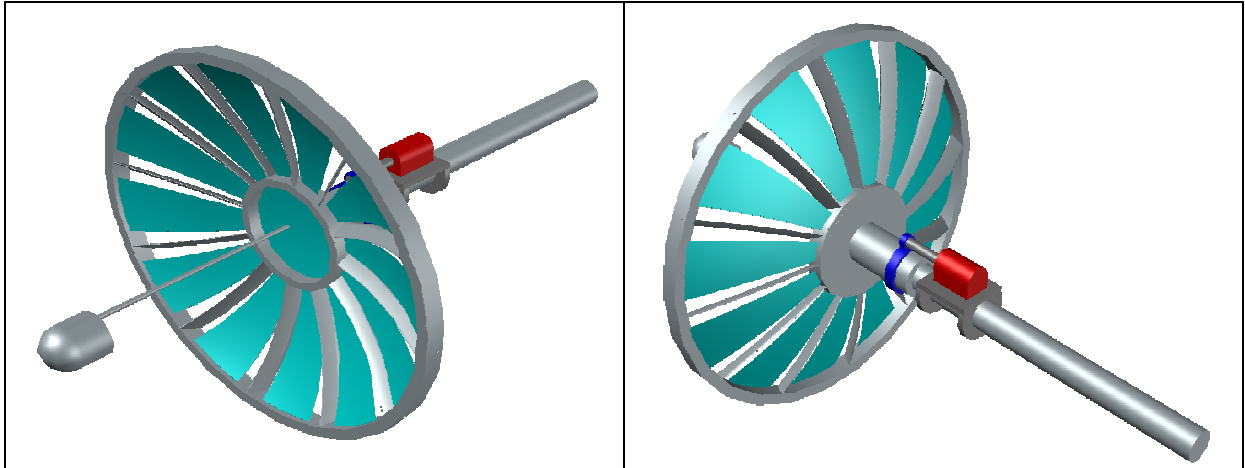


Figura 3.5 - Modelo conceitual do conjunto geração de energia elétrica

Os componentes concernentes ao modelo conceitual do conjunto geração de energia elétrica são apresentados detalhadamente na figura 3.6, mediante perspectiva explodida.

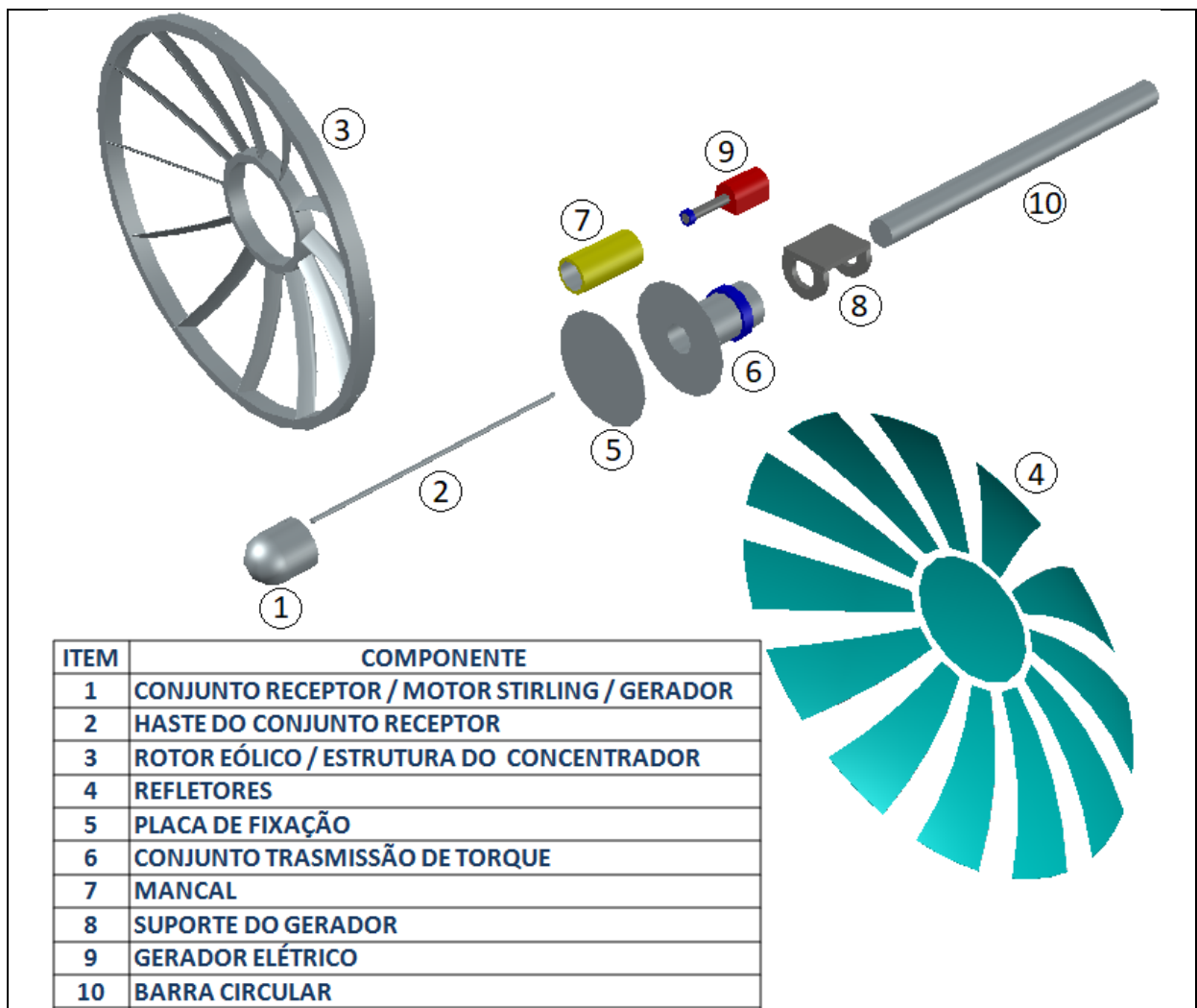


Figura 3.6 - Vista explodida do modelo conceitual do conjunto geração de energia elétrica

O modelo conceitual do conjunto geração de energia elétrica estabelece efetivamente o princípio de funcionamento do sistema híbrido proposto. Portanto, o modelo conceitual deste conjunto foi concebido sob premissa operacional a qual estabelece sua subdivisão em dois subconjuntos de características de funcionamento distintas, fundamentada em sua condição estática ou dinâmica durante a conversão de energia eólica.

A figura 3.7 apresenta o subconjunto que apresenta rotação durante a conversão de energia eólica, constituído pelos componentes 3, 4, 6 e 7 do conjunto geração de energia elétrica, enumerados na figura 3.6.

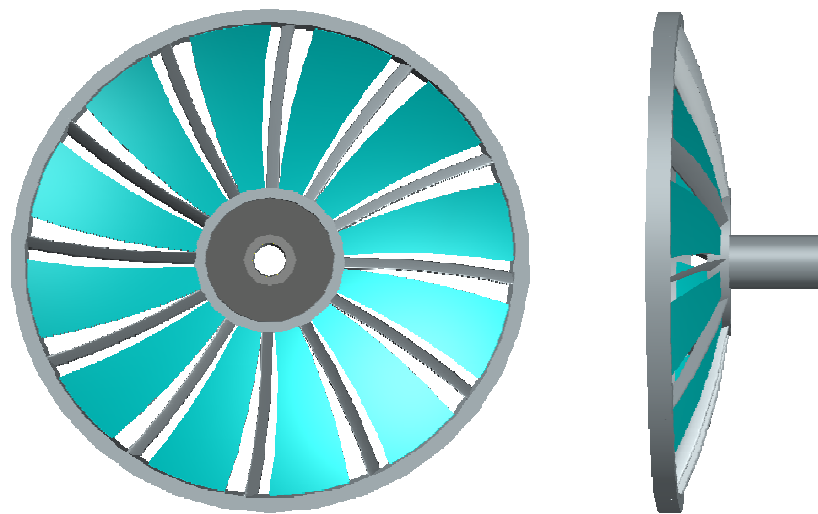


Figura 3.7 - Subconjunto sob rotação durante a conversão de energia eólica

A figura 3.8 apresenta o subconjunto que permanece estático durante a conversão de energia eólica, constituído pelos componentes 1, 2, 5, 8, 9 e 10 do conjunto geração de energia elétrica, enumerados na figura 3.6.

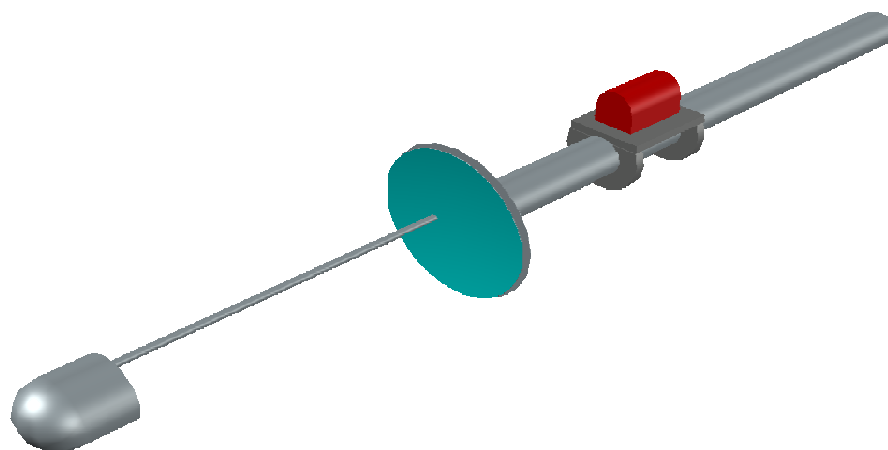


Figura 3.8 - Subconjunto estático durante a conversão de energia eólica

O estabelecimento do subconjunto dinâmico está fundamentado no princípio de funcionamento do componente rotor eólico / estrutura do concentrador híbrido dish, o qual apresenta movimento de rotação durante a conversão de energia eólica, e na transmissão de torque (T_{EI}) ao gerador de energia elétrica.

O estabelecimento do subconjunto estático está fundamentado na imprescindibilidade do conjunto constituído pelo receptor, gerador elétrico e motor Stirling permanecer isento de movimento de rotação durante a conversão de energia eólica.

O conceito do sistema híbrido estabelece que este realize ambas as conversões de energia (solar e eólica) autonomamente, entretanto este estudo foi fundamentalmente desenvolvido sob a premissa que o sistema proposto não estabeleça a conversão de energia solar e eólica concomitantemente.

O projeto do sistema híbrido, compreendido pelo dimensionamento geométrico e térmico do conjunto geração de energia elétrica, compreendeu a aplicação de metodologias intrínsecas aos projetos de sistemas Dish-Stirling e turbinas eólicas. Portanto, o projeto do sistema híbrido constitui-se basicamente de seu projeto solar e projeto eólico, cujas metodologias serão descritas minuciosamente nos tópicos 3.3 e 3.4, respectivamente.

O projeto do sistema híbrido demanda a definição do local de sua instalação, pois são estabelecidas, mediante esta especificação, os parâmetros intrínsecos as disponibilidades eólicas e solares imprescindíveis ao projeto do sistema proposto. Portanto, o tópico 3.2 será dedicado a elucidar a metodologia aplicada na determinação da localização geográfica deste sistema e os parâmetros de projeto intrínsecos as disponibilidades eólicas e solares.

A análise de viabilidade do sistema híbrido foi fundamentada no estudo comparativo entre a energia elétrica anual gerada pelo sistema proposto e um sistema Dish-Stirling correspondente, ambos operando sob disponibilidades eólicas e solares iguais, estabelecidas pela localidade especificada no tópico 3.2. As características geométricas do sistema Dish-Stirling correspondente são efetivamente iguais as estabelecidas no sistema híbrido. Entretanto, a característica construtiva que diferencia os sistemas consiste no concentrador híbrido dish aplicado ao sistema híbrido e o concentrador solar dish aplicado ao sistema Dish-Stirling correspondente. A figura 3.9 demonstra ambos os sistemas (híbrido e Dish-Stirling correspondente).

A análise de viabilidade objetiva a comprovação da efetividade da hibridização proposta, mediante geração de energia elétrica em kWh/ano estabelecida pela conversão de energia solar e eólica no sistema híbrido que, posteriormente, é comparada com geração de energia elétrica em kWh/ano do sistema Dish-Stirling correspondente.

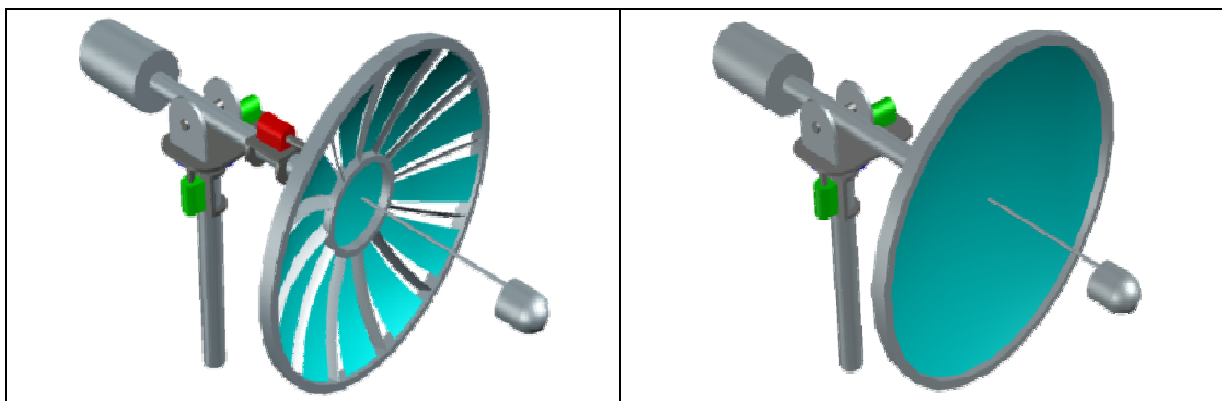


Figura 3.9 - Sistema híbrido (direita) e sistema Dish-Stirling correspondente

3.2. ESPECIFICAÇÃO GEOGRÁFICA DO SISTEMA HÍBRIDO

O projeto do sistema híbrido demanda de dados relativos aos parâmetros intrínsecos das fontes de energias renováveis eólica e solar. Estes parâmetros são a velocidade do ar ou do vento (U_{∞}), a irradiação solar expressa pela irradiação normal direta (DNI) e a temperatura ambiente (T_A).

A irradiação normal direta (DNI) consiste no parâmetro solar determinante na conversão de energia em sistemas Dish-Stirling, pois compreende a parcela da irradiação global efetivamente empregada na conversão de energia em concentradores solares (Blanc et al., 2014; Lovegrove e Stein, 2012). Portanto, o projeto solar do sistema híbrido desenvolvido nesta dissertação será fundamentado na irradiação normal direta (DNI), premissa igualmente adotada por Mantilha (2017) em sistemas Dish-Stirling.

A velocidade do vento (U_{∞}) consiste no parâmetro eólico determinante na conversão de energia em turbinas eólicas, pois este representa a energia cinética disponível ao sistema de conversão de energia eólica (Manwell et al., 2010; Burton et al., 2011). Deste modo, a velocidade do vento (U_{∞}) é o fator preponderante na potência eólica disponível (P_{ED}) as turbinas (Manwell et al., 2010).

A irradiação normal direta (DNI) e velocidade do vento (U_{∞}) são determinadas pelas condições climáticas e características intrínsecas à localização geográfica (Lovegrove e Stein, 2012; Lyatkher, 2013), portanto a definição da localização da instalação do sistema híbrido eólico solar deve ser realizada observando a disponibilidade eólica e solar local.

A análise concernente a seleção da localização geográfica aplicada ao projeto do sistema híbrido eólico solar se restringiu a localidades brasileiras. O Brasil apresenta bons níveis de irradiação normal direta (DNI) e localizações com altas velocidades do vento (U_{∞}), entretanto

sua área é muito extensa, apresentando apreciável variação de latitude, assim como diversidades topográficas e climáticas, resultando em variações significativas nos recursos eólicos e solares ao longo de seu território (Pereira et al., 2017; CEPEL, 2017). A análise envolvendo diversas localidades brasileiras foi fundamentada no Atlas Solar e Atlas Eólico, disponível 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 3.10, apresenta alta irradiação normal direta média diária (DNI_D), especificada em $5,46 \text{ kWh/m}^2\text{dia}$ por Energydata.info (2018), conforme figura A.1, integrada ao anexo A.

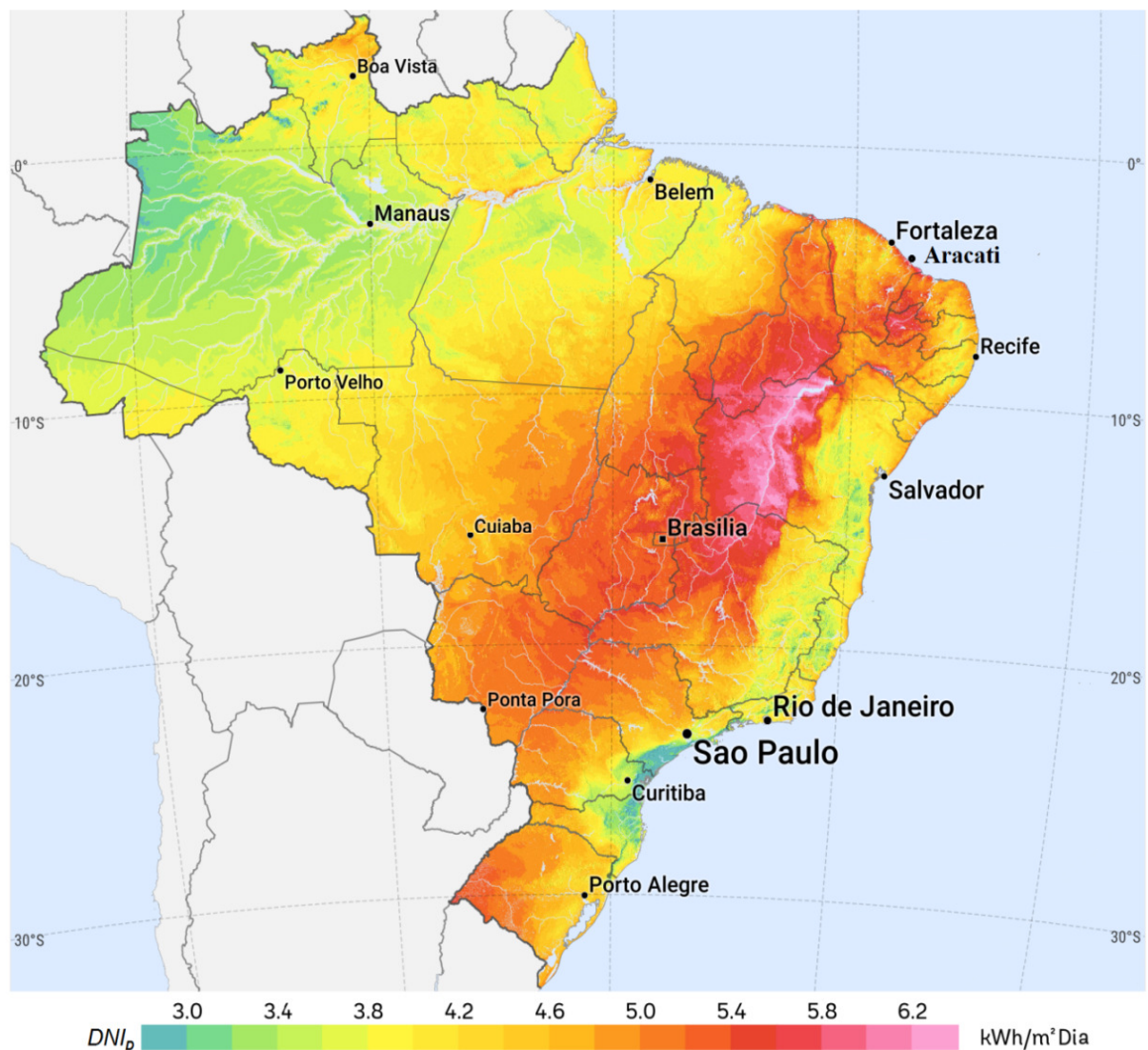


Figura 3.10 - Atlas solar brasileiro - Irradiação normal direta média diária (DNI_D)
 Fonte: Adaptado de Energydata.info (2018)

A irradiação normal direta (DNI) é definida pela potência solar (kW) disponível numa área unitária (m^2) durante um determinado intervalo de tempo em horas por dias (h/dia) ou horas

por ano (h/ano) (Lovegrove e Stein, 2012). Portanto, considerando o conceito de irradiância solar, a irradiação normal direta média diária (DNI_D) em kWh/m²/dia 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, 2012). Por conseguinte, 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) de 5,46 kW/m² ao longo de seu período de irradiação solar médio diário (T_{DIR}). Entretanto, a interpretação da irradiação normal direta média diária (DNI_D) fundamentada na negligência efetiva do período de irradiação solar médio diário (T_{DIR}), estabelece ao município de Aracati a irradiância solar média diária (I_D) de 1 kW/m² durante o período de irradiação de 5,46 horas por dia. Os projetos de concentradores solares demandam impreterivelmente a aplicação efetiva do período de irradiação solar médio diário (T_{DIR}) (Lovegrove e Stein, 2012). Esta premissa torna o projeto de concentradores solares adequado à disponibilidade solar local, diferentemente do projeto fundamentado na negligência efetiva do período de irradiação solar médio diário (T_{DIR}) (Lovegrove e Stein, 2012).

A irradiação normal direta média diária (DNI_D) 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 (DNI_D) especificada em Energydata.info (2018) é estabelecida fundamentalmente 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 operam segundo valores mínimos de irradiância solar denominados “*cut-in irradiance*” (Lovegrove e Stein, 2012). 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 de sistemas de conversão de energia solar. Por conseguinte, a irradiação normal direta média diária (DNI_D) especificada em 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.

O período efetivamente aplicado ao projeto de sistema de conversão de energia solar 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 solar (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 3.11.

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, comumente denominado pela abreviatura SAM (NREL, 2018).

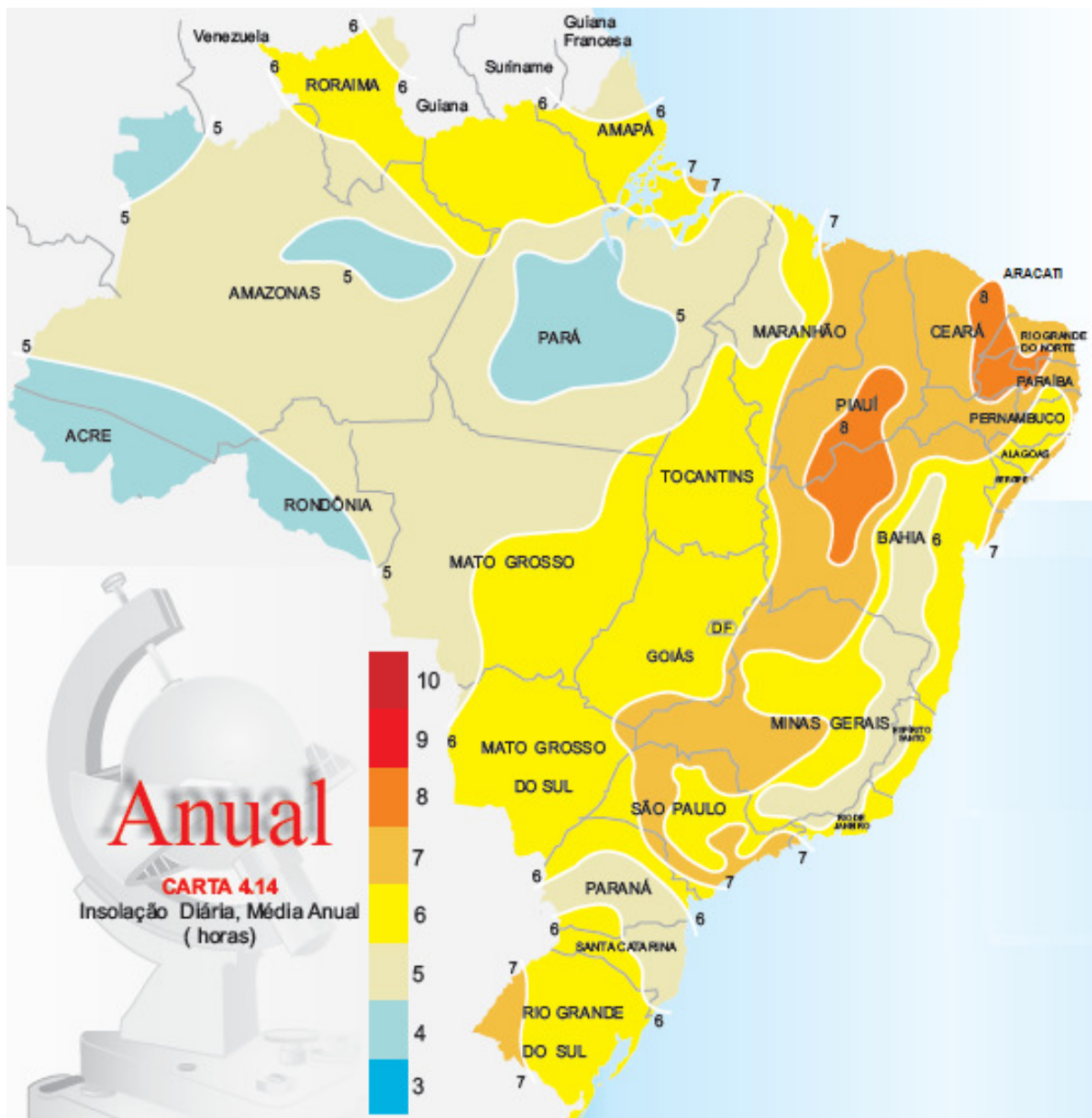


Figura 3.11 - Insolação diária média anual
Fonte: Adaptado de CRESESB (2000)

O SAM elabora diagramas de distribuição de irradiância solar média horária (I_H) ao longo do dia abrangendo localidades de todo o mundo (NREL, 2018). Portanto, este software foi aplicado ao estabelecimento do diagrama de distribuição da irradiância solar média horária (I_H) ao longo do dia concernente ao município de Aracati, o qual é apresentado na figura 3.12.

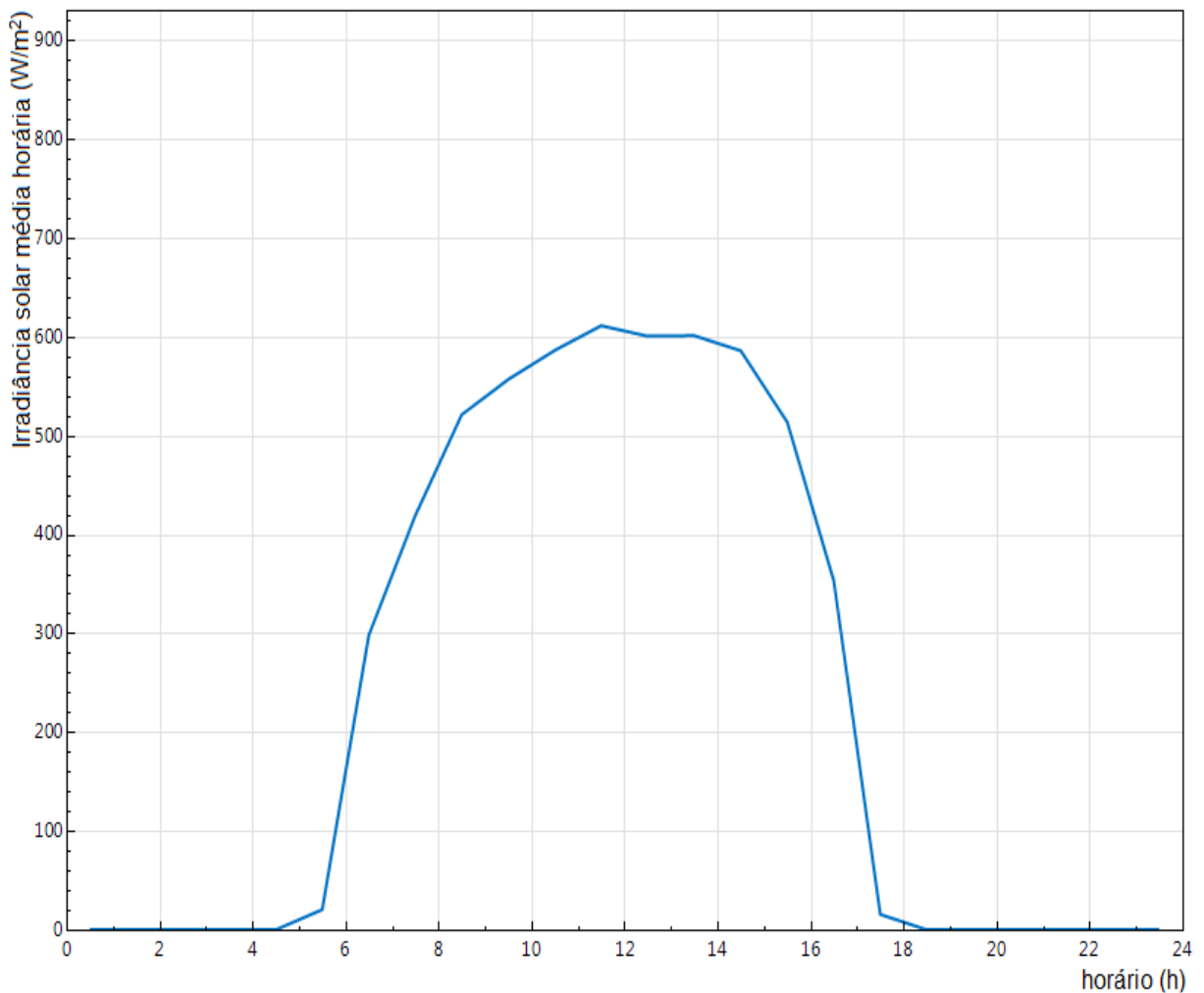


Figura 3.12 - Diagrama de distribuição da irradiância solar média horária (I_H) em Aracati
Fonte: Adaptado de SAM (2018)

O software SAM, adicionalmente ao diagrama apresentado na figura 3.12, disponibilizou os dados numéricos concernentes a distribuição de irradiância solar média horária (I_H) ao longo do dia no município de Aracati. A tabela 3.1 apresenta a irradiância solar média horária restrita ao período de insolação (I_{HIS}) no município de Aracati.

A irradiação normal direta média diária inerente ao período de insolação (DNI_{DIS}) foi estabelecida pelo somatório dos valores da irradiância solar média horária restrita ao período de insolação (I_{HIS}) contido na tabela 3.1.

A irradiância solar efetivamente aplicada ao projeto do concentrador híbrido dish, a qual estabelece a especificação da potência instalada intrínseca ao sistema de conversão de energia solar, foi definida segundo critério adotado por Mantilha (2017). Este critério estabelece a especificação da irradiância solar de projeto (I_p) fundamentada no valor numérico da irradiância solar média horária restrita ao período de insolação (I_{HIS}) proeminente, acrescido de vinte por cento.

Tabela 3.1 - Irradiância solar média horária restrita ao período de insolação (I_{HIS}) em Aracati

Horário	I_{HIS} [W/m ²]
8:30	521,20
9:30	556,87
10:30	586,29
11:30	611,22
12:30	600,61
13:30	601,14
14:30	585,83
15:30	513,48

A irradiância solar média diária restrita ao período de insolação (I_{DIS}), em kW/m², aplicada a determinação da energia elétrica anual gerada pelo sistema de conversão de energia solar, é estabelecida pela relação entre 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 3.1 (Lovegrove e Stein, 2012).

$$I_{DIS} = \frac{DNI_{DIS}}{T_{DIS}} \quad (3.1)$$

O SAM determina a irradiação normal direta média diária (DNI_D) fundamentada na distribuição da irradiância solar média horária (I_H) ao longo do dia, estabelecendo ao município de Aracati o valor de 5,69 kWh/m²dia (NREL, 2018). A variação na irradiação normal direta média diária (DNI_D) do município de Aracati apresentada pelas referências SAM e Energydata.info (2018) constitui-se num em aproximadamente 4%. Por conseguinte, a irradiância solar média horária (I_H) ao longo do dia aplicada nesta dissertação constitui-se numa base de dados análoga ao Energydata.info (2018).

O fator de capacidade intrínseco ao projeto de sistemas Dish-Stirling (F_{CSP}) é fundamentalmente estabelecido pela relação entre a energia gerada (kWh) pelo sistema durante sua operação no ponto de projeto e a energia teórica gerada (kWh) pelo mesmo

sistema em sua plena capacidade de conversão (Lovegrove e Stein, 2012). Portanto, este fator demonstra efetivamente o percentual inerente ao tempo em que o sistema opera sob sua plena capacidade de conversão de energia solar (Lovegrove e Stein, 2012). O fator de capacidade de projeto (F_{CSP}) considera unicamente a irradiância solar local na determinação da energia teórica gerada (kWh) pelo sistema durante sua operação (Lovegrove e Stein, 2012). O fator de capacidade concernente ao projeto de sistemas Dish-Stirling (F_{CSP}) sem armazenamento de energia apresenta valor numérico de aproximadamente 25% (Lovegrove e Stein, 2012).

O fator de capacidade médio anual teórico de sistemas Dish-Stirling (F_{CSMAT}) é definido pela relação estabelecida entre a energia anual real gerada (kWh) pelo sistema durante sua operação e a energia anual gerada (kWh) pelo mesmo sistema em sua plena capacidade de conversão, considerando os períodos reais de inatividade e produtividade do sistema de conversão de energia solar (Lovegrove e Stein, 2012). Portanto, este fator de capacidade sem armazenamento de energia, considerando efetivamente o período de inatividade do sistema devido ao posicionamento do sol, efeitos climáticos, manutenção, períodos noturnos, nublados ou chuvosos do dia apresenta valor numérico de aproximadamente 20% (Lovegrove e Stein, 2012).

A relação estabelecida entre os valores apresentados por Lovegrove e Stein (2012) concernentes ao fator de capacidade solar médio anual teórico de sistemas Dish-Stirling (F_{CSMAT}) e o fator de capacidade intrínseco ao projeto de sistemas Dish-Stirling (F_{CSP}) resulta no valor numérico de 0,8. Portanto, esta relação estabelece invariavelmente a aplicação do decréscimo percentual de vinte por cento no valor atribuído ao fator de capacidade intrínseco ao projeto de sistemas Dish-Stirling (F_{CSP}) para a estimativa do fator de capacidade solar médio anual de sistemas Dish-Stirling (F_{CSMAT}).

Segundo estudos desenvolvidos por Mantilha (2017), o fator de capacidade solar intrínseco ao projeto de sistemas Dish-Stirling (F_{CSP}) no município de Icapuí, localizado a quarenta e nove quilômetros de Aracati conforme figura B.1 integrada ao anexo B, compreende o valor de 23,1%. Portanto, fator de capacidade solar médio anual teórico de sistemas Dish-Stirling (F_{CSMAT}), fundamentado nos estudos desenvolvidos por Mantilha (2017) concernente ao município de Icapuí, apresenta valor numérico de 18,4%, conforme premissa estabelecida por Lovegrove e Stein (2012).

O SAM desenvolve simulações de projetos de sistemas Dish-Stirling, determinando o fator de capacidade solar médio anual deste sistema de conversão de energia (F_{CSMAS}) fundamentado em informações de disponibilidade solar local. A simulação estabelecida pelo

SAM concernente à localização de Aracati apresentou fator de capacidade solar médio anual (F_{CSMAS}) de 16,6%, conforme figura B.2, do anexo B.

O município de Aracati está localizado em uma região de grande potencial eólico (RENAI, 2010), conforme mostrado na figura 3.13. O município de Aracati apresenta três usinas eólicas, respectivamente denominadas Canoa Quebrada, Bons Ventos e Unacel (RENAI, 2010).

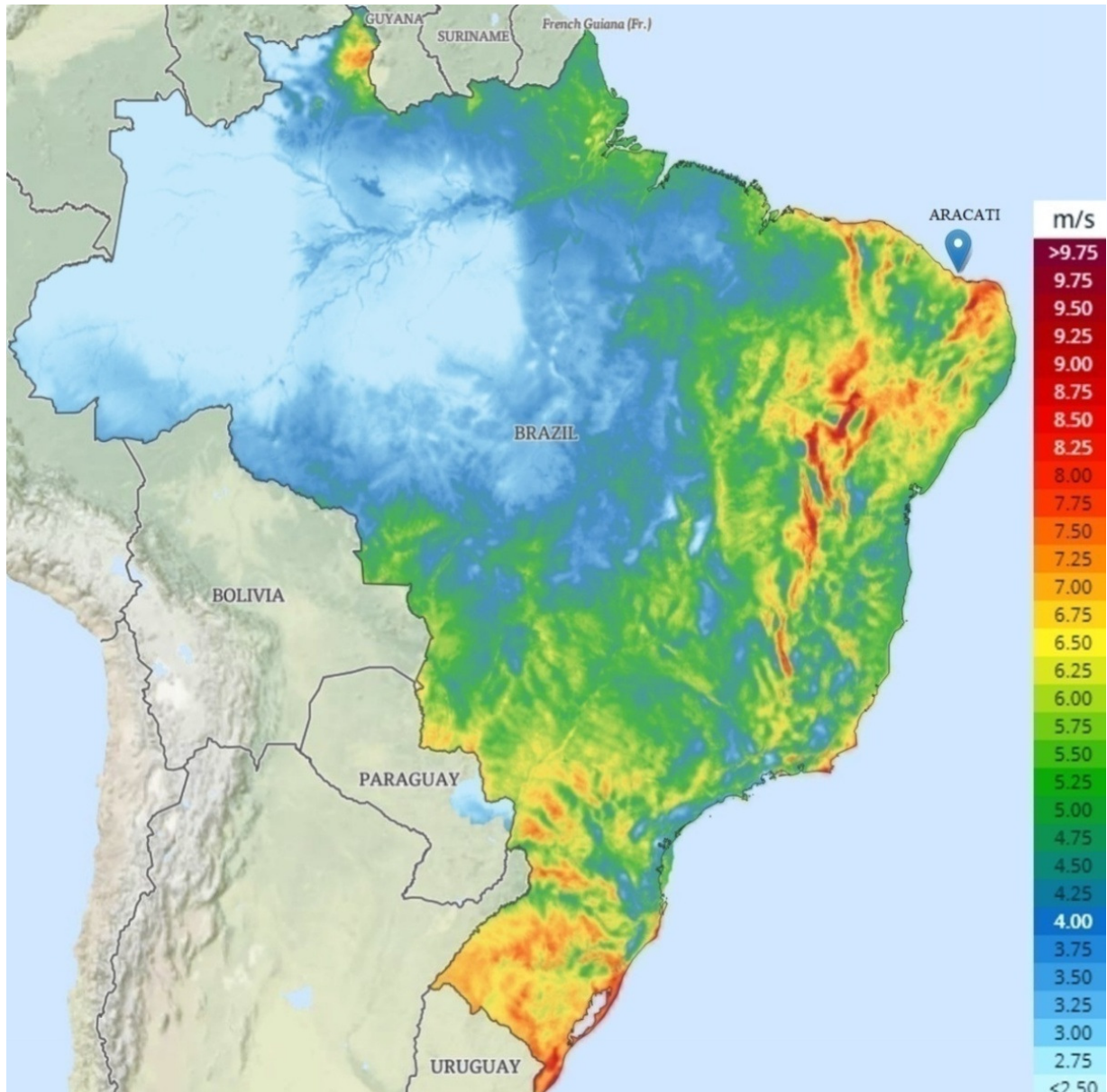


Figura 3.13 - Atlas eólico brasileiro – Velocidade dos ventos (U_{∞})
 Fonte: Adaptado de Energydata.info (2018)

A usina de Canoa Quebrada apresenta vinte e duas turbinas eólicas, potência instalada de 57MW e fator de capacidade (F_{CE}) estimado em 41,17% (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 39,68% (RENAI, 2010). A usina de Unacel apresenta quinze turbinas eólicas, potência instalada de 31MW e fator de capacidade (F_{CE}) estimado em 40,00% (RENAI, 2010). O valor médio relativo aos fatores de capacidade (F_{CE}) estimados para as três usinas no município de Aracati (40,28%) estabelece o fator de capacidade eólico (F_{CE}) adotado nesta dissertação para o sistema híbrido eólico solar. O fator de capacidade (F_{CE}) médio do estado de Ceará é de 35% (RENAI, 2010), portanto o valor médio dos fatores de capacidade (F_{CE}) das três usinas do município de Aracati (40,28%) demonstra o potencial eólico proeminente desta cidade.

As velocidades dos ventos (U_{∞}) no município de Aracati foram determinadas por Energydata.info (2018), conforme demonstrado na figura C.1 integrada ao anexo C, referindo-se as velocidades médias anuais ($U_{\infty M}$) compreendida em uma área de 100 km². Por tratar-se de uma área extremamente extensa, verificam-se variações nas velocidades médias anuais ($U_{\infty M}$) ao longo desta região. Portanto, a referência Energydata.info (2018) representa as variações de velocidades médias anuais ($U_{\infty M}$), expressando sua frequência (%) ao longo desta área através de diagramas. A referência Energydata.info (2018) apresenta três diagramas de velocidades médias anuais dos ventos para alturas de 50 metros, 100 metros e 200 metros. Estes três diagramas são mostrados nas figuras 3.14, 3.15 e 3.16 respectivamente. As velocidades médias anuais ($U_{\infty M}$) consideradas nos três diagramas aplicadas ao projeto do concentrador híbrido dish 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 eólico do sistema híbrido deve aplicar a velocidade média anual dos ventos ($U_{M\infty}$) à altura de 8 metros do solo, dimensão compreendida pela distância estabelecida entre o centro concentrador híbrido dish e o solo. As velocidades médias anuais dos ventos ($U_{M\infty}$) em Aracati foram obtidas de Energydata.info (2018) à 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 estabelecida 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.

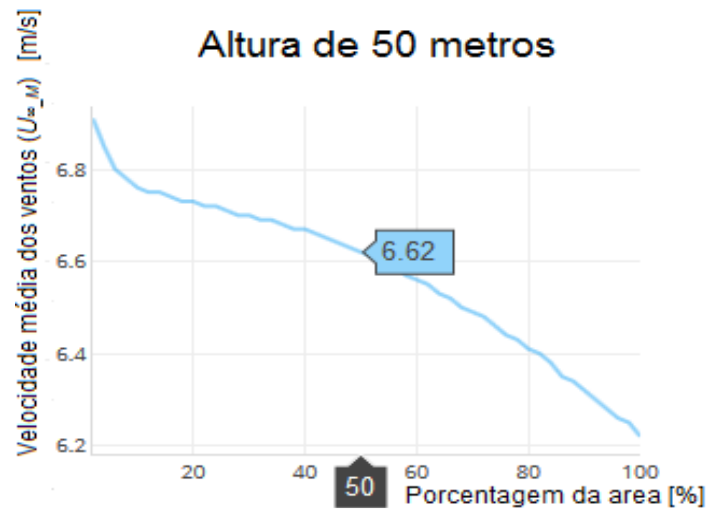


Figura 3.14 - Diagrama frequência de velocidades médias dos ventos (U_{∞_M}) à 50 m (H_R)
 Fonte: Adaptado de Energydata.info (2018)

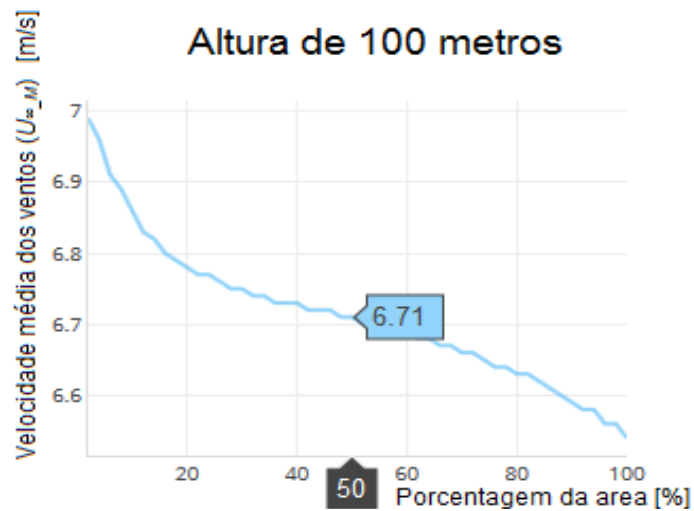


Figura 3.15 - Diagrama frequência de velocidades médias dos ventos (U_{∞_M}) à 100 m (H_R)
 Fonte: Adaptado de Energydata.info (2018)

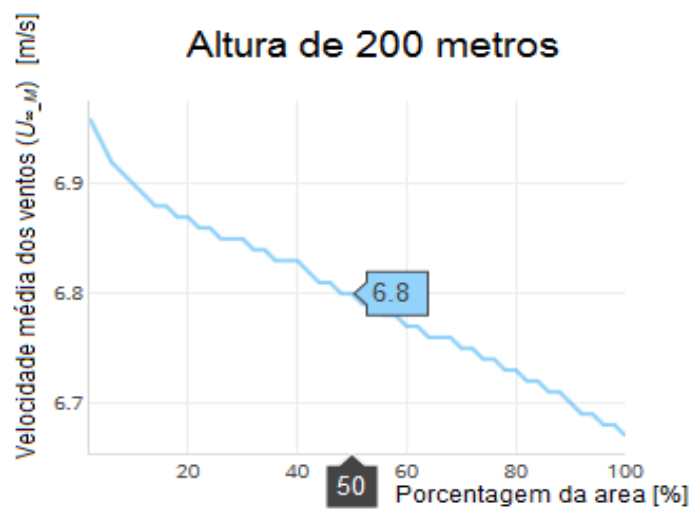


Figura 3.16 - Diagrama frequência de velocidades médias dos ventos (U_{∞_M}) à 200 m (H_R)
 Fonte: Adaptado de Energydata.info (2018)

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 3.2 (Manwell et al., 2010).

$$\frac{U_Z}{U_R} = \left(\frac{H_Z}{H_R} \right)^{\alpha_P} \quad (3.2)$$

Os estudos incipientes relativos ao fator de correlação da lei de potência (α_P) demonstraram que sob certas condições seu valor numérico é igual a 1/7, indicando uma correspondência entre perfis de vento e fluxo sobre placas planas (Manwell et al., 2010). Entretanto, na prática verificou-se que fator de correlação da lei de potência (α_P) é altamente variável em função de parâmetros como elevação, hora do dia, estação do ano, natureza do terreno, velocidade do vento, temperatura e vários parâmetros de mistura térmicos e mecânicos (Manwell et al., 2010). Portanto, diversas expressões são aplicadas na determinação do fator de correlação da lei de potência (α_P) (Manwell et al., 2010). Especialistas em energia eólica afirmam que a determinação do fator de correlação da lei de potência (α_P) deve considerar a análise dos resultados relativos a este fator que melhor se ajuste aos demais dados locais de ventos (Manwell et al., 2010). Portanto a determinação do fator de correlação da lei de potência (α_P) relativo ao município de Aracati foi realizada através da aplicação da lei da potência (equação 3.2) para alturas de 200 e 100 metros e 100 e 50 metros. A aplicação da lei da potência em ambas as condições implica na determinação do fator de correlação da lei de potência (α_P), pois as velocidades médias anuais dos ventos ($U_{M\infty}$) e alturas (H) para as alturas de 50, 100 e 200 metros são conhecidas. Após determinado o fator de correlação da lei de potência (α_P) para o município de Aracati, este foi aplicado na determinação da velocidade média anual dos ventos ($U_{M\infty}$) a altura de 8 metros.

A determinação da velocidade média anual dos ventos ($U_{M\infty}$) a altura de 8 metros foi realizada através da aplicação da equação 3.2, considerando as variáveis de referência (U_R e H_R) compreendidas pelos dados de Energydata.info (2018) à uma altura de 50 metros, altura “z” (H_Z) de 8 metros e o fator de correlação da lei de potência (α_P) para a cidade de Aracati.

3.3. PROJETO SOLAR (SISTEMA HÍBRIDO E DISH-STIRLING CORRESPONDENTE)

O projeto solar do sistema híbrido foi fundamentado na metodologia de dimensionamento geométrico e térmico de sistemas Dish-Stirling propostos por Hafez et al. (2016) e Castellanos et al. (2017). Esta metodologia consiste no dimensionamento de parâmetros geométricos e térmicos de sistemas Dish-Stirling a partir das condições climáticas (irradiação normal direta média diária (DNI_D), velocidade do vento (U_∞) e temperatura ambiente (T_A)) e características construtivas do concentrador dish (diâmetro (D_C), ângulo de curvatura do concentrador (φ_C) e material do refletor).

A temperatura ambiente (T_A) aplicada ao dimensionamento geométrico e térmico deve ser estabelecida a partir de informações meteorológicas relativas à localização da instalação do sistema híbrido eólico solar. Deste modo, a temperatura ambiente (T_A) aplicada ao projeto corresponde a temperatura ambiente média anual relativa ao município de Aracati, obtida de Energydata.info (2018), conforme demonstrado na figura A.1 integrada ao anexo A. Em suma, a temperatura ambiente (T_A) aplicada ao dimensionamento geométrico e térmico relativo ao município de Aracati é de 300,45 K.

A metodologia de dimensionamento geométrico e térmico de sistemas Dish-Stirling demanda a aplicação da potência solar local disponível em quilowatts por metro quadrado (kW/m^2), compreendida pela irradiância solar (I), a qual é estabelecida através da irradiação normal direta média diária (DNI_D). A irradiância solar (I) aplicada ao projeto solar do concentrador híbrido dish consiste na irradiância solar média diária restrita ao período de insolação (I_{DIS}) em seu ponto de funcionamento e na irradiância solar de projeto (I_P) em seu ponto de projeto.

O diâmetro do concentrador dish (D_C), característica construtiva associada à irradiância solar (I), determina a potência disponível no receptor de sistemas Dish-Stirling (Hafez et al., 2016). O diâmetro de concentradores dish (D_C) apresenta usualmente valores entre três e quinze metros (Hafez et al., 2016). Portanto, o diâmetro do concentrador híbrido dish foi arbitrado em seis metros, sob a premissa que o sistema híbrido idealizado seja empenhado ao atendimento de demandas que estabelecem a aplicação deste sistema de conversão sob o formato de usina solar eólica.

A definição do material do refletor constitui-se num dos parâmetros mais importantes no projeto de sistemas Dish-Stirling (Hafez et al., 2016). As propriedades intrínsecas dos materiais aplicados ao refletor são a reflexibilidade (δ_R) e a emissividade (ε) (Hafez et al.,

2016). A reflexibilidade (δ_R) determina efetivamente a porcentagem de irradiância solar (I) disponível ao receptor, portanto constitui-se determinante no rendimento deste sistema de conversão de energia (Hafez et al., 2016). O alumínio consiste no material especificado ao refletor do concentrador híbrido dish, pois este é amplamente aplicado em concentradores solares dish, apresentando reflexibilidade (δ_R) de 0,86 e emissividade (ε) de 0,14, conforme Hafez et al. (2016).

Os cálculos de dimensionamento geométrico e térmico de sistemas Dish-Stirling envolvem a aplicação de diversos fatores, constantes e coeficiente. Os valores numéricos atribuídos as grandezas descritas na tabela 3.2, foram obtidos dos estudos desenvolvidos por Castellanos et al. (2017), Lovegrove e Stein (2012) e Gil et al. (2015).

Tabela 3.2 - Fatores, constantes e coeficientes aplicados ao projeto solar

Fatores, constantes e coeficientes	Símbolo	Unidade	Valor numérico
Aceleração da gravidade	g	[m/s ²]	9,81
Constante de Stefan-Boltzmann	σ_B	[W/m ² K ⁴]	5,6697 x 10-8
Fator de deterioração	F_D		0,85
Fator de resfriamento	F_R		0,5
Absortância do absorvedor	α_{abs}		0,80
Constante Stirling	K_S		0,5

Fonte: Castellanos et al. (2017)

O ângulo de curvatura do concentrador (φ_C) é uma característica geométrica de grande relevância, pois determina a irradiância solar (I) disponível ao sistema de conversão de energia e influência na fabricação do concentrador dish (Hafez et al., 2016). O ângulo de curvatura do concentrador (φ_C) é definido pelo ângulo compreendido entre o ponto focal e a borda do concentrador, conforme mostrado na figura 3.17 (Hafez et al., 2016).

O valor aplicado ao ângulo de curvatura do concentrador (φ_C) apresenta variações de acordo com o projeto do concentrador (Hafez et al., 2016). A figura 3.17 apresenta perfis de concentradores solares dish com ângulos de curvatura do concentrador (φ_C) variando entre 15° e 150°. O valor do ângulo de curvatura do concentrador (φ_C) aplicado ao projeto foi 27°, pois sua hibridização determina a inclusão de pás, as quais acompanham o perfil do refletor. Portanto, os ângulos de curvatura do concentrador (φ_C) determinam a curvatura da pá, e comumente as pás de rotores eólicos não apresentam este tipo de curvatura. Deste modo, foi

adotado um pequeno ângulo de curvatura do concentrador (φ_c) para que a curvatura da pá seja minimizada.

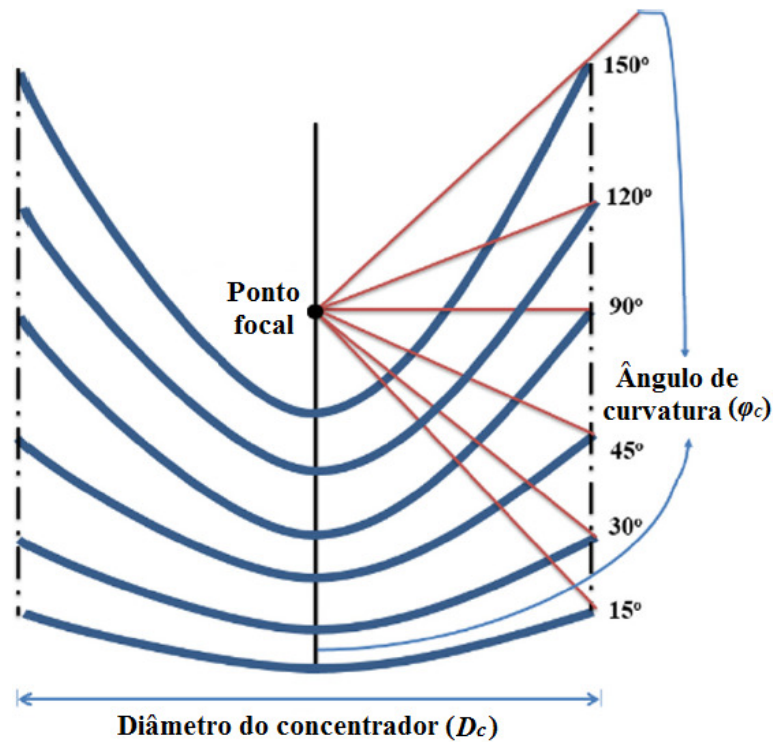


Figura 3.17 - Diâmetro (D_c), ângulos de curvatura (φ_c) e ponto focal do concentrador
Fonte: Adaptado de Hafez et al. (2016)

A distância focal (f) em concentradores dish é compreendida pela dimensão entre o vértice do parabolóide e o ponto focal (Hafez et al., 2016), conforme mostrado na figura 3.18.

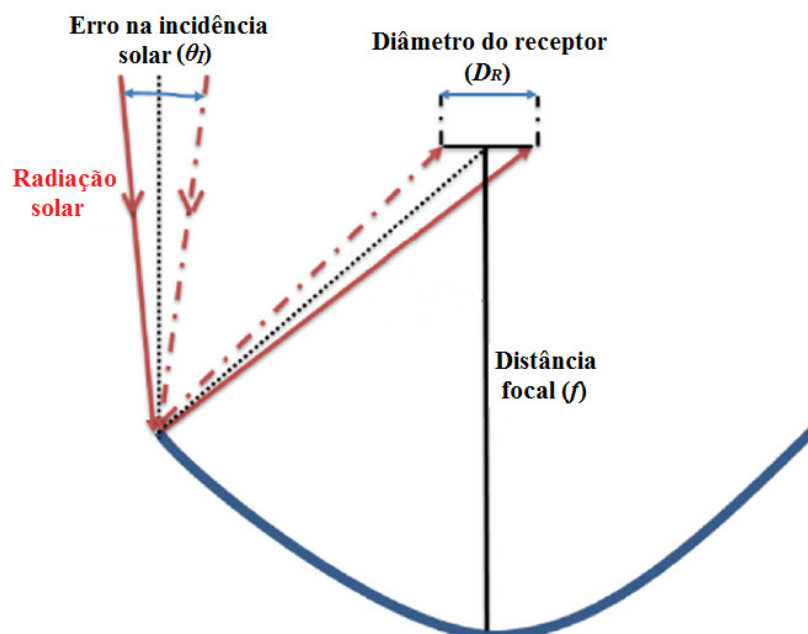


Figura 3.18 - Diâmetro do receptor (D_R), distância focal (f) e erro na incidência solar (θ_i)
Fonte: Adaptado de Hafez et al. (2016)

A distância focal (f) é determinada pela equação 3.3.

$$f = \frac{D_C}{4 \tan\left(\frac{\varphi_C}{2}\right)} \quad (3.3)$$

O rendimento do gerador elétrico (η_{GE}) adotado neste projeto é de 90%, conforme Castellanos et al. (2017). A condutividade térmica do ar (k_{AR}) e a viscosidade cinemática do ar (ν_{AR}) foram determinadas através de tabelas apresentadas por Bergman et al. (2011), as quais relacionam as propriedades termofísicas do ar e sua temperatura.

O erro na incidência solar (θ_I), conforme mostrado na figura 3.18, compreende o erro angular resultante (σ_R) decorrente dos erros intrínsecos aos sistemas Dish-Stirling ((σ_E) , (σ_{SR}) , (σ_{MR}) , (σ_{AR}) , (σ_{RE}) e (σ_{Sol})) que efetivamente prejudicam o rastreamento solar (Lee et al., 2009; Hafez et al., 2016; Castellanos et al., 2017). Os erros intrínsecos aos sistemas Dish-Stirling e seus respectivos valores em observância ao desvio padrão de erro, são elencados na tabela 3.3.

Tabela 3.3 - Erros intrínsecos aos sistemas Dish-Stirling

Denominação	Simbologia	Valor numérico [mrad]
Erro relativo à estrutura	σ_E	7
Erro relativo ao sensor de rastreamento	σ_{SR}	2
Erro relativo aos motores de rastreamento	σ_{MR}	2
Erro relativo ao alinhamento do receptor	σ_{AR}	2
Erro relativo à reflexão do espelho	σ_{RE}	0,5
Erro relativo à dimensão do Sol	σ_{Sol}	2,8

Fonte: Castellanos et al. (2017)

O erro angular resultante (σ_R) ou erro na incidência solar (θ_I) decorrente dos erros intrínsecos aos sistemas Dish-Stirling é determinado pela equação 3.4 (Castellanos et al., 2017).

$$\theta_I = \sigma_R = \sqrt{(\sigma_E)^2 + (\sigma_{SR})^2 + (\sigma_{MR})^2 + (\sigma_{AR})^2 + (\sigma_{RE})^2 + (\sigma_{Sol})^2} \quad (3.4)$$

O erro na incidência solar (θ_i) determina o diâmetro do receptor (D_R), conforme figura 3.18 (Hafez et al., 2016). O diâmetro do receptor (D_R) é definido pelo diâmetro do ponto focal do concentrador dish, conforme mostrado na figura 3.18 (Hafez et al., 2016). O diâmetro do receptor é determinado pela equação 3.5 (Hafez et al., 2016).

$$D_R = \frac{f^2 \theta_i}{\cos \varphi_C (1 + \cos \varphi_C)} \quad (3.5)$$

A área de abertura do concentrador solar dish (A_{CS}) é estabelecida pela área projetada da superfície do concentrador sobre a qual a radiação solar incide (Hafez et al., 2016). A área de abertura do concentrador solar dish é determinada pela equação 3.6 (Hafez et al., 2016).

$$A_{CS} = \frac{\pi D_C^2}{4} \quad (3.6)$$

A área de abertura do concentrador híbrido dish (A_{CH}), tal como a área de abertura do concentrador solar dish (A_{CS}), compreende a área projetada da superfície do concentrador sobre a qual a radiação solar incide. O concentrador híbrido dish apresenta lacunas em seu refletor, portanto a área de abertura do concentrador híbrido dish (A_{CH}) é conceitualmente menor quando comparado a área de abertura de um concentrador solar dish (A_{CS}) de mesmo diâmetro. A área compreendida pelas lacunas estabelece efetivamente a diferença entre as áreas de abertura de concentradores híbridos e solares de mesmo diâmetro. Portanto, a área de abertura do concentrador híbrido dish é estabelecida pela área de abertura do concentrador solar dish (A_{CS}) de mesmo diâmetro excluída da área concernente a área projetada das lacunas (A_{PL}).

A área de abertura do concentrador híbrido dish (A_{CH}) é determinada pela equação 3.7, a qual apresenta primeira parcela constituída pela área de abertura do concentrador solar dish (A_{CS}) de mesmo diâmetro e segunda parcela constituída pela área projetada relativa às lacunas (A_{PL}). A área projetada relativa às lacunas (A_{PL}) é compreendida pelo número de lacunas (N_{LAC}) multiplicado pela área retangular das lacunas, estabelecida pelo produto de sua altura (h) e largura (l).

$$A_{CH} = \frac{\pi D_C^2}{4} - (N_{LAC} hl) \quad (3.7)$$

A área de abertura do concentrador híbrido dish (A_{CH}) e a área de abertura do concentrador solar dish (A_{CS}) são efetivamente áreas de abertura de concentradores dish particularizados segundo suas características geométricas. Portanto, a formulação subsequente intrínseca a metodologia aplicará a denominação de área de abertura do concentrador dish (A_C), abrangendo efetivamente a área de abertura do concentrador híbrido dish (A_{CH}) e a área de abertura do concentrador solar dish (A_{CS}).

A área do receptor (A_R) é determinada analogamente a área de abertura do concentrador dish (A_C) através da equação 3.8 (Hafez et al., 2016).

$$A_R = \frac{\pi D_R^2}{4} \quad (3.8)$$

A razão de área ou concentração geométrica (C_G) é definida como a razão entre a área de abertura do concentrador e a área de abertura do receptor (Hafez et al., 2016). O projeto de um concentrador deve apresentar impreterivelmente razão de concentração geométrica superior a 10 (Hafez et al., 2016). A figura 3.19 mostra o diagrama de razão de concentração geométrica (C_G) em função da temperatura no receptor (T_R) para diversos modelos de concentradores solares.

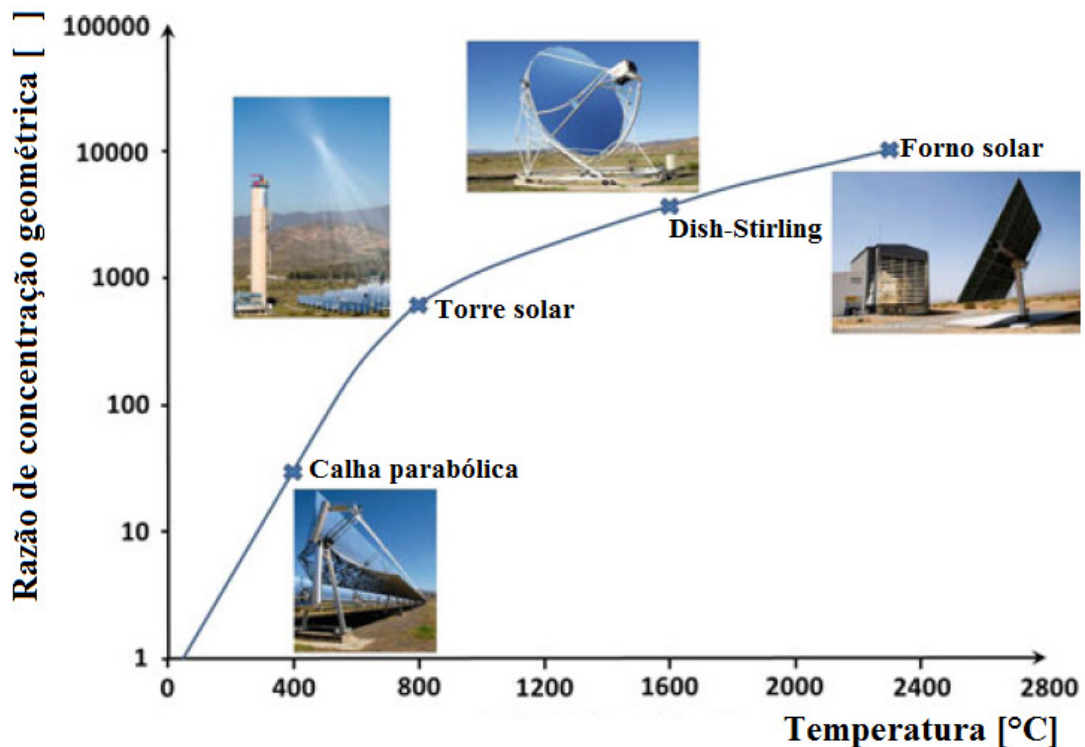


Figura 3.19 - Diagrama razão de concentração geométrica (C_G) x temperatura no receptor (T_R)
Fonte: Adaptado de Roldán (2017)

A razão de concentração geométrica teórica (C_{GT}) é determinada pela equação 3.9 (Hafez et al., 2016).

$$C_{GT} = \frac{A_C}{A_R} \quad (3.9)$$

A equação 3.9 desconsidera os efeitos das imperfeições, variações de contorno e curvatura da superfície refletora do concentrador, erros de rastreamento solar e a aplicação de ângulos de curvatura do concentrador (φ_C) inferiores a 45° . Estes fatores estabelecem decréscimos no valor da razão de concentração geométrica teórica (C_{GT}), conforme Castellanos et al. (2017). Segundo Lovegrove e Stein (2012), exceto pela variação de ângulos de curvatura (φ_C) °, estes fatores atribuem decréscimos de 20% da concentração geométrica teórica (C_{GT}). Portanto, foi aplicado o fator de correção de 0,8 na razão de concentração geométrica teórica (C_{GT}), estabelecendo a razão de concentração geométrica (C_G), conforme equação 3.10.

$$C_G = 0,8 C_{GT} \quad (3.10)$$

O produto entre os fatores de sombreamento (F_S) e interceptação (Γ), aplicado na determinação do rendimento do concentrador dish (η_C), apresenta valor numérico estabelecido pela equação 3.11.

$$F_S \Gamma = \frac{\text{sen}^2(\varphi_C) + \text{sen}^2(\varphi_S)}{4 \tan\left(\frac{\varphi_C}{2}\right)} \quad (3.11)$$

Os ângulos de sombreamento (φ_S), comumente aplicados ao dimensionamento de sistemas Dish-Stirling, compreendem valores numéricos entre 0° e 15° (Lovegrove e Stein, 2012). Portanto, fundamentado neste intervalo, o valor aplicado aos projetos desenvolvido nesta dissertação consiste em 14° .

O rendimento do concentrador dish (η_C) determina a quantidade de energia solar transferida ao receptor. O valor numérico do rendimento do concentrador (η_C) aplicado ao sistema de conversão é determinado pela equação 3.12 (Castellanos et al., 2017).

$$\eta_C = \cos \theta_I \delta_R F_S \Gamma \quad (3.12)$$

A constante de atenuação (K_{ATT}), aplicada à determinação da temperatura do receptor, é determinada através da equação 3.13 (Castellanos et al.,2017).

$$K_{ATT} = \eta_C F_D F_R \quad (3.13)$$

O receptor recebe energia solar concentrada, proporcionando temperaturas acima de 1.000°C em sua cavidade (Baharoon et al.,2015). A temperatura do receptor (T_R) é determinada através da equação 3.14 (Castellanos et al.,2017).

$$T_R = \sqrt[4]{\left(\frac{I C_G \alpha_{ABS}}{\sigma_B \varepsilon}\right)} K_{ATT} \quad (3.14)$$

A temperatura de filme (T_F) aplicada ao estudo da transferência de calor por convecção natural no receptor é definida pela média entre a temperatura do receptor (T_R) e a temperatura ambiente (T_A) (Bergman et al., 2011). Portanto, a temperatura de filme (T_F) é determinada pela equação 3.15 (Bergman et al., 2011).

$$T_F = \frac{T_R + T_A}{2} \quad (3.15)$$

O coeficiente de expansão volumétrico do ar (β_{AR}) tem seu valor numérico determinado pelo inverso da temperatura de filme (T_F), sendo determinado pela equação 3.16.

$$\beta_{AR} = \frac{1}{T_F} \quad (3.16)$$

O número de Grashof (Gr) é uma grandeza adimensional que estabelece a razão entre as forças de sustentação e forças viscosas (Bergman et al., 2011). O número de Grashof (Gr) é aplicado na determinação do número de Nusselt (Nu) através da equação 3.18. O número de Grashof (Gr) é determinado através da equação 3.17 (Bergman et al., 2011).

$$Gr = \frac{g \beta_{AR} (T_R - T_A) D_R^2}{\nu_{AR}^2} \quad (3.17)$$

O número de Nusselt (Nu) é uma grandeza adimensional que estabelece a razão entre a transferência de calor por convecção e a transferência de calor por condução no fluido (Bergman et al., 2011). O número de Nusselt (Nu) é aplicado na determinação do coeficiente de transferência de calor por convecção natural (h_N). O número de Nusselt (Nu) é determinado através da equação 3.18 (Castellanos et al.,2017).

$$Nu = 0,88 Gr^{\frac{1}{3}} \left(\frac{T_R}{T_A} \right)^{0,18} \cos \psi_R^{2,47} \left(\frac{D_R}{D_{CAV}} \right)^{1,12-0,982 \left(\frac{D_R}{D_{CAV}} \right)} \quad (3.18)$$

O diâmetro da cavidade do receptor (D_{CAV}) aplicado aos projetos desenvolvidos nesta dissertação foi fundamentado na relação estabelecida na metodologia de projetos e modelamento térmico de cavidade de receptores de sistemas Dish-Stirling proposto por Gil et al. (2015). A relação estabelecida entre o diâmetro da cavidade do receptor (D_{CAV}) e o diâmetro de abertura do receptor (D_R) é apresentada na equação 3.19 (Gil et al., 2015).

$$D_{CAV} = \frac{4}{3} D_R \quad (3.19)$$

A perda de calor em receptores de sistemas Dish-Stirling é estabelecida fundamentalmente pela convecção natural e convecção forçada (Castellanos et al.,2017). O coeficiente de convecção natural (h_N) consiste no coeficiente de transferência de calor concernente ao mecanismo convectivo estabelecido sob diferenças de densidade no fluido gerados por gradientes de temperatura (Bergman et al., 2011), determinado pela equação 3.20 (Castellanos et al.,2017).

$$h_N = \frac{Nu K_{AR}}{D_R} \quad (3.20)$$

O ângulo do receptor (ψ_R) corresponde ao posicionamento angular do mesmo durante o movimento de rotação estabelecido pelo sistema de rastreamento solar ao concentrador dish (Castellanos et al.,2017). Este ângulo, na posição horizontal e vertical, corresponde respectivamente aos valores de 0° e 90° (Castellanos et al.,2017). Em ambos os projetos,

concernentes aos concentradores solar e híbrido, foram adotados valores de 45° a este ângulo, a fim de aplicar-se o valor médio angular relativo ao movimento de rotação do receptor. A aplicação do valor médio angular, tal qual a irradiação normal direta média diária inerente ao período de insolação (DNI_{DIS}), estabelece a geração de energia elétrica média diária desenvolvida pelo concentrador híbrido dish e o concentrador solar dish correspondente.

O fator de inclinação do receptor (F) relativo a sistemas Dish-Stirling é determinado através da equação 3.21 (Castellanos et al.,2017).

$$F = 0,164 + 0,7498 \sin(\psi_R) - 0,5026 \sin(2\psi_R) + 0,3278 \sin(3\psi_R) \quad (3.21)$$

O coeficiente de convecção forçada (h_F) consiste no coeficiente de transferência de calor inerente ao mecanismo convectivo ocasionado por fonte externa (Bergman et al., 2011), o qual é determinado através da equação 3.22 (Castellanos et al.,2017).

$$h_F = F U_\infty^{1.004} \quad (3.22)$$

O coeficiente global de convecção (h_G) é determinado fundamentalmente pela soma dos coeficientes de convecção forçada (h_F) e coeficiente de convecção natural (h_N) (Bergman et al., 2011), através da equação 3.23 (Castellanos et al.,2017).

$$h_G = h_F + h_N \quad (3.23)$$

A transmitância (τ), aplicada na determinação do rendimento do receptor (η_R), estabelece a fração da irradiação solar a qual atravessa o ar presente entre o refletor e o absorvedor de maneira inalterada (Bergman et al. 2011; Stine e Diver, 1994), sendo determinada pela equação 3.24 (Duffie e Beckman, 2013).

$$\tau = \exp(-\beta_\tau \lambda_\tau^{\alpha_\tau} m_{ar}) \quad (3.24)$$

Os valores numéricos atribuídos e a descrição dos parâmetros aplicados na determinação da transmitância (τ) são descritos na tabela 3.4.

Tabela 3.4 - Parâmetros aplicados na determinação da transmitância (τ)

Parâmetros	Símbolo	Unidade	Valor numérico
Coefficiente de turbidez	β_τ	[1/kg]	10^{-4}
Coefficiente de dispersão	λ_τ		0,6
Coefficiente de concentração	α_τ		3,1

Fonte: Duffie e Beckman (2013)

A massa de ar (m_{AR}) aplicada na equação 3.24, compreendida pelo volume estabelecido entre o concentrador e o receptor, foi determinada mediante aplicação da equação 3.25, constituída pelo produto entre a área do concentrador dish (A_C), a distância focal (f) e massa específica do ar (ρ_{AR}).

$$m_{AR} = A_C f \rho_{AR} \quad (3.25)$$

O rendimento do receptor (η_R) aplicado ao sistema de conversão de energia solar é determinado pela equação 3.26 (Castellanos et al.,2017).

$$\eta_R = \left[\tau \alpha_{abs} - \left(\frac{h_G (T_R - T_A) + \epsilon \sigma_B (T_R^4 - T_A^4)}{\eta_C C_G I} \right) \right] \quad (3.26)$$

O rendimento do motor Stirling (η_S) aplicado ao sistema de conversão de energia solar é determinado através da equação 3.27 (Castellanos et al.,2017).

$$\eta_S = \left(1 - \sqrt{\frac{T_A}{T_R}} \right) K_S \quad (3.27)$$

O rendimento global (η_G) corresponde ao rendimento do sistema de conversão de energia solar, determinado pelo produto dos rendimentos dos componentes do sistema Dish-Stirling, conforme a equação 3.28 (Castellanos et al.,2017).

$$\eta_G = \eta_C \eta_R \eta_S \eta_{GE} \quad (3.28)$$

A potência solar disponível (P_{SD}) corresponde à potência solar fornecida ao concentrador dish, determinada através da equação 3.29 (Castellanos et al.,2017).

$$P_{SD} = I A_C \quad (3.29)$$

A potência elétrica líquida gerada pelo sistema Dish-Stirling (P_{ELS}) é determinada pela equação 3.30 (Castellanos et al.,2017).

$$P_{ELS} = \eta_G P_{SD} \quad (3.30)$$

O período anual de geração de energia elétrica do sistema Dish-Stirling (T_S) corresponde ao número de horas disponível para a operação do sistema de conversão de energia solar durante um ano (Lovegrove e Stein, 2012). Em sistemas Dish-Stirling, o período anual de geração de energia elétrica (T_S) é determinado pelo produto entre número de dias do ano, o número de horas por dia e o fator de capacidade solar (F_{CS}). Portanto, o período anual de geração de energia elétrica (T_S) é determinado pela equação 3.31.

$$T_S = 8760 F_{CS} \quad (3.31)$$

A energia elétrica anual gerada pela conversão de energia solar (E_{AGS}) corresponde à energia elétrica gerada pelo sistema Dish-Stirling durante o período de um ano, sendo determinada pela equação 3.32 (Amenedo, 2003).

$$E_{AGS} = P_{ELS} T_S \quad (3.32)$$

A aplicação da metodologia de dimensionamento geométrico e térmico compreende um numeroso conjunto de equações, portanto foi desenvolvido um programa em Maple® a fim de operacionalizar estes cálculos. Este programa foi validado mediante aplicação de dados de entrada apresentados por Castellanos et al.(2017), estabelecendo a correspondência entre os resultados do programa desenvolvido e a referência adotada, sob variação máxima inferior a 3%, conforme mostrado na tabela 3.5.

Tabela 3.5 - Validação do programa desenvolvido em Maple® aplicado ao projeto solar

Parâmetros de entrada	Unidade	Autor / Referência		
Diâmetro do concentrador - (D_C)	[m]	7,5		
Irradiância solar - (I)	[W/m ²]	1000		
Temperatura ambiente - (T_A)	[K]	301,15		
Velocidade do vento - (U_∞)	[m/s]	1,5		
Parâmetros calculados	Unidade	Autor	Referência	Variação
Distância focal - (f)	[m]	4,5	4,5	0,00%
Diâmetro do receptor - (D_R)	[m]	0,174	0,177	1,69%
Área do concentrador - (A_C)	[m ²]	44,16	44,17	0,02%
Área do receptor - (A_R)	[m ²]	0,024	0,025	4,00%
Concentração geométrica - (C_G)		1840	1800	2,22%
Rendimento do concentrador - (η_C)	[%]	82,94	82,67	0,33%
Rendimento do receptor - (η_R)	[%]	90,01	88,88	1,27%
Rendimento do motor Stirling - (η_S)	[%]	30,40	31,00	1,94%
Rendimento global - (η_G)	[%]	20,60	20,50	0,49%
Potência elétrica líquida - (P_{ELS})	[kW]	9,08	9,05	0,33%

O fluxograma do programa computacional desenvolvido para operacionalizar os cálculos da metodologia de dimensionamento geométrico e térmico de sistemas Dish-Stirling é descrito nas figuras 3.20 e 3.21.

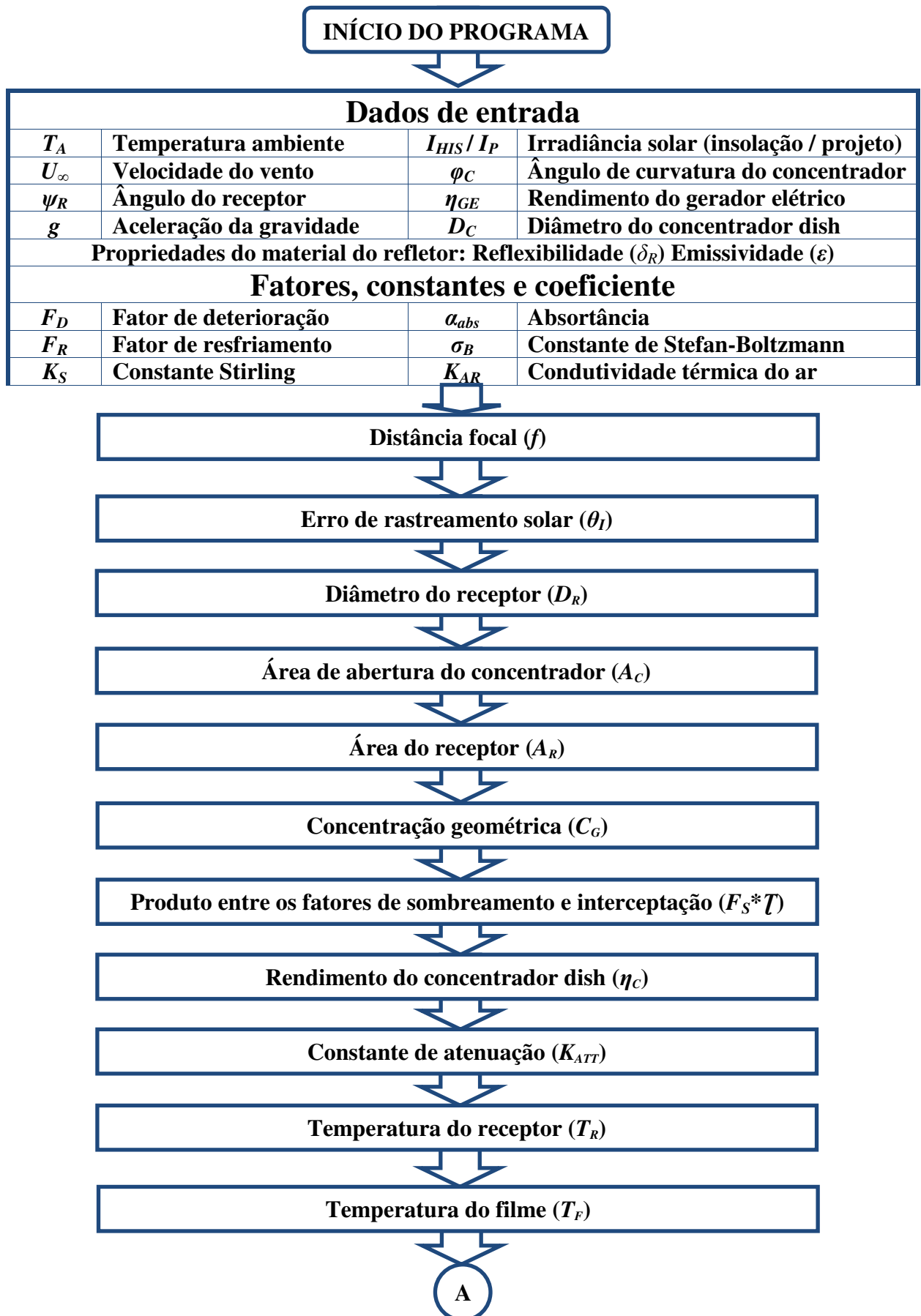


Figura 3.20 - Fluxograma do programa computacional aplicado ao projeto solar (parte 1)

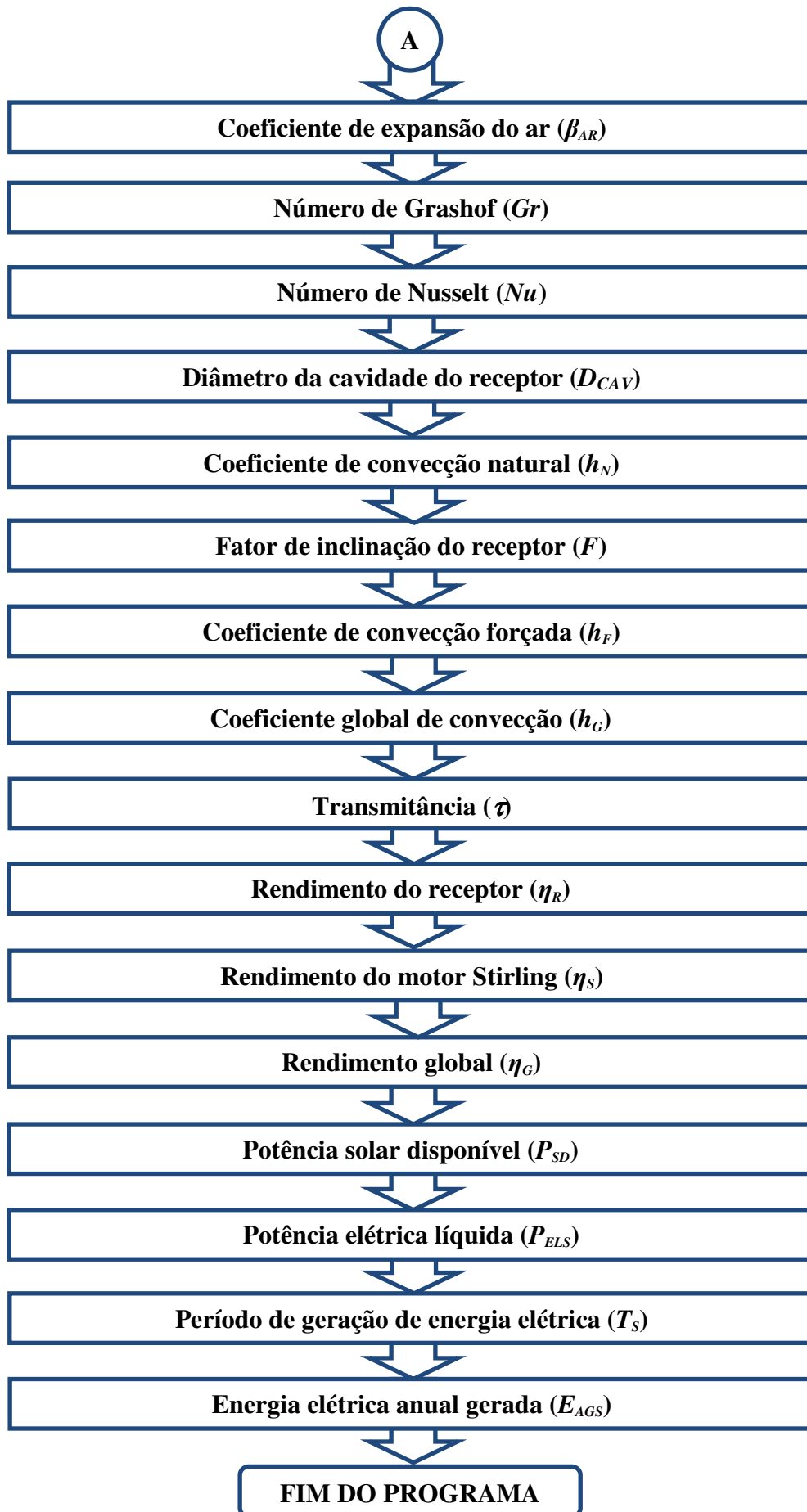


Figura 3.21 - Fluxograma do programa computacional aplicado ao projeto solar (parte 2)

3.4. PROJETO EÓLICO DO SISTEMA HÍBRIDO

O projeto eólico do sistema híbrido foi fundamentado na metodologia de dimensionamento de turbinas eólicas horizontais apresentada por Burton et al. (2011) e Manwell et al. (2010). Esta metodologia consiste essencialmente na teoria da quantidade de movimento do elemento de pá, aplicada ao dimensionamento das pás do concentrador híbrido dish.

A aplicação desta metodologia demanda primordialmente a especificação de características construtivas concernentes ao concentrador híbrido dish, compreendidas pelas suas dimensões básicas e pelo perfil aerodinâmico empregado à seção transversal da pá. A declaração de constantes físicas e a determinação de variáveis compreendidas por coeficientes, parâmetros adimensionais e ângulos, constituem procedimentos primordiais ao projeto eólico do sistema híbrido.

As constantes físicas aplicadas ao projeto eólico do concentrador híbrido dish são compreendidas pela massa específica do ar (ρ_{AR}), viscosidade absoluta do ar igualmente denominada de viscosidade dinâmica do ar (μ_{AR}) e a aceleração da gravidade (g). Os respectivos valores e unidades destas constantes são demonstrados na tabela 3.6.

Tabela 3.6 - Constantes físicas aplicadas ao projeto eólico do concentrador híbrido dish

Constante física	Simbologia	Unidade	Valor numérico
Aceleração da gravidade	g	[m/s ²]	9,81
Massa específica do ar	ρ_{AR}	[kg/m ³]	1,24
Viscosidade absoluta do ar	μ_{AR}	[Pa s]	18,2 x 10 ⁻⁶

Fonte: Bergman et al. (2011)

A especificação concernente ao perfil aerodinâmico aplicado à seção transversal das pás do concentrador híbrido dish foi estritamente compreendida por perfis NACA de quatro dígitos. 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 (Burton et al., 2011). Esta singularidade atribuída ao perfil aerodinâmico NACA 4415 consolidou efetivamente sua especificação ao projeto eólico do sistema híbrido.

O perfil aerodinâmico NACA 4415 apresenta arqueamento máximo de 4% situado a 40,2% da corda em relação ao bordo de ataque e espessura máxima de 15% situado a 30,9% da corda em relação ao bordo de ataque (Airfoil Tools, 2018).

Os coeficientes de arrasto (C_D) e sustentação (C_L) consistem essencialmente em grandezas adimensionais intrínsecas ao perfil aerodinâmico aplicado ao projeto das pás do rotor eólico (Manwell et al., 2010). Estes coeficientes são determinantes no rendimento da conversão de energia eólica, portanto fundamentais ao projeto das pás de rotores (Manwell et al., 2010).

O coeficiente de sustentação (C_L) consiste fundamentalmente na grandeza adimensional estabelecida pela relação entre pressão de sustentação e a pressão dinâmica intrínseca ao perfil aerodinâmico (Manwell et al., 2010). O coeficiente de arrasto (C_D) consiste na grandeza adimensional aplicada à quantificação do arrasto ou resistência estabelecida pelo perfil aerodinâmico ao escoamento (Manwell et al., 2010).

A relação estabelecida entre o coeficiente de sustentação e coeficiente de arrasto (C_L/C_D) constitui-se num parâmetro de projeto de grande relevância, determinando efetivamente o coeficiente de potência (C_P) de rotores eólicos (Burton et al., 2011). A razão máxima ou valor máximo estabelecido entre os coeficientes de sustentação e arrasto (C_L/C_D) consiste no ponto ótimo de projeto das pás de rotores eólicos intrínseco a este parâmetro (Burton et al., 2011).

O ângulo de ataque (α) constitui-se num parâmetro fundamental ao projeto das pás de rotores eólicos, 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) constitui-se no parâmetro primordial para a determinação dos ângulos de ataque (α), coeficientes de sustentação (C_L) e coeficientes de arrasto (C_D) relativos ao perfil NACA 4415. O número de Reynolds (Re) consiste numa grandeza adimensional estabelecida pela relação entre as forças inerciais e forças viscosas (Burton et al., 2011). O número de Reynolds (Re) concernentes a turbinas eólicas horizontais, aplicado ao projeto do concentrador híbrido dish, é determinado através da equação 3.33 (Manwell et al., 2010).

$$Re = \frac{\rho_{AR} U_\infty D_e}{\mu_{AR}} \quad (3.33)$$

As principais características construtivas, fundamentais ao projeto eólico do sistema híbrido, são compreendidas pelo diâmetro externo das pás do concentrador híbrido dish (D_e), diâmetro interno das pás do concentrador híbrido dish (D_i), número de lacunas (N_{LAC}) e pelas dimensões básicas das lacunas compreendidas pela sua largura (l) e altura (h).

O diâmetro externo das pás do concentrador híbrido dish (D_e) compreende a dimensão estabelecida entre as pontas das pás do concentrador híbrido dish. O diâmetro externo das pás do concentrador híbrido dish (D_e) conceitualmente apresenta o mesmo valor atribuído ao diâmetro do anel externo do concentrador híbrido dish demonstrado na figura 3.2, ao desconsidera-se a espessura do referido anel. Portanto, o diâmetro externo das pás consiste efetivamente no próprio diâmetro do concentrador híbrido dish (D_e) estabelecido no tópico 3.2 em seis metros.

O diâmetro interno das pás do concentrador híbrido dish (D_i) compreende a dimensão estabelecida entre as bases das pás do concentrador híbrido dish. O diâmetro interno das pás do concentrador híbrido dish (D_i) conceitualmente apresenta o mesmo valor atribuído ao diâmetro do anel interno do concentrador híbrido dish demonstrado na figura 3.2, ao desconsidera-se a espessura do referido anel. O diâmetro interno das pás do concentrador híbrido dish (D_i) foi determinado a partir de análises estabelecidas sob turbinas eólicas horizontais que apresentam apreciável semelhança ao concentrador híbrido dish, sobretudo no que concerne a alta solidez de seus rotores. O conceito proposto de concentrador híbrido dish estabelece que este apresente alta solidez devido à presença de refletores entre suas pás.

A turbina eólica desenvolvida por Charles Bush, descrita detalhadamente no tópico 2.5.3.1, apresenta apreciável semelhança ao concentrador híbrido dish fundamentalmente no que concerne a alta solidez de seus rotores. Ambos os rotores, intrínsecos a turbina eólica de Charles Bush e ao concentrador híbrido dish, foram projetados para operar sob pequenas alturas do solo, compreendidas respectivamente em 18 e 8 metros (King, 2011). A turbina eólica de Charles Bush constitui-se numa adequada referência aplicável na determinação do diâmetro interno das pás do concentrador híbrido dish (D_i), porém as informações relativas ao seu rotor são imprecisas e sugerem que seu diâmetro interno seja de aproximadamente 40% do diâmetro externo (King, 2011). Portanto, apesar da turbina eólica de Charles Bush constituir-se numa referência válida, outra referência deve ser considerada a fim de ratificar o valor aproximado da relação entre diâmetro interno e diâmetro externo do rotor eólico da referida turbina de Bush. A referência proposta nesta ratificação consiste numa turbina eólica comercial de alta aplicabilidade em artigos, característica corroborada através das publicações de Massouh e Dobrev (2007), Noura et al. (2016) e Chkir et al. (2011). Esta turbina foi igualmente aplicada aos estudos desenvolvido por Su et al. (2011) e Tao et al. (2011), constituindo o sistema híbrido eólico solar CSCWA, elucidado no tópico 2.6.1.1. Enfim, a turbina eólica horizontal aplicada nesta ratificação compreende a Rutland 503.

A turbina eólica de Rutland 503 constitui-se numa adequada referência na determinação do diâmetro interno das pás do concentrador híbrido dish (D_i). O rotor da turbina eólica Rutland 503, tal como o concentrador híbrido dish, 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 da turbina Rutland 503 corresponde a 27 % de seu diâmetro externo (Massouh e Dobrev, 2007).

As relações estabelecidas entre os diâmetros internos e externos concernentes as turbinas eólicas de Charles Bush e a Rutland 503, compreendidas respectivamente em 35% e 27%, caracterizaram um intervalo o qual foi adotado na definição do diâmetro interno das pás do concentrador híbrido dish (D_i). Portanto, o diâmetro interno das pás do concentrador híbrido dish (D_i) foi estabelecido em 33% de seu diâmetro externo, decorrendo na dimensão de 2 metros.

A especificação do diâmetro externo e interno das pás do concentrador híbrido estabeleceu invariavelmente a dimensão compreendida pela altura (h) de suas lacunas. Entretanto, a dimensão relativa à largura das lacunas (l) foi arbitrada em 0,275 metros, pois o concentrador híbrido dish constitui-se num conceito inovador, não havendo na literatura referências sobre a aplicação de pás eólicas em lacunas conforme proposto nesta dissertação.

O número de pás (N_{PA}) aplicadas ao projeto do concentrador híbrido dish consiste numa característica construtiva de grande relevância ao projeto eólico do sistema híbrido. O número de pás (N_{PA}) especifica o número de lacunas (N_{LAC}) aplicadas ao projeto do concentrador híbrido dish, portanto, estabelecendo a vazão de ar (Q) que atravessa o refletor solar.

O número de pás (N_{PA}) constitui-se num parâmetro determinante à grandeza adimensional solidez (σ), a qual estabelece características operacionais e o desempenho dos sistemas de conversão de energia eólica (Manwell et al., 2010). O número de pás (N_{PA}) estabelece ao projeto do concentrador híbrido dish as mesmas características alusivas aos sistemas de conversão de energia eólica apresentadas por Manwell et al. (2010), exceto no que concerne a relevância deste parâmetro na determinação desta grandeza adimensional solidez (σ).

O conceito proposto de concentrador híbrido dish estabelece que este apresente refletores entre suas pás eólicas. O conceito de solidez (σ) estabelecido no tópico 2.5.2 determina que as áreas das pás constituam concomitantemente com as áreas dos refletores a principal parcela aplicada na determinação desta grandeza adimensional. A figura 3.1 demonstra mediante modelo conceitual do concentrador híbrido dish, a preponderância da área dos refletores sob a área das pás. Portanto, diferentemente da solidez de turbinas eólicas a qual o número de pás

(N_{PA}) constitui-se no parâmetro prevalecente, a solidez do concentrador híbrido dish é estabelecida preponderantemente pela área dos refletores.

A aplicação das áreas das pás e refletores na principal parcela concernente à determinação da solidez do concentrador híbrido dish (σ_{Sch}) atribui invariavelmente altos valores a esta grandeza adimensional. Portanto, a solidez do concentrador híbrido dish apresenta-se fundamentalmente alta, estabelecendo suas principais características operacionais na conversão de energia eólica. As características operacionais decorrentes da alta solidez concernentes ao concentrador híbrido dish são descritas no tópico 2.5.3, entretanto a relação estabelecida entre o número de pás (N_{PA}) e a razão de velocidades na ponta da pá (λ) constitui a característica de maior relevância ao projeto eólico do sistema híbrido.

A alta solidez, conforme enunciada no tópico 2.5.3, é caracterizada invariavelmente a rotores constituídos por elevados números de pás (N_{PA}), operando sob baixas razões de velocidades na ponta da pá (λ). Portanto, o concentrador híbrido dish, caracterizado conceitualmente pela alta solidez, deve impreterivelmente operar sob baixas razões de velocidades na ponta da pá (λ).

A relação direta demonstrada neste tópico entre o número de pás (N_{PA}), o número de lacunas aplicadas ao concentrador híbrido dish e a vazão de ar (Q) que atravessa o refletor estabelece ao projeto eólico do sistema híbrido que este apresente elevado número de pás (N_{PA}). Conclusivamente, o projeto do concentrador híbrido dish deve apresentar um elevado número de pás (N_{PA}) e baixas razões de velocidades na ponta da pá (λ). A tabela 3.7 apresenta a relação recomendada entre número de pás (N_{PA}) e a respectiva razão de velocidades na ponta da pá (λ) relativa a rotores de turbinas eólicas horizontais (Manwell et al., 2010).

Tabela 3.7 - Número de pás (N_{PA}) e a respectiva razão de velocidades na ponta da pá (λ)

Razão de velocidades na ponta da pá (λ)	Número de pás (N_{PA})
1	8 - 24
2	6 - 12
3	3 - 6
4	3 - 4
Maior que 4	1 - 3

Fonte: Manwell et al. (2010)

A análise desenvolvida sob os dados concernentes ao número de pás (N_{PA}) apresentados na tabela 3.7, fundamentada nas premissas de projeto do concentrador híbrido dish, estabelece

invariavelmente a especificação do número de pás (N_{PA}) aplicadas ao concentrador híbrido dish de vinte. A especificação incipiente de vinte pás, diferentemente do número máximo de vinte e quatro pás expresso na tabela 3.7, esta fundamentada na premissa relativa à dimensão concernente à largura das lacunas (l). A aplicação de vinte e quatro pás estabelece largura das lacunas apresentado dimensão inferior aos 0,25 metros, restringindo demasiadamente a vazão de ar (Q) que atravessa o refletor. A especificação incipiente do número de pás (N_{PA}) do concentrador híbrido dish estabelece preliminarmente através da tabela 3.7 o valor de sua razão de velocidades na ponta da pá (λ) em um.

O projeto estabelecido fundamentalmente sob o número de pás (N_{PA}) igual a vinte resultou em especificações concernentes a dimensões das pás demasiadamente grandes e, por conseguinte desproporcionais as dimensões das lacunas, impossibilitando a aplicação destas pás no concentrador híbrido dish. Portanto, o número de pás concernente ao projeto (N_{PA_p}) foi estabelecido em quarenta e o número de pás real (N_{PA}) aplicado ao concentrador híbrido foi estabelecido em vinte.

O 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) especificadas ao projeto concentrador híbrido dish constituem os parâmetros fundamentais na determinação de seu coeficiente de potência máximo teórico (C_{PMT}).

O diagrama concernente ao coeficiente de potência (C_P) e razão de velocidades na ponta da pá (λ) apresentado na figura 3.22 demonstra as curvas características de rotores constituídos por diversos números de pás.

O diagrama apresentado na figura 3.22 demonstra que o incremento no número de pás aproxima o coeficiente de potência máximo teórico (C_{PMT}) do limite de Betz (B). Adicionalmente, este diagrama demonstra que o incremento na razão de velocidades na ponta da pá (λ) aproxima o coeficiente de potência máximo teórico (C_{PMT}) do limite de Betz (B).

O diagrama apresentado na figura 3.23 foi estabelecido sob as premissas do número fixo de pás e variação do perfil aerodinâmico. Portanto, diferentemente do diagrama da figura 3.22, todas as curvas são relativas a rotores que invariavelmente apresenta um número fixo de pás, entretanto constituídos por diferentes perfis aerodinâmicos e conseqüentemente apresentando diferentes relações de coeficientes de sustentação e arrasto (C_L/C_D). Em suma, o diagrama apresentado na figura 3.23 demonstra o coeficiente de potência (C_P) e razão de velocidades na ponta da pá (λ) e concomitantemente, as curvas características de rotores caracterizados exclusivamente pelas respectivas relações entre os coeficientes de sustentação e arrasto (C_L/C_D) de seus perfis aerodinâmicos.

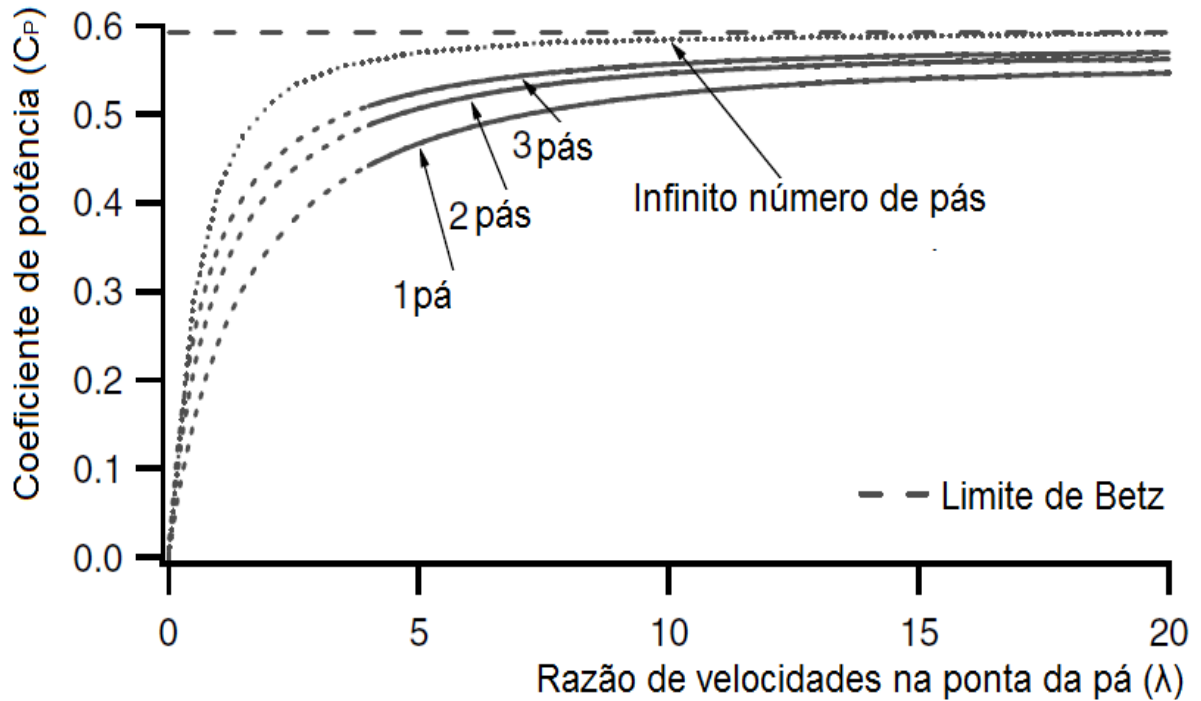


Figura 3.22 - Diagrama do coeficiente de potência (C_p) x razão de velocidades na ponta da pá (λ) e as curvas estabelecidas sob número de pás do rotor
 Fonte: Adaptado de Manwell et al.(2010)

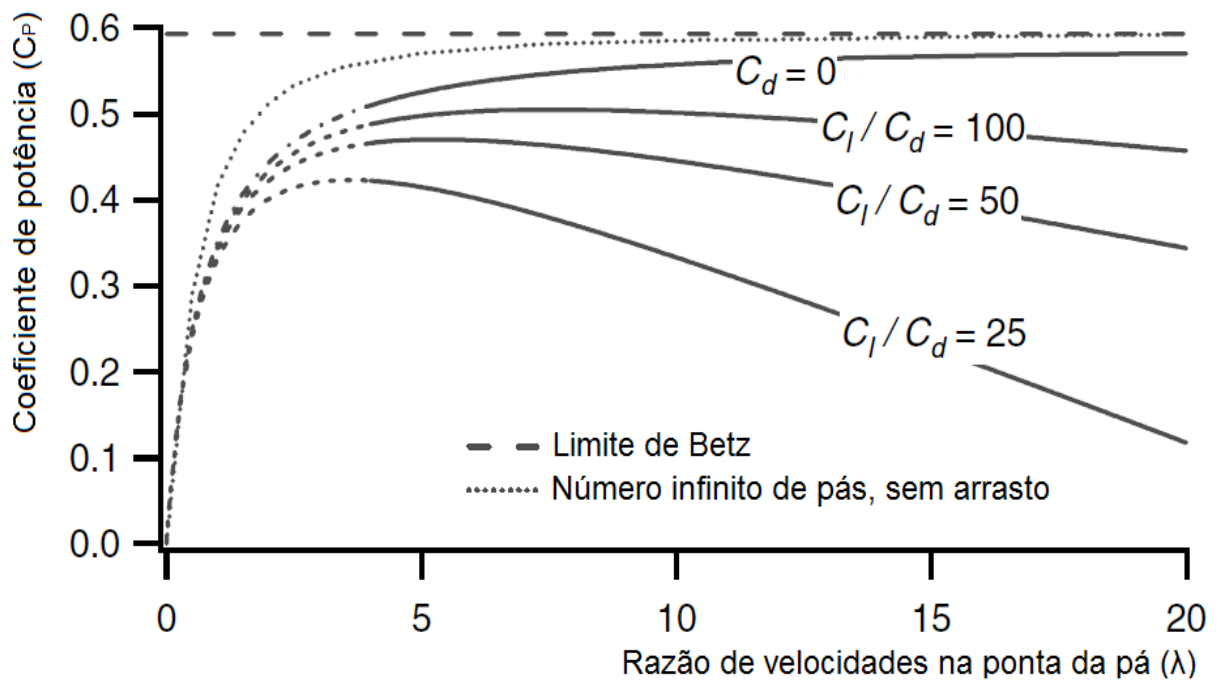


Figura 3.23- Diagrama do coeficiente de potência (C_p) x razão de velocidades na ponta da pá (λ) e as curvas estabelecidas sob relações de coeficientes de sustentação e arrasto (C_l/C_d)
 Fonte: Adaptado de Manwell et al.(2010)

O diagrama apresentado na figura 3.23 demonstra que o incremento na relação entre os coeficientes de sustentação e arrasto (C_l/C_d) relativo aos seus perfis aerodinâmicos aproxima

o coeficiente de potência máximo teórico (C_{PMT}) do limite de Betz (B). Diferentemente do demonstrado no diagrama 3.16, o comportamento intrínseco ao incremento da razão de velocidades na ponta da pá (λ) em relação ao limite de Betz (B) varia de acordo com relação entre os coeficientes de sustentação e arrasto (C_L/C_D).

A determinação do fator de indução axial (a) intrínseco a turbinas eólicas é estabelecida sob metodologia fundamentada na teoria da quantidade de movimento do elemento de pá (Manwell et al., 2010; Burton et al., 2011). Esta metodologia estabelece um processo iterativo aplicado na determinação do fator de indução axial (a), constituído de equações fundamentadas nas forças aerodinâmicas resultantes sob os elementos de pá (Manwell et al., 2010; Burton et al., 2011). As forças aerodinâmicas resultantes intrínsecas aos elementos de pá determinam o torque (T_{EI}) e a potência no rotor eólico (P_E) e, por conseguinte, o coeficiente de torque (C_T) e potência (C_P) intrínseco ao rotor eólico (Manwell et al., 2010; Burton et al., 2011). O coeficiente de potência (C_P) é determinado efetivamente pelo do fator de indução axial (a), conforme demonstrado na equação 3.35 (Manwell et al., 2010; Burton et al., 2011). Entretanto o concentrador híbrido dish apresenta refletores entre suas pás, estrutura efetivamente determinante nas forças aerodinâmicas resultantes no projeto eólico.

A determinação do fator de indução axial (a) concernente ao concentrador híbrido dish fundamentada no método iterativo estabelecido entre os resultados do coeficiente de potência obtidos pela análise fluidodinâmica computacional (CFD) e o projeto das pás do concentrador híbrido dish fundamentado na teoria da quantidade de movimento do elemento de pá, constitui-se numa metodologia adequada, pois o resultado do coeficiente de potência (C_P) obtido no CFD é independente do fator de indução axial (a). Este procedimento associado a uma metodologia de otimização abrangendo efetivamente a determinação da largura das lacunas estabeleceria o ponto ótimo do projeto do concentrador híbrido dish. Entretanto, nesta dissertação não será desenvolvido a otimização do projeto do concentrador híbrido dish, portanto a definição do fator de indução axial (a) foi estabelecida fundamentalmente no ponto de máximo rendimento teórico, denotado pelo coeficiente de potência máximo teórico (C_{PMT}).

Os diagramas das figuras 3.22 e 3.23 demonstram que o coeficiente de potência máximo teórico (C_{PMT}) 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). Portanto, o coeficiente de potência máximo teórico (C_{PMT}) concernente ao concentrador híbrido dish é estabelecido mediante aplicação da equação 3.34 (Manwell et al., 2010).

$$C_{PMT} = \left(B \lambda \left(\lambda + \frac{1,32 + \left(\frac{\lambda - 8}{20} \right)^2}{N_{PA}^{\frac{2}{3}}} \right)^{-1} \right) - \frac{0,57 \lambda^2}{\frac{C_L}{C_D} \left(\lambda + \frac{1}{2 N_{PA}} \right)} \quad (3.34)$$

O coeficiente de potência (C_P) concernente ao concentrador híbrido dish, estabelecido exclusivamente pelo fator de indução axial (a), é determinado mediante aplicação da equação 3.35 (Manwell et al., 2010).

$$C_p = 4 a (1 - a)^2 \quad (3.35)$$

O coeficiente de potência máximo teórico (C_{PMT}), determinado através da equação 3.34, enquanto igualado ao coeficiente de potência (C_P) na equação 3.35 estabelece o fator de indução axial (a) concernentes à condição de potência máxima teórica (Manwell et al., 2010). Portanto, o fator de indução axial (a) concernente à condição de potência máxima teórica do concentrador híbrido dish foi estabelecida através da equação 3.36.

$$C_{PMT} = C_p = 4 a (1 - a)^2 \quad (3.36)$$

A solução da equação 3.36, concernente ao fator de indução axial (a) intrínseco à condição de potência máxima teórica do concentrador híbrido dish, apresenta invariavelmente três raízes. Portanto, configura-se a obrigatoriedade da especificação de critérios concernentes à definição da raiz a qual efetivamente representa o famigerado fator de indução axial (a). Estes critérios foram estabelecidos nesta dissertação fundamentado na teoria da quantidade de movimento do elemento de pá apresentada por Manwell et al. (2010) e Burton et al. (2011).

O coeficiente de potência (C_P), estabelecido fundamentalmente pela aplicação da teoria da quantidade de movimento do elemento de pá, corresponde precisamente aos resultados experimentais unicamente sob baixos valores de fator de indução axial (a) (Manwell et al., 2010). A teoria da quantidade de movimento do elemento de pá torna-se inválida sob fatores de indução axial (a) 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 (a). Este dois critérios consistem respectivamente na aprovação de

raízes da equação 3.36 as quais atribuem valores baixos ao fator de indução axial (a) e concomitante, na aprovação das raízes da equação 3.36 as quais constituam fatores de indução axial (a) menores que 0,5.

O fator de indução axial (a) estabelece a velocidade do ar no disco atuador (U_D) através da equação 3.37 (Burton et al., 2011).

$$U_D = U_\infty (1 - a) \quad (3.37)$$

A especificação do número de pás (N_{PA}) do concentrador híbrido dish atribuiu preliminarmente através da tabela 3.7 o valor da razão de velocidades na ponta da pá (λ) de um. 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 (λ) é definida pela equação 3.38 (Manwell et al., 2010).

$$\lambda = \frac{\Omega R}{U_\infty} \quad (3.38)$$

A equação 3.38, reescrita em função de (Ω) conforme demonstrado por Tong (2010), estabelece a equação 3.39 a qual é aplicada invariavelmente na determinação da rotação do concentrador híbrido dish em radianos por segundo (rad/s).

$$\Omega = \frac{\lambda U_\infty}{R} \quad (3.39)$$

A velocidade angular do concentrador híbrido dish (n) em rotações por segundo (rpm) é estabelecida através da equação 3.40 Tong (2010).

$$n = \frac{\Omega \times 60}{2 \pi} \quad (3.40)$$

A metodologia aplicada ao projeto eólico do concentrador híbrido dish é efetivamente idealizada ao desenvolvimento de rotores eólicos. O concentrador híbrido dish apresenta a singular característica conceitual que o diferencia dos rotores eólicos, 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

dish (Q), tornando a vazão de ar considerada pela metodologia aplicada diferente da vazão efetiva no concentrador híbrido dish. Portanto, a razão de velocidades na ponta da pá (λ) do concentrador híbrido dish foi estabelecida em caráter preliminar através da tabela 3.7, pois o valor atribuído a esta grandeza adimensional foi fundamentada na metodologia idealizada ao projeto de rotores eólicos. Conseqüentemente, a velocidade angular do concentrador híbrido dish determinada pelas equações 3.34 e 3.35 apresentam caráter preliminar. A solução apresentada nesta dissertação para a aprovação da razão de velocidades na ponta da pá (λ) preliminar consiste na validação da velocidade angular (n) determinada pela equação 3.39 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 ao projeto eólico do concentrador híbrido dish, a qual é fundamentada na teoria da quantidade de movimento do elemento de pá. Entretanto, 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 (λ) aplicado nesta dissertação consiste efetivamente aprovação do ponto de projeto do concentrador híbrido dish nos diagramas das figuras 3.24 e 3.25 mediante avaliação de seus intervalos concernentes aos projetos de rotores otimizados. A validação dos pontos de projeto estabelece a aprovação da velocidade angular (n) sob a vazão (Q) real que atravessa o concentrador híbrido dish, pois ambas variáveis são aplicadas na determinação das grandezas adimensionais as quais estabelecem os pontos de projeto.

A determinação da velocidade do fluxo de ar que atravessa o disco atuador (U_D) estabelece o cálculo da vazão (Q) no concentrador híbrido dish. A vazão (Q), intrínseca ao fluxo ar que atravessa o concentrador híbrido dish é determinada pelo produto da velocidade do ar que atravessa o concentrador híbrido dish (U_D) e a área projetada relativa às lacunas do concentrador híbrido dish (A_{PL}) por onde o fluxo passa (Bran e Souza, 1969). A vazão (Q) de ar a qual atravessa o concentrador híbrido dish é determinada através da equação 3.41 (Bran e Souza, 1969).

$$Q = U_D A_{PL} \quad (3.41)$$

A aplicação da área projetada relativa às lacunas (A_{PL}) na determinação da vazão (Q) que atravessa o concentrador híbrido dish é validada sob a análise estabelecida fundamentalmente na particularização do teorema de transporte de Reynolds (TTR) concernente a conservação da massa. A área projetada relativa às lacunas (A_{PL}) é compreendida pelo montante das áreas projetadas intrínsecas as lacunas do concentrador híbrido dish suprimida do montante das áreas projetadas das pás. A área projetada relativa às lacunas (A_{PL}) é determinada pelo produto do número de lacunas do concentrador híbrido dish (N_{LAC}), pela altura (h) e largura (l) das lacunas concernentes ao refletor 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 pela equação 3.42.

$$A_{PL} = N_{LAC} h l F_E \quad (3.42)$$

A altura de energia (H), inerente ao fluxo ar que atravessa o concentrador híbrido dish, é estabelecida pela relação entre velocidade do fluxo de ar que atravessa o concentrador (U_D) e a aceleração da gravidade (g), sendo determinada pela equação 3.43 (Bran e Souza, 1969).

$$H = \frac{U_D^2}{2g} \quad (3.43)$$

A energia específica (Y), concernente ao escoamento que atravessa o concentrador híbrido dish, é definida pelo produto entre a altura de energia (H) e a aceleração da gravidade (g), sendo determinada através da equação 3.44 (Bran e Souza, 1969).

$$Y = H g \quad (3.44)$$

A rotação específica (n_{qA}), intrínseca ao concentrador híbrido dish, 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 3.45 (Bran e Souza, 1969).

$$n_{qA} = n \frac{Q^{\frac{1}{2}}}{Y^{\frac{3}{4}}} 10^3 \quad (3.45)$$

O coeficiente de diâmetro (δ_D) compreende a grandeza adimensional estabelecida pela relação entre o diâmetro externo do concentrador híbrido dish (D_e), a vazão (Q) de ar a qual o atravessa e seu trabalho específico (Y), sendo determinado através da equação 3.46 (Bran e Souza, 1969).

$$\delta_D = 1,054 \frac{Y^{\frac{3}{4}}}{Q^{\frac{1}{2}}} D_e \quad (3.46)$$

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 dish, sendo determinado pela equação 3.47 (Bran e Souza, 1969).

$$\sigma_L = 2,108 \frac{Q^{\frac{1}{2}}}{Y^{\frac{3}{4}}} n \quad (3.47)$$

O coeficiente de pressão (ψ) consiste na grandeza adimensional definida pela relação estabelecida entre o trabalho específico (Y) e a velocidade tangencial (U_T) do concentrador híbrido dish, sendo determinado através da equação 3.48 (Bran e Souza, 1969).

$$\psi = \frac{2Y}{U_T^2} \quad (3.48)$$

O diagrama apresentado na figura 3.24, essencialmente aplicado ao dimensionamento de rotores de bombas e ventiladores, relaciona parâmetros adimensionais a características geométricas do rotor e determina a faixa recomendada ao ponto de projeto (Bran e Souza, 1969). Os parâmetros adimensionais aplicados ao diagrama da figura 3.24 são o coeficiente de pressão (ψ) e rotação específica (n_{qA}). A característica geométrica relacionada neste diagrama é a razão entre diâmetro interno (D_i) e diâmetro externo do rotor (D_e) (Bran e Souza, 1969).

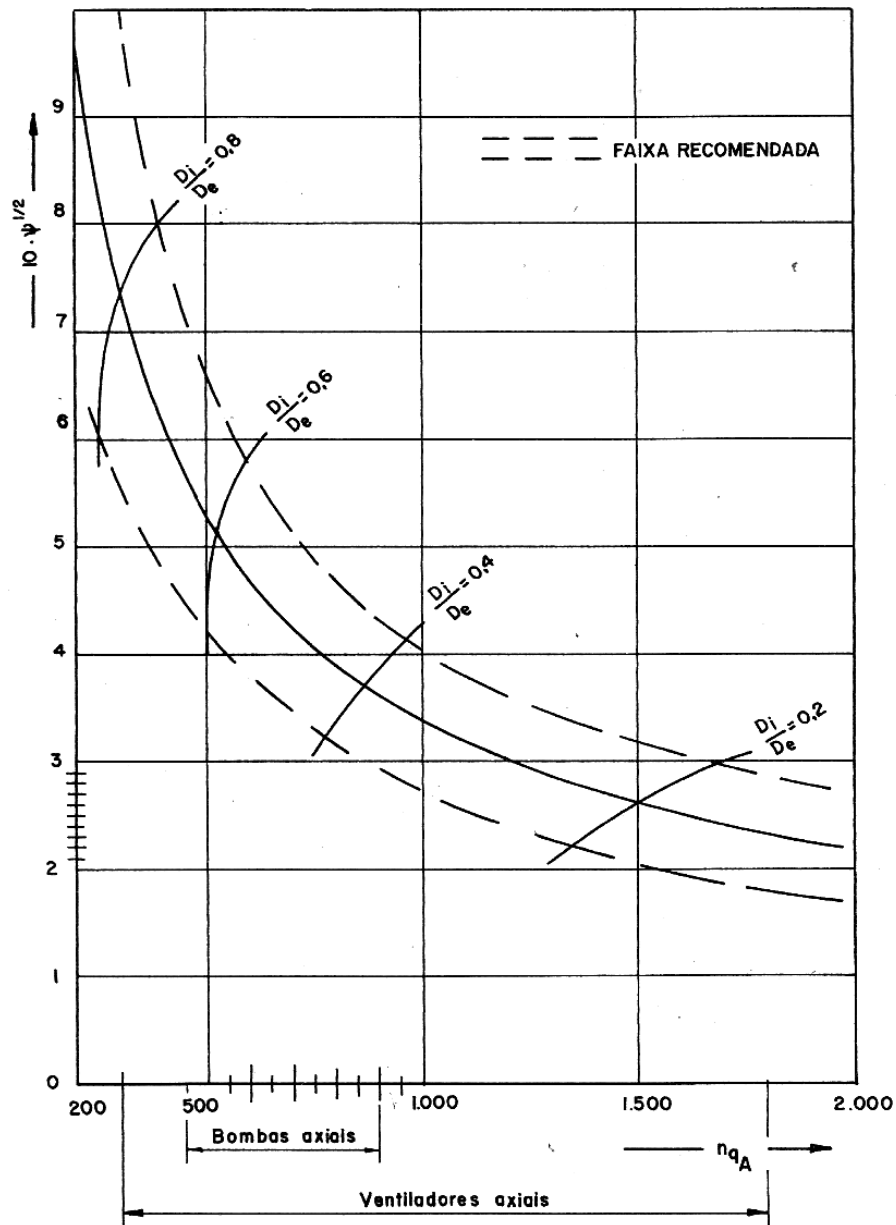


Figura 3.24 - Diagrama aplicado ao dimensionamento de rotores de bombas e ventiladores
 Fonte: Bran e Souza (1969)

Na década de 1950, Cordier desenvolveu uma extensa análise empírica fundamentada em dados experimentais objetivando a determinação da curva constituída pelos pontos de projeto otimizados concernentes aos rotores de máquinas de fluxo (Wright, 1999). Os resultados estabelecidos nesta análise empírica originaram o diagrama de Cordier, apresentado na figura 3.25. Este diagrama expressa a relação estabelecida entre o coeficiente de ligeireza (σ_L), o coeficiente de diâmetro (δ_D) e concomitantemente, a configuração do escoamento no rotor e a curva ótima relativa a projetos de rotores de máquinas de fluxo (Bohl, 2008).

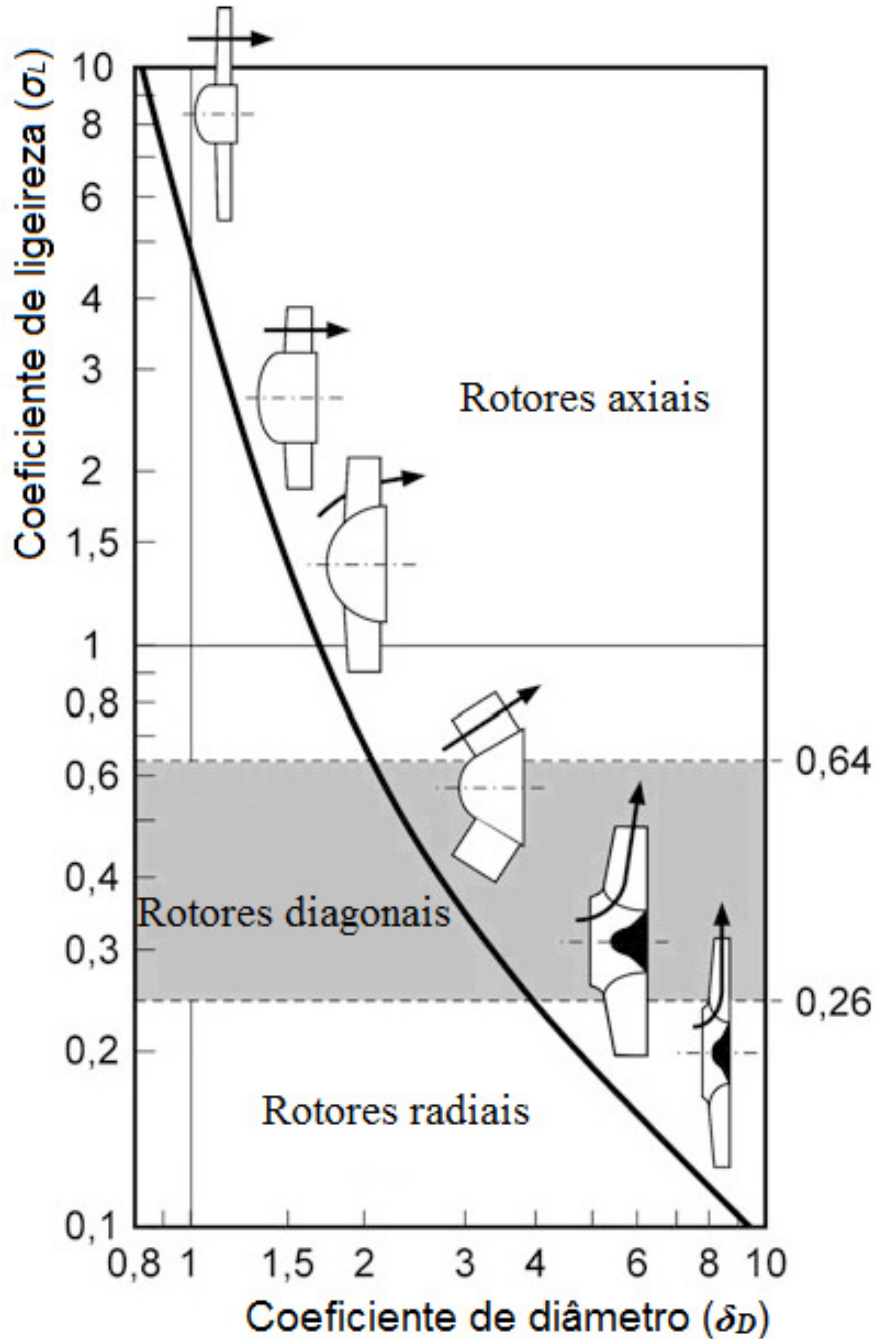


Figura 3.25 - Diagrama de Cordier
 Fonte: Adaptado de Bohl (2008)

A metodologia aplicada ao projeto das pás do concentrador híbrido dish compreende a teoria da quantidade de movimento do elemento de pá, fundamentada essencialmente na associação das teorias da quantidade de movimento e elemento de pá (Burton et al., 2011). A teoria da quantidade de movimento do elemento de pá é comumente designada na literatura pela abreviatura BEM (Blade Element Momentum), portanto nesta dissertação será adotada esta abreviatura para denominação desta teoria.

O BEM estabelece que as pás das turbinas eólicas sejam constituídas por elementos de pá de espessura (δr) e área correspondente a sua seção transversal, conforme figura 3.26 (Burton et al., 2011).

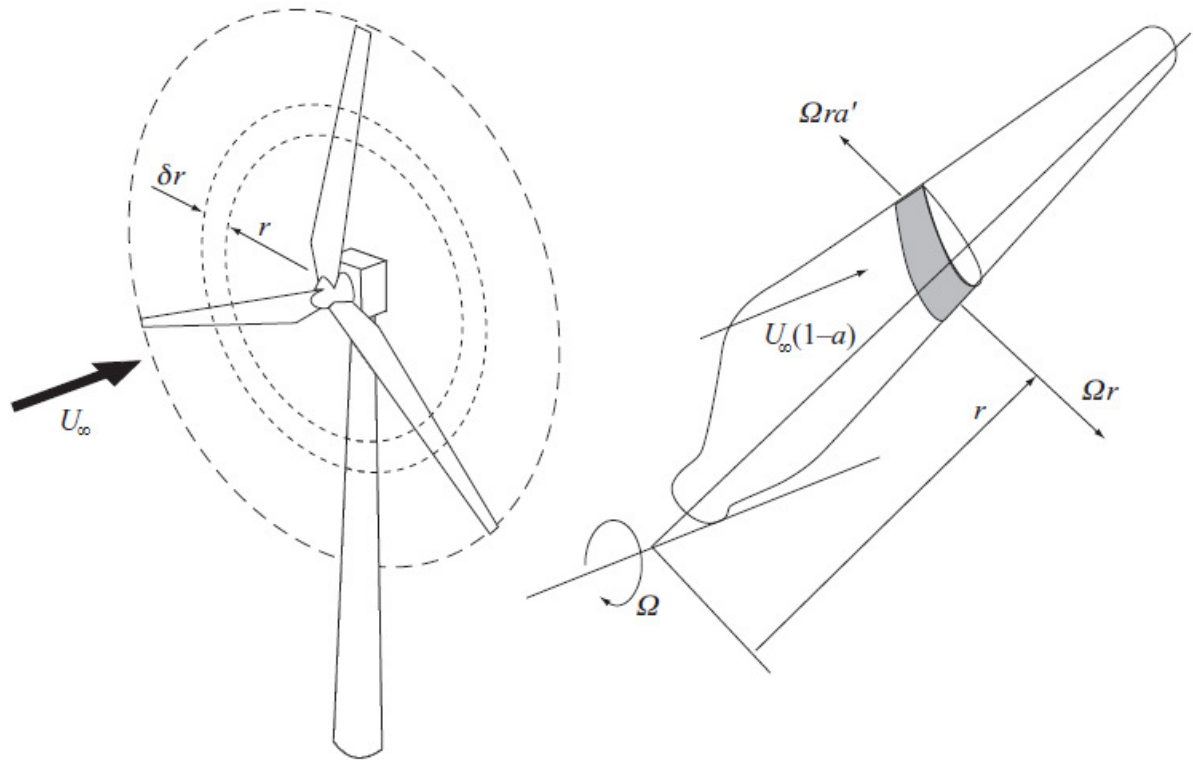


Figura 3.26 - Turbina eólica, pá, elemento de pá e velocidade tangencial, axial e angular
Fonte: Burton et al. (2011)

O lado esquerdo da figura 3.26 apresenta uma turbina eólica horizontal, a direção e sentido de incidência dos ventos em seu rotor e os elementos de pá situados num determinado raio (r), constituídos fundamentalmente por uma espessura (δr) (Burton et al., 2011). O lado direito da figura 3.26 apresenta uma das pás da turbina eólica horizontal e o elemento de pá no raio (r), 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 ($\Omega r a'$), ambas concernentes ao elemento de pá. A análise da teoria do elemento de pá é puramente bidimensional, portanto o componente de velocidade na direção longitudinal da pá é ignorado (Burton et al., 2011).

A variação da velocidade tangencial (Ωr) nos elementos de pá do rotor é expressa em termos do fator de indução tangencial (a'), estabelecendo a velocidade tangencial induzida no rotor ($\Omega r a'$) (Burton et al., 2011). Esta velocidade induzida é oposta ao movimento do rotor,

pois é produzida em reação ao torque (Burton et al., 2011). A velocidade tangencial líquida do fluxo de ar que atravessa o rotor é expressa por $(\Omega r (I+a'))$ (Burton et al., 2011).

O fator de indução tangencial (a') é determinado através da equação 3.49.

$$a' = \frac{a(1-a)}{\lambda_r^2 \mu^2} = \frac{a(1-a)}{\lambda^2} \quad (3.49)$$

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., 2011). Portanto, a velocidade da corrente livre induzida no rotor é estabelecida por $(-aU_\infty)$, e por conseguinte, a velocidade da corrente livre líquida (U_D) é expressa por $(U_\infty(I-a))$, conforme equação 3.37 (Burton et al., 2011).

O BEM propõe que o projeto das pás do rotor eólico seja constituído por elementos, estabelecidos sob perfis aerodinâmicos e fundamentalmente especificados sob sua corda (c) e ângulo de passo (β) (Burton et al., 2011). O ângulo de passo (β) compreende o ângulo de montagem ou torção estabelecido sob os elementos de pá (Burton et al., 2011). A corda (c) 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 (c) e o ângulo de passo (β) apresentam variações ao longo da pá (Burton et al., 2011), portanto a corda e ângulo de passo associados aos elemento de pá são expressos respectivamente por (c_r) e (β_r) .

O ângulo de ataque (α) é definido através do diagrama polar do perfil aerodinâmico aplicado as pás da turbina eólica. O ângulo de ataque (α) deve ser constante ao longo da pá, mantendo a melhor relação entre os coeficientes de sustentação (C_L) e arrasto (C_D). Deste modo, o ângulo de ataque (α) se apresenta valor único em todos os elementos de pá.

O ângulo de fluxo (ϕ) é determinado pela soma do ângulo de ataque (α) e o ângulo de passo (β) (Burton et al., 2011). O ângulo de passo associado ao elemento de pá (β_r) somado ao ângulo de ataque (α), constante ao longo da pá, determina o ângulo de fluxo associados ao elemento de pá (ϕ_r). A variação do ângulo de passo associado ao elemento de pá (β_r) é diretamente proporcional a variação do ângulo de fluxo associado ao elemento de pá (ϕ_r) (Burton et al., 2011).

O BEM despreza em sua análise os efeitos tridimensionais, considerando apenas os efeitos bidimensionais das seções transversais da pá (Burton et al., 2011). Deste modo, o BEM considera que $(\delta r \rightarrow 0)$ e sua análise se restringe exclusivamente a seções transversais do rotor (Burton et al., 2011). A análise da seção transversal do elemento de pá fundamentada na velocidade tangencial líquida $(\Omega r (I+a'))$, velocidade da corrente livre líquida $(U_\infty(I-a))$,

ângulos de fluxo (ϕ), ângulo de passo (β) e ângulo de ataque (α), origina o triângulo de velocidades mostrado na figura 3.27.

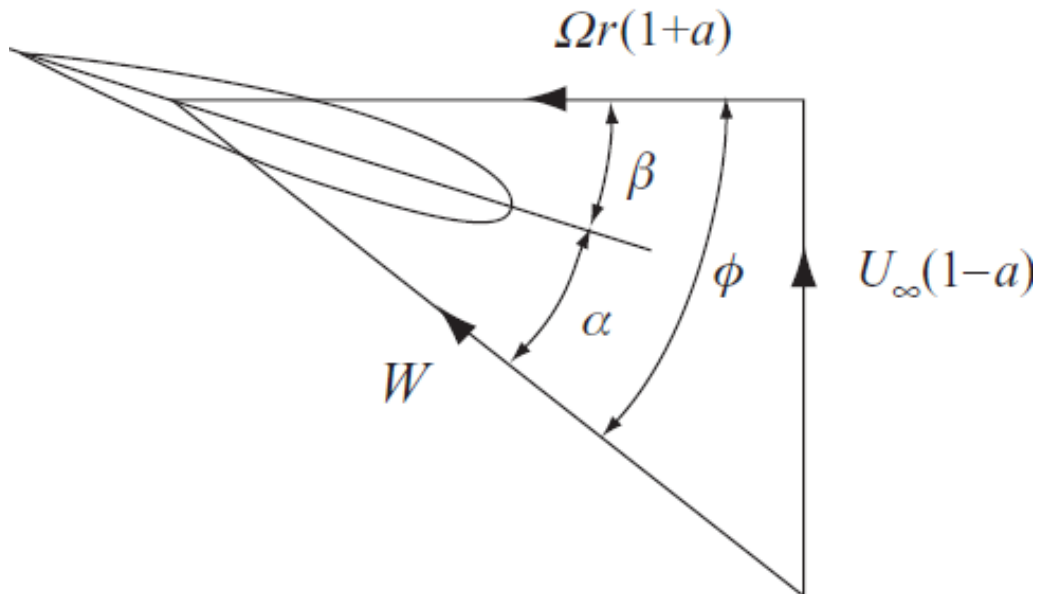


Figura 3.27 - Triângulo de velocidades associado ao elemento de pá
Fonte: Burton et al. (2011)

O triângulo de velocidades introduz a velocidade relativa (W) na análise do elemento de pá (Burton et al., 2011). A velocidade relativa (W_r), intrínseca ao elemento de pá no raio (r), é determinada através equação 3.50 (Burton et al., 2011).

$$W_r = \sqrt{U_\infty^2 (1-a) + r^2 \Omega^2 (1+a)^2} \quad (3.50)$$

A razão de velocidades no elemento de pá (λ_r) é definida pela razão entre a velocidade tangencial no elemento de pá e a velocidade de corrente livre (Burton et al., 2011). A relação de velocidades no elemento de pá (λ_r) é determinada pela equação 3.51 (Burton et al., 2011).

$$\lambda_r = \frac{\Omega r}{U_\infty} \quad (3.51)$$

A posição radial adimensional (μ_r), intrínseca ao elemento de pá no raio (r), é definida pela relação entre o raio do elemento de pá (r) e o raio da pá (R). Portanto, a posição radial adimensional (μ_r) é determinada pela equação 3.52 (Burton et al., 2011).

$$\mu_r = \frac{r}{R} \quad (3.52)$$

O valor numérico do ângulo de fluxo (ϕ_r), intrínseco ao elemento de pá no raio (r), é determinado mediante aplicação da equação 3.53 (Burton et al., 2011).

$$\phi_r = \arctan \left(\frac{1-a}{\lambda_r (1+a')} \right) \quad (3.53)$$

O ângulo de passo (β_r), intrínseco ao elemento de pá no raio (r), é determinado pela equação 3.54 (Burton et al., 2011).

$$\beta_r = \phi_r - \alpha \quad (3.54)$$

A corda (c_r), intrínseca ao elemento de pá no raio (r), apresenta valor numérico estabelecido pela equação 3.55 (Burton et al., 2011).

$$c_r = \frac{8 \pi a' (1-a) \mu^2 R U_\infty^2 \lambda_r}{N_{PÁ} W_r^2 (C_L \sin(\phi_r) + C_D \cos(\phi_r))} \quad (3.55)$$

O número de elementos de pá aplicado ao projeto do concentrador híbrido dish (b_p) foi estabelecido segundo valor médio recomendado por Hau (2013), compreendido por 10 elementos.

O diagrama apresentado na figura 3.28, fundamentalmente aplicado ao projeto de rotores eólicos, especifica o intervalo ótimo estabelecido pela relação entre as grandezas adimensionais 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 3.7, mediante determinação da solidez do concentrador híbrido dish (σ_{Sch}). Equações intrínsecas à solidez de sistemas análogos ao concentrador híbrido dish não são relatados na literatura, portanto, a determinação da solidez do concentrador híbrido dish (σ_{Sch}) foi estabelecida fundamentalmente sob o conceito de solidez da corda (σ_{Scr}) apresentado por Burton et al. (2011) e na análise desenvolvida sob as figuras 3.29 e 3.30.

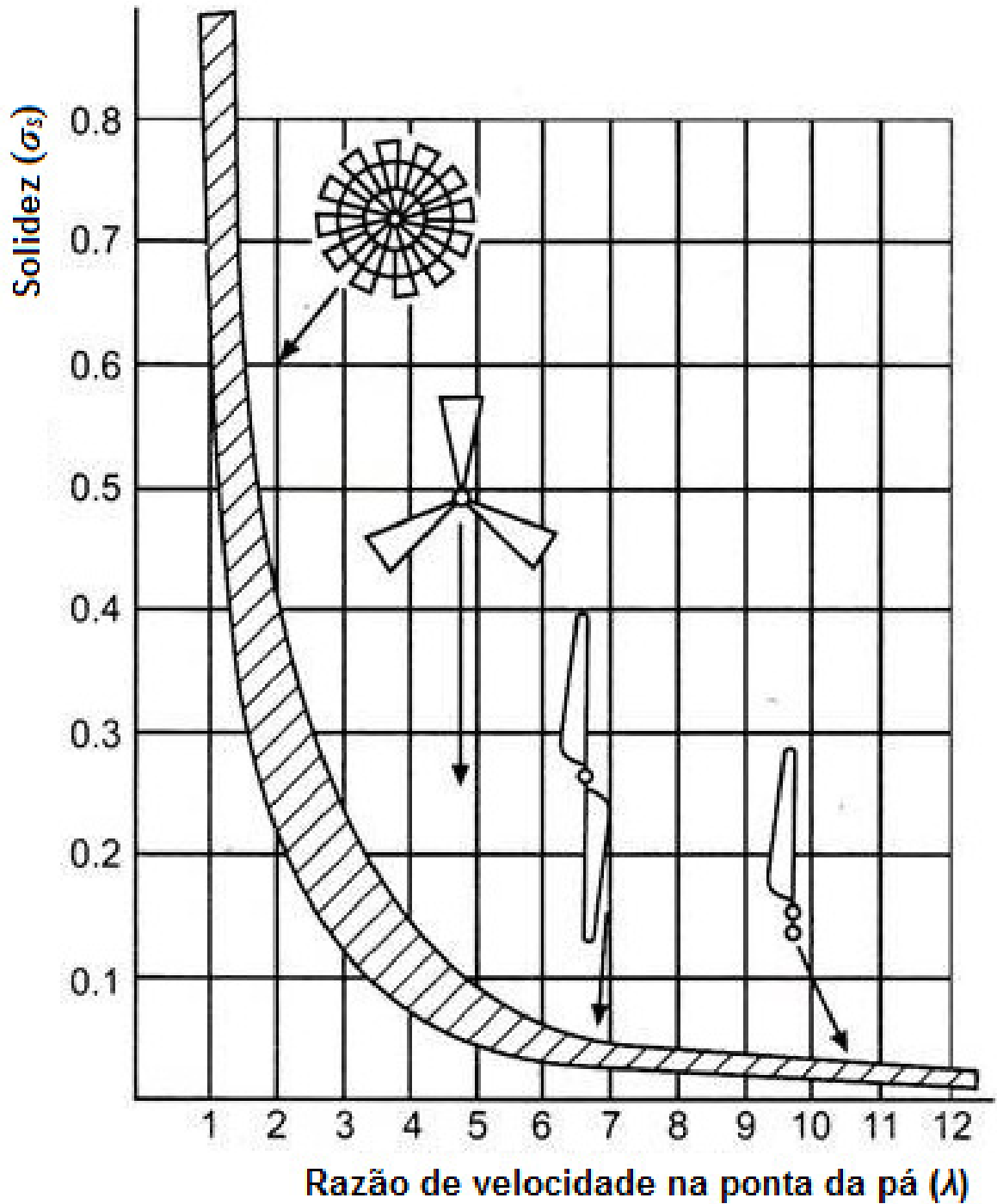


Figura 3.28 - Diagrama de solidez (σ_s) e razão de velocidades na ponta da pá (λ)
 Fonte: Adaptado de Park (1981)

A solidez da corda (σ_{sCr}) consiste essencialmente na razão estabelecida entre o somatório das cordas inerentes aos elementos de pá em um determinado raio e o perímetro da circunferência concernente a este raio (Burton et al., 2011). Portanto, a solidez da corda (σ_{sCr}) é determinada através da equação 3.56 (Burton et al., 2011).

$$\sigma_{scr} = \frac{N_{pA} c_r}{2 \pi r} \quad (3.56)$$

A equação 3.56 estabelece fundamentalmente a solidez intrínseca a um determinado raio (r) do rotor relacionando essencialmente cumprimentos de linhas concernentes a formas geométricas. Em seu numerador, a equação 3.56 estabelece o somatório do comprimento intrínseco às cordas do elemento de pá no raio (r). Em seu denominador, a equação 3.56 estabelece comprimento da circunferência concernente a este raio. Portanto, a equação 3.56 estabelece fundamentalmente a relação num determinado raio (r) entre o comprimento das formas geométricas correspondentes aos elementos sólidos do rotor e o comprimento da área varrida pelo rotor.

Os rotores eólicos são constituídos por elementos sólidos compreendidos unicamente pelas pás, diferentemente do concentrador híbrido dish, o qual é constituído fundamentalmente por elementos sólidos compreendidos pelas pás e refletores. Portanto solidez do concentrador híbrido dish no raio (r) deve considerar efetivamente o comprimento das cordas do respectivo elemento de pá e o comprimento dos refletores no respectivo raio.

O projeto eólico do concentrador híbrido dish estabeleceu a aplicação de vinte lacunas retangulares em se refletor, apresentando dimensões constituídas por largura de 0,275 metros e comprimento de 2 metros. Por conseguinte, a aplicação destas lacunas estabeleceu vinte segmentos ao refletor do concentrador híbrido dish. A figura 3.29, lado esquerdo, apresenta a vista frontal do desenho 3D do refletor, suas respectivas lacunas e segmentos. A aplicação de lacunas conforme as dimensões estabelecidas determinaram aos refletores, especificamente em seu raio igual a um metro, espessura tendendo a zero. Por conseguinte, esta característica geométrica estabelecida efetivamente no raio igual a um metro determinou a correspondência entre a área intrínseca ao segmento do refletor e a área concernente ao setor circular proveniente de um círculo singular e específico. Este círculo, caracterizado por seu diâmetro estabelecido pela diferença entre o diâmetro externo e interno do concentrador, apresenta vinte setores circulares oriundos de sua divisão em vinte partes iguais. Portanto, o círculo o demonstrado na figura 3.29 lado direito apresenta quatro metros de diâmetro.

A validação da correspondência entre a área do setor circular concernente ao círculo de diâmetro de quatro metros e a área do segmento do refletor foi estabelecida mediante estudo desenvolvido em AutoCAD®. Esta análise foi fundamentada na análise comparativa entre os desenhos concernentes ao refletor e círculo de diâmetro de quatro metros, apresentados respectivamente na figura 3.29 lado direito e lado esquerdo.

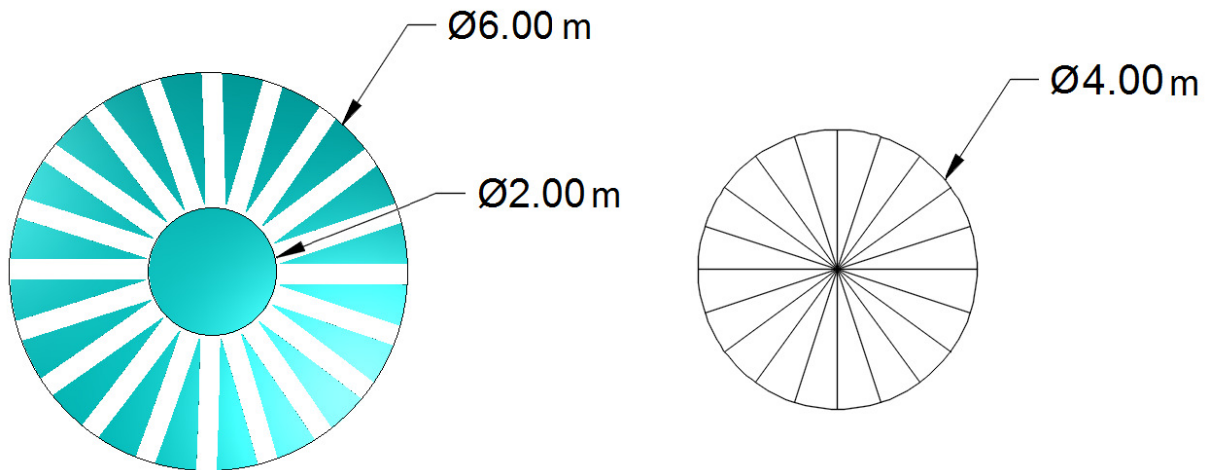


Figura 3.29 - Refletor do concentrador híbrido (esquerda) e círculo correspondente (direita)

O procedimento inicial desta análise comparativa consiste na criação da vista frontal do concentrador híbrido dish a partir de seu desenho 3D e concomitante na criação do desenho 2D do círculo caracterizado pelo diâmetro de quatro metros e seus respectivos vinte setores circulares.

A análise comparativa estabelecida mediante avaliação visual consiste fundamentalmente no posicionamento do centro do círculo de diâmetro de quatro metros ao vértice de um refletor. Concomitantemente, um setor circular do círculo de diâmetro de quatro metros é posicionado justaposto a um refletor. Este posicionamento estabelecido pela avaliação visual é demonstrado através do lado esquerdo da figura 3.30.

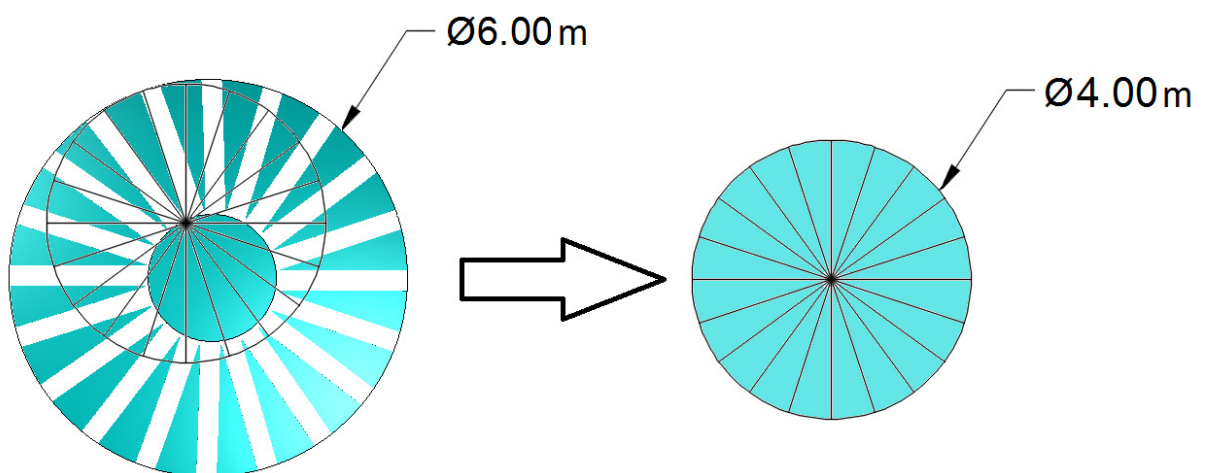


Figura 3.30 - Análise concernente a correspondência entre áreas

O resultado da análise comparativa estabelecida mediante avaliação visual comprovou que a área intrínseca ao refletor corresponde à área concernente ao setor circular do círculo de

diâmetro de quatro metros, conforme demonstrado no lado esquerdo da figura 3.30. A comprovação definitiva desta correspondência foi estabelecida pelos resultados apresentados pelo AutoCAD® concernentes a ambas as áreas; do refletor e setor circular do círculo de diâmetro de quatro metros. Comparativamente, estas áreas apresentaram variação de aproximadamente 6,5%.

A validação da correspondência entre áreas comprova concomitantemente a correspondência entre os comprimentos do refletor num raio (r) e do setor circular concernente ao círculo de diâmetro de quatro metros num raio ($r-1$). Portanto, conforme demonstrado no lado direito da figura 3.30, a determinação do comprimento dos refletores num determinado raio (r) é estabelecida efetivamente pelo comprimento do círculo de diâmetro de quatro metros num raio ($r-1$). Esta definição constitui-se numa importante aplicação na determinação da solidez do concentrador híbrido dish (σ_{SCH}), pois estabelece a parcela a ser adicionada ao numerador da equação 3.56, definindo a fórmula da solidez da corda do concentrador híbrido dish (σ_{SCrCh}), determinada através da equação 3.57.

$$\sigma_{SCrCh} = \frac{N_{PA} c_R + 2 \pi (r - 1)}{2 \pi r} \quad (3.57)$$

A solidez do concentrador híbrido dish (σ_{SCH}) foi fundamentalmente estabelecida através da determinação da solidez média das cordas dos elementos de pá do concentrador (σ_{SmCrCh}).

A solidez média das cordas dos elementos de pá do concentrador (σ_{SmCrCh}) é estabelecida fundamentalmente pela média aritmética simples constituída pela relação entre o somatório da solidez da corda do concentrador híbrido dish (σ_{SCrCh}) e o número de elementos de pá (b_S) aplicados. Portanto, a solidez do concentrador híbrido dish (σ_{SCH}) é estabelecida através da equação 3.58.

$$\sigma_{SCH} = \sigma_{SmCrCh} = \frac{\sum_0^{b_S} \sigma_{SCrCh}}{b_S} \quad (3.58)$$

O número de elementos de pá aplicados ao cálculo da solidez do concentrador híbrido dish (b_S) foi estabelecido segundo critério de convergência fundamentado no resultado da solidez do concentrador híbrido dish (σ_{SCH}). Este critério de convergência consiste no valor mínimo

do número de elementos de pá (b_s) o qual estabelece efetivamente a invariabilidade do resultado da solidez do concentrador híbrido dish (σ_{Sch}) sob três Algarismos Significativos após a vírgula.

A metodologia aplicada ao projeto eólico do concentrador híbrido dish consiste num numeroso conjunto de equações, portanto foi desenvolvido um programa em Maple® a fim de operacionalizar estes cálculos. O fluxograma concernente a este programa computacional é descrito nas figuras 3.31 à 3.35.

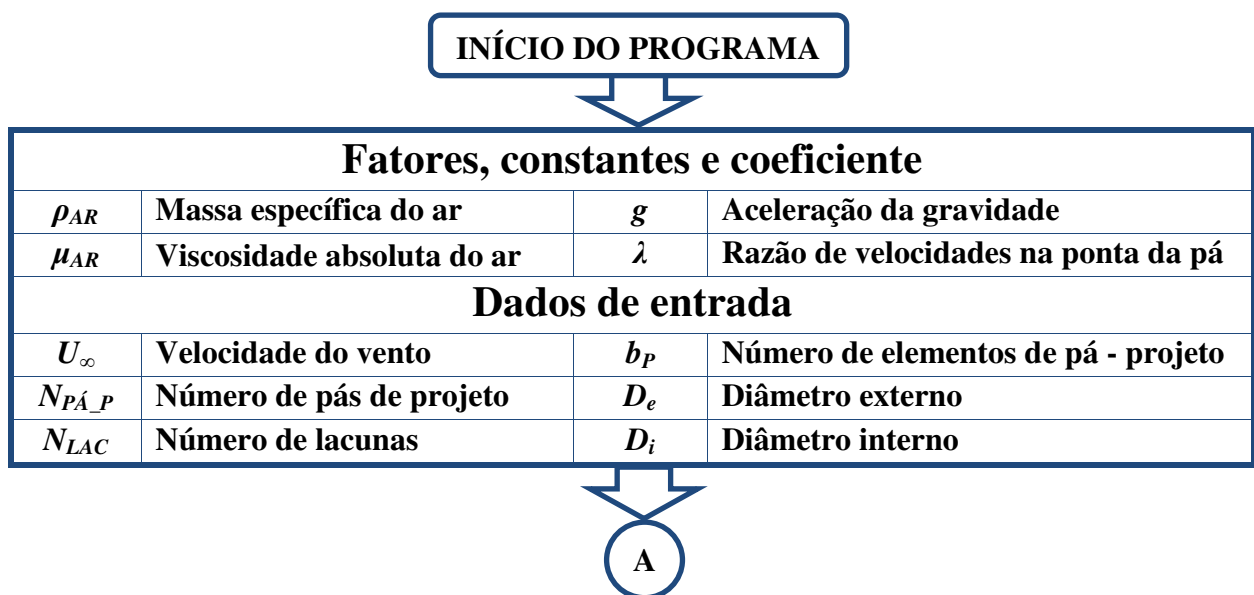


Figura 3.31 - Fluxograma do programa computacional aplicado ao projeto eólico (parte 1)

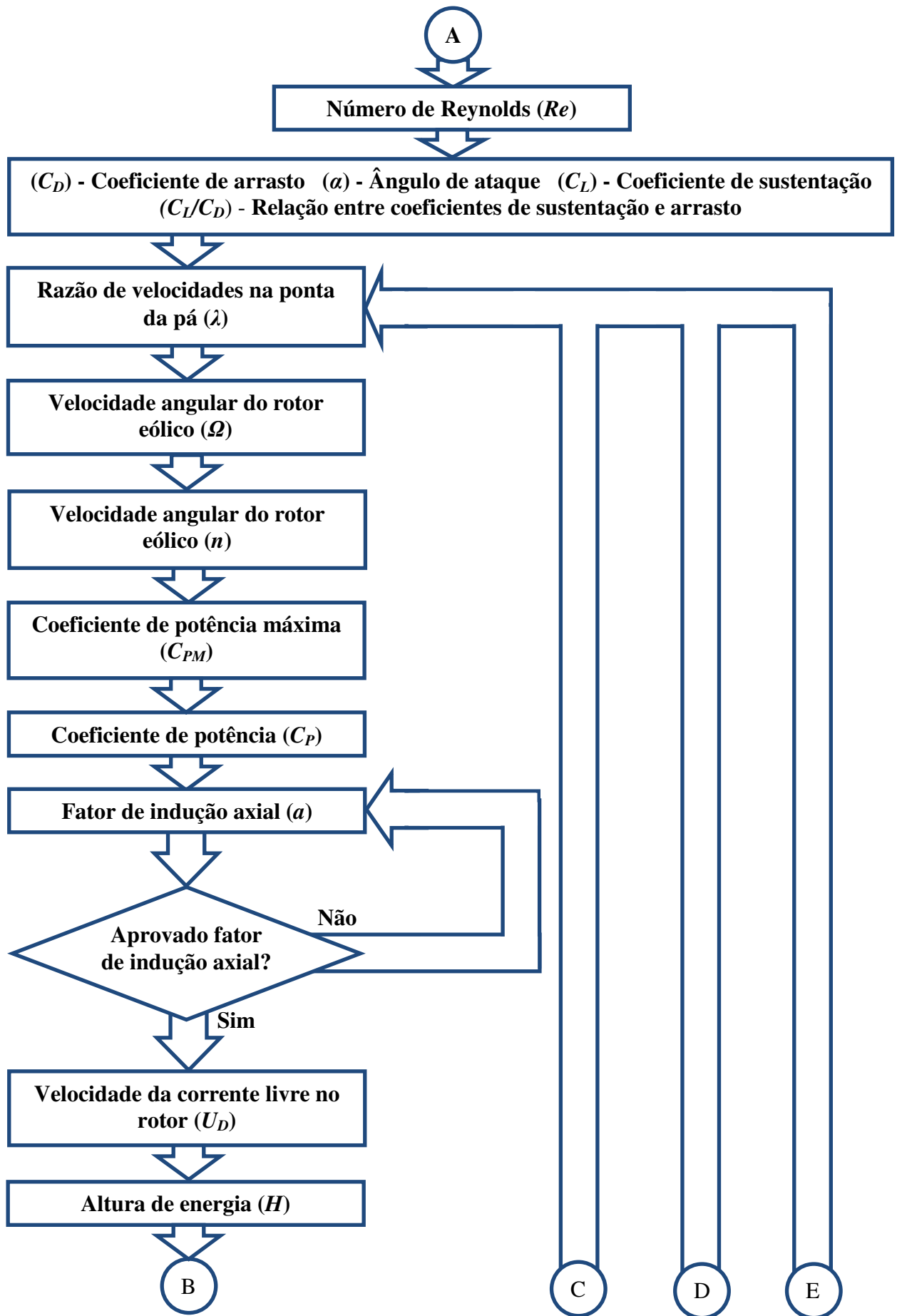


Figura 3.32 - Fluxograma do programa computacional aplicado ao projeto eólico (parte 2)

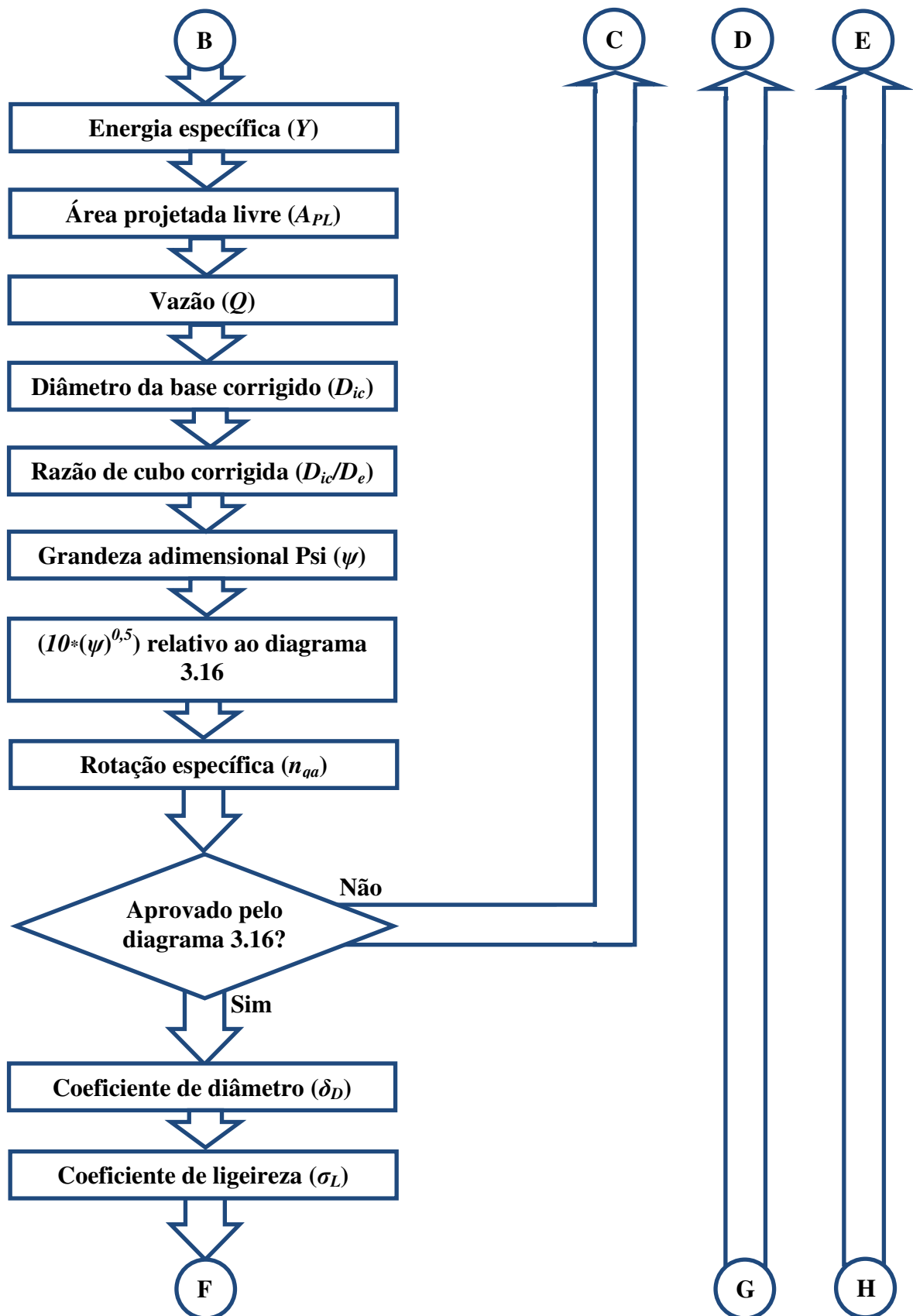


Figura 3.33 - Fluxograma do programa computacional aplicado ao projeto eólico (parte 3)

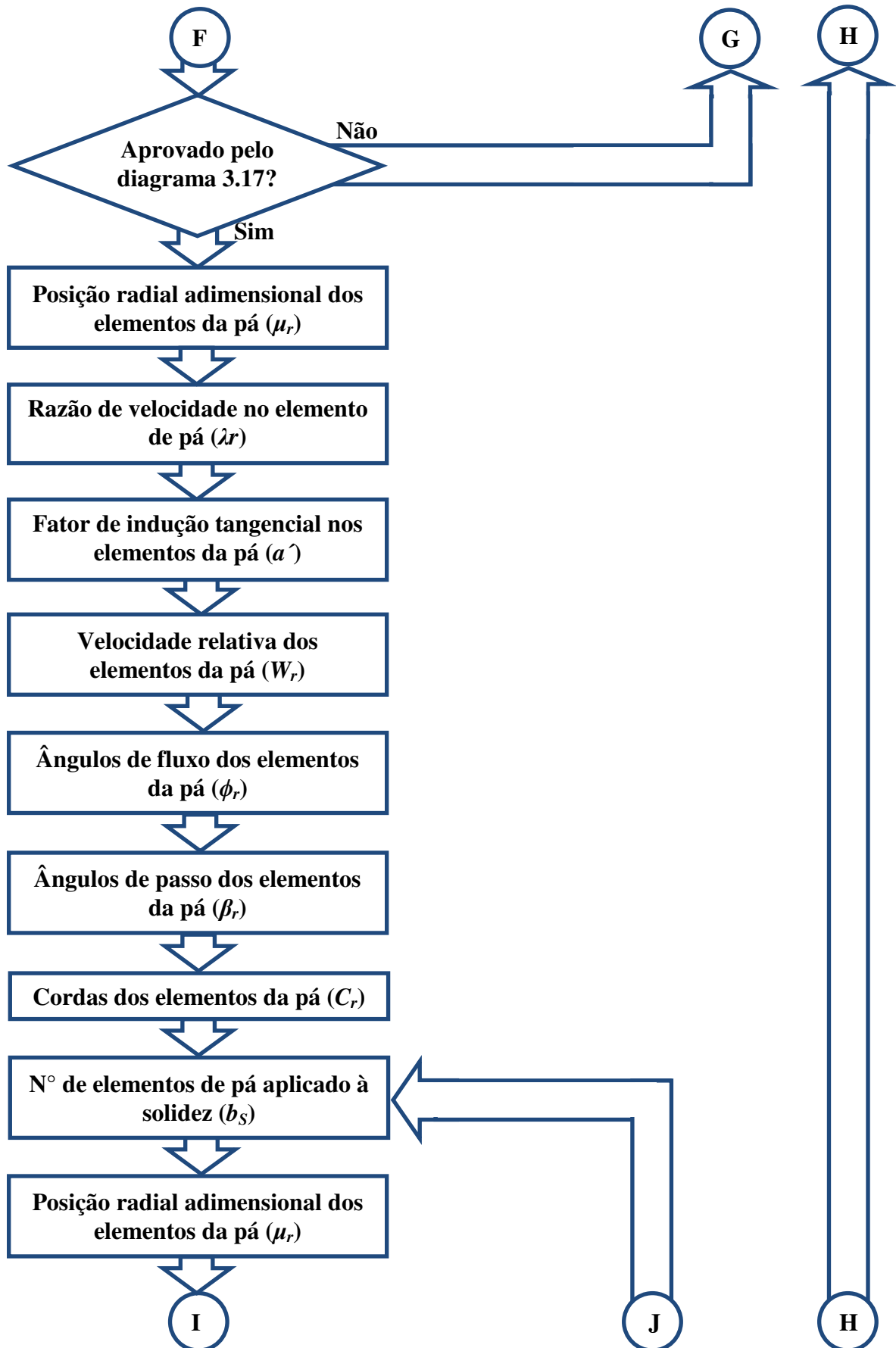


Figura 3.34 - Fluxograma do programa computacional aplicado ao projeto eólico (parte 4)

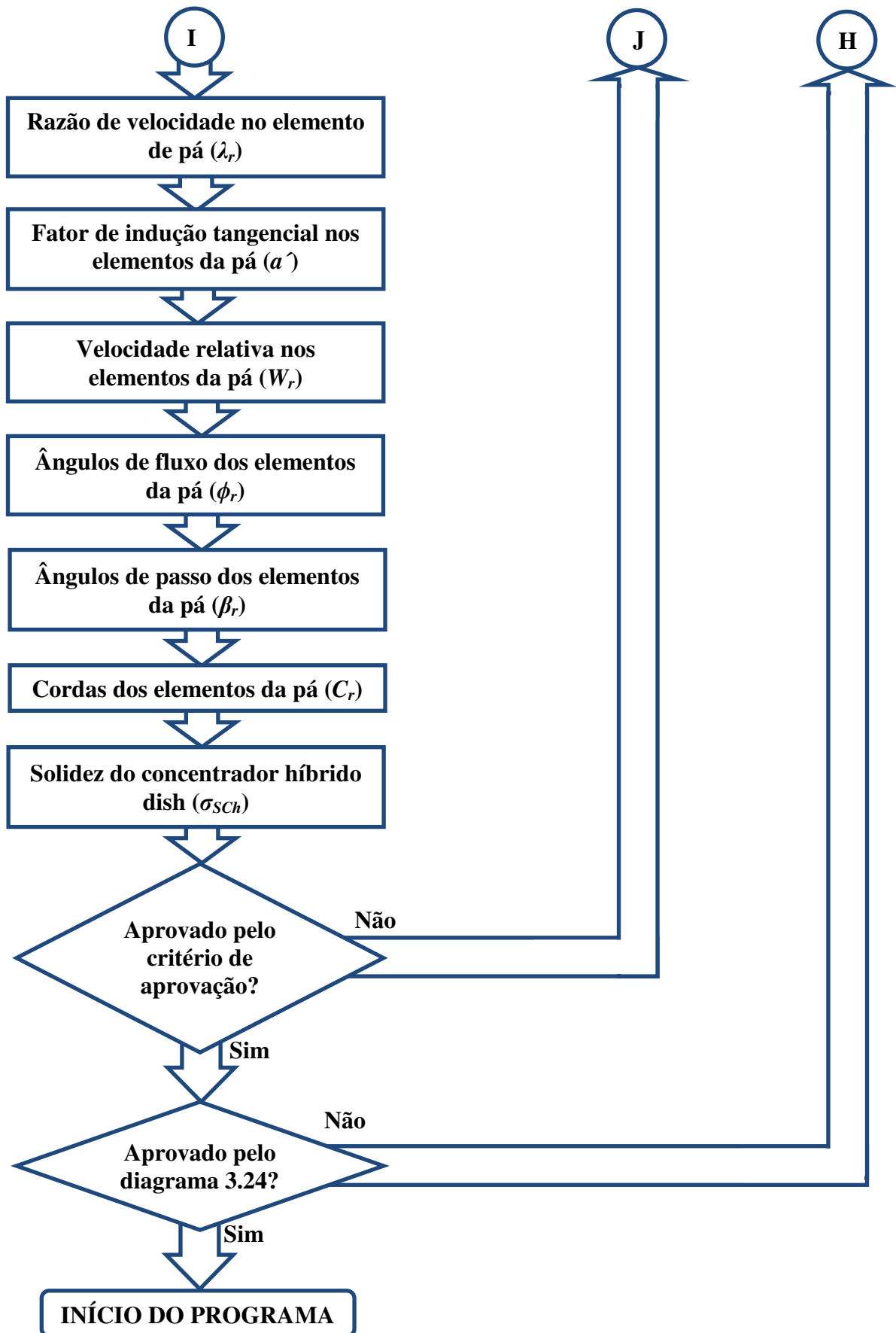


Figura 3.35 - Fluxograma do programa computacional aplicado ao projeto eólico (parte 5)

O torque teórico (T_T) desenvolvido pelo concentrador híbrido dish é determinado através da equação 3.59 (Burton et al., 2011).

$$T_T = \frac{1}{2} \rho_{AR} U_\infty^2 \pi R^3 \lambda \int_0^R \mu_r^2 \left(8a_r'(1-a)\mu_r - \frac{W_r}{U_\infty} \frac{B}{\pi} \frac{C}{R} C_D (1+a_r') \right) d\mu_r \quad (3.59)$$

O torque teórico (T_T), estabelecido pela equação 3.59, é determinado efetivamente pela integração desenvolvida sob os elementos de pá do rotor estabelecidos pela aplicação do BEM (Burton et al., 2011). Esta formulação não considera efetivamente o efeito viscoso ou a presença dos refletores na determinação do torque do concentrador híbrido dish (T_C), portanto a análise fluidodinâmica computacional (CFD) foi aplicada na determinação do torque do concentrador híbrido dish (T_C).

3.5. DESENHO 3D DO CONCENTRADOR HÍBRIDO DISH E DOMÍNIOS

O estudo eólico do concentrador híbrido dish estabelecido mediante a análise fluidodinâmica computacional determina impreterivelmente a aplicação de seu desenho 3D. A geometria do concentrador híbrido dish associada ao escoamento de ar através de suas pás impossibilitam a aplicação da análise CFD mediante aplicação de desenho 2D. O modelo 3D do concentrador híbrido dish foi integralmente desenvolvido no AutoCAD®, versão do estudante 2017.

A metodologia aplicada ao projeto eólico do sistema híbrido dish, elucidada no tópico 3.4, estabeleceu os parâmetros geométricos concernentes aos elementos de pás. As coordenadas (x,y), constituintes do perfil aerodinâmico aplicado aos elementos de pás, foram obtidas integralmente obtidos de Airfoil Tools (2018). O montante concernente ao número de coordenadas (x,y) aplicadas ao desenho do perfil aerodinâmico corresponde a 201 pontos. Estas 201 coordenadas, demonstradas na tabela D.1 integrada ao anexo D, configuram a única informação aplicada ao desenho 2D concernente ao perfil aerodinâmico aplicado aos elementos de pás. A geração do perfil aerodinâmico a partir das coordenadas (x,y) foi estabelecida através de um script no AutoCAD® desenvolvido pelo autor. O perfil aerodinâmico e os parâmetros geométricos concernentes aos elementos de pá determinaram a modelagem 3D das pás do concentrador híbrido dish.

Os anéis internos e externos do concentrador híbrido dish foram modelados segundo as premissas de projeto estabelecidas no tópico 3.1 concernentes os diâmetros internos e externos respectivamente.

O refletor do concentrador híbrido dish foi modelado segundo o perfil estabelecido pela equação do parabolóide 3.60 (Lovegrove e Stein, 2012), e as dimensões de suas lacunas conforme premissas de projeto estabelecidas no tópico 3.4.

$$z = \frac{x^2 + y^2}{4f} \quad (3.60)$$

A aplicação da análise fluidodinâmica computacional ao estudo eólico do concentrador híbrido dish determina impreterivelmente o modelamento de dois domínios 3D cilíndricos, conforme metodologia evidenciada em (Rajendran e Madhu, 2010) e (Massouh e Dobrev, 2007). Os desenhos 3D concernentes aos domínios aplicados a análise CFD foram desenvolvidos no Ansys DesignModeler®, versão 17.2. As dimensões relativas a ambos os domínios foram estabelecidas em função do diâmetro externo do concentrador híbrido dish, segundo parâmetros demonstrados em (Rajendran e Madhu, 2010) e (Massouh e Dobrev, 2007).

A aplicação da metodologia CFD determina que ambos os domínios modelados sejam integrados ao concentrador híbrido dish constituindo um único desenho 3D. Portanto o modelo 3D relativo ao concentrador híbrido dish foi exportado do AutoCAD® para o Ansys DesignModeler® e juntamente com os domínios, constituindo um único desenho 3D em Ansys DesignModeler®.

3.6. ANÁLISE CFD APLICADA AO PROJETO EÓLICO

A síntese teórica da dinâmica dos fluidos computacional, constituída por conceitos e equacionamentos intrínsecos a metodologia CFD, fundamentada em Versteeg e Malalasekera (2007) e Recktenwald (2018), é apresentada no apêndice A.

A análise fluidodinâmica computacional (CFD) desenvolvida sob o concentrador híbrido dish aplicou essencialmente o programa computacional ANSYS Fluent®. O modelo de turbulência aplicado a simulação CFD desenvolvida no ANSYS Fluent® consiste efetivamente no denominado SST (Shear Stress Transport) k- ω . Este modelo de turbulência foi fundamentalmente desenvolvido mediante constatação estabelecida por Menter

concernente ao desempenho insatisfatório do modelo $k-\varepsilon$ em regiões próximas a paredes caracterizadas por camadas limite com gradientes de pressão adversos (Versteeg e Malalasekera, 2007). Fundamentado nesta premissa, Menter desenvolveu o modelo híbrido SST $k-\omega$ o qual mediante função de acoplamento aplica efetivamente o modelo $k-\varepsilon$ nas camadas de cisalhamento livre e o modelo $k-\omega$ próximo à superfícies e paredes (Versteeg e Malalasekera, 2007). Conclusivamente, o SST $k-\omega$ consiste num modelo de turbulência adequado a aplicação efetiva sobre todo o campo de fluxo, pois o modelo $k-\omega$ constitui-se adequado a aplicações sobre fluxos na subcamada viscosa e o modelo $k-\varepsilon$ é ideal na aplicação da predição do comportamento de fluxos sobre regiões afastadas da parede (Versteeg e Malalasekera, 2007).

O modelo SST $k-\omega$ é fundamentado no transporte da tensão de cisalhamento turbulento, estabelecendo resultados altamente precisos mediante condições de separação de fluxo sob gradientes de pressão adversos (Versteeg e Malalasekera, 2007). Estabelecido sob esta premissa e associada a sua característica concernente a alta eficiência sob soluções numéricas, o modelo SST $k-\omega$ é freqüentemente aplicado na análise fluidodinâmica computacional concernente a aplicações aerodinâmicas (Versteeg e Malalasekera, 2007).

O modelo de turbulência SST $k-\omega$ é constituído essencialmente por duas equações (Versteeg e Malalasekera, 2007). A equação k aplicada ao modelo de turbulência SST $k-\omega$ consiste efetivamente na equação estabelecida no modelo $k-\omega$ original de Wilcox (Versteeg e Malalasekera, 2007). Entretanto, a equação ω aplicada ao modelo de turbulência SST $k-\omega$ é proveniente da equação ε concernente ao modelo $k-\varepsilon$ mediante substituição ε por $k\omega$ (Versteeg e Malalasekera, 2007). O cálculo da tensão de Reynolds no modelo de turbulência SST $k-\omega$, tal qual na equação k , é estabelecido mediante equação intrínseca ao modelo $k-\omega$ original de Wilcox (Versteeg e Malalasekera, 2007).

A análise fluidodinâmica computacional concernente ao concentrador híbrido dish foi efetivamente desenvolvida sob regime permanente. As turbinas eólicas verticais requerem impreterivelmente a aplicação do regime transiente em suas simulações CFD, entretanto a aplicação do regime permanente na análise fluidodinâmica computacional de turbinas eólicas horizontais constitui-se numa premissa adequada a caracterização física do sistema analisado (Versteeg e Malalasekera, 2007).

O torque desenvolvido pelo concentrador híbrido dish (T_C) foi determinado mediante análise fluidodinâmica computacional (CFD) estabelecida fundamentalmente no elemento periódico da simulação. Portanto, o torque concernente ao elemento periódico (T_{EP}) apresentado pelo programa computacional Fluent® compreende apenas uma parcela do

torque efetivamente desenvolvido pelo concentrador híbrido dish (T_C). A determinação do torque desenvolvido pelo concentrador híbrido dish (T_C) é estabelecida através da equação 3.61, a qual consiste essencialmente no produto do número de elementos periódicos constituintes do concentrador híbrido dish (N_{PER}) e o torque concernente ao elemento periódico (T_{EP}).

$$T_C = N_{PER} T_{EP} \quad (3.61)$$

A potência de eixo desenvolvida pelo concentrador híbrido dish (P_{EC}), definida pelo produto de seu torque efetivo (T_C) e sua a rotação em rad/s (Ω), é determinada mediante equação 3.62. (Burton et al., 2011).

$$P_{EC} = T_C \Omega \quad (3.62)$$

A área “varrida” (A_V) pelas pás do concentrador híbrido dish, aplicada na determinação da potência eólica disponível (P_{ED}), é estabelecida pela equação 3.63 (Manwell et al., 2010).

$$A_V = \frac{\pi(D_e^2 - D_i^2)}{4} \quad (3.63)$$

A potência eólica disponível ao concentrador híbrido dish (P_{ED}) é determinada através da equação 3.64 (Manwell et al., 2010).

$$P_{ED} = \left(\frac{\rho_{AR} A_V U_\infty^3}{2} \right) \quad (3.64)$$

O coeficiente de potência (C_P), intrínseco ao concentrador híbrido dish, é determinado pela relação estabelecida entre sua potência de eixo (P_{EC}) e a potência eólica disponível (P_{ED}), através da equação 3.65. (Burton et al., 2011).

$$C_P = \frac{P_{EC}}{P_{ED}} \quad (3.65)$$

Fidedignamente ao adotado no projeto solar do sistema híbrido, o rendimento do gerador elétrico (η_{GE}), aplicado a determinação da potência elétrica líquida gerada pela conversão de energia eólica no concentrador híbrido dish (P_{ELE}), consiste em 0,9.

A potência elétrica líquida (P_{ELE}) é determinada efetivamente pela equação 3.66 (Burton et al., 2011).

$$P_{ELE} = \eta_{GE} P_{EC} \quad (3.66)$$

O concentrador híbrido dish consiste efetivamente num conceito inovador de conversão de energia, portanto não há na literatura formulação efetiva aplicada a determinação de seu período de conversão de energia eólica. O período anual de geração de energia elétrica proveniente da conversão de energia eólica no concentrador híbrido dish (T_E) é compreendido fundamentalmente pelo período anual de seu funcionamento em horas. Portanto, uma formulação específica para este período foi estabelecida fundamentada na relação entre a energia elétrica anual gerada teórica (E_{AGST}) relativa ao período de oito horas e a energia elétrica anual gerada (E_{AGS}), ambos concernentes a conversão de energia solar. A energia elétrica anual gerada teórica (E_{AGST}) denota o montante anual gerado pelo sistema de conversão de energia solar operando invariavelmente oito horas por dia sob seu ponto de funcionamento. A energia elétrica anual gerada (E_{AGS}) denota o real montante anual gerado pelo sistema de conversão de energia sol operando sob seu ponto de funcionamento. Portanto, a relação estabelecida entre a energia elétrica anual gerada teórica (E_{AGST}) e a energia elétrica anual gerada (E_{AGS}) multiplicada por oito horas estabelece o período real de conversão de energia solar no sistema híbrido. O período de conversão de energia eólica diário consiste no período do dia em que não há conversão de energia solar. Portanto a subtração de vinte quatro horas da relação entre a energia elétrica anual gerada teórica (E_{AGST}) e a energia elétrica anual gerada (E_{AGS}) multiplicada por oito horas define o período de conversão de energia eólica diário. Analogamente, esta relação estabelecida entre energia elétrica anual gerada teórica (E_{AGST}) e a energia elétrica anual gerada (E_{AGS}) admite a respectiva substituição pela relação entre os fatores de capacidade solar de projeto (F_{CSP}) e o fator de capacidade solar médio anual SAM (F_{CSMS}). Portanto o período anual de geração de energia elétrica (T_E) sob a conversão de energia eólica é determinado pela equação 3.67.

$$T_E = 365 \left(24 - \left(\frac{E_{AGS}}{E_{AGST}} \cdot 8 \right) \right) = 365 \left(24 - \left(\frac{F_{CSMS}}{F_{CSP}} \cdot 8 \right) \right) \quad (3.67)$$

A energia elétrica anual gerada (E_{AGE}) proveniente da conversão de energia eólica no concentrador híbrido dish é determinada mediante aplicação da equação 3.68 (Amenedo, 2003).

$$E_{AGE} = F_{CE} P_{EL} T_E \quad (3.68)$$

4. RESULTADOS

4.1. ESPECIFICAÇÃO GEOGRÁFICA DO SISTEMA HÍBRIDO

Os resultados numéricos apresentados neste tópico inerentes aos parâmetros climáticos intrínsecos a localização geográfica aplicada ao sistema híbrido foram determinados mediante programa computacional desenvolvido em Maple®. Este programa computacional e seus respectivos resultados são demonstrados na figura B.1 integrada ao apêndice B.

A irradiação normal direta média diária inerente ao período de insolação (DNI_{DIS}), estabelecida pelo somatório dos valores da irradiância solar média horária restrita ao período de insolação (I_{HIS}), apresentou o resultado demonstrado pela tabela 4.1.

O resultado da irradiação normal direta média diária inerente ao período de insolação (DNI_{DIS}) estabelecido na tabela 4.1 corresponde a aproximadamente 80% da irradiação normal direta média diária (DNI_D). Conclusivamente, o sistema Dish-Stirling estabelecerá sua operação sob 80% da irradiância solar local, procedendo ao aproveitamento de uma expressiva parcela da disponibilidade solar.

A irradiância solar média diária restrita ao período de insolação (I_{DIS}), intrínseca ao município de Aracati e estabelecida fundamentalmente pela equação 3.1, apresenta seu resultado demonstrado na tabela 4.1.

A irradiância solar de projeto (I_P) estabelecida no município de Aracati, compreendida pela proeminente irradiância solar média horária restrita ao período de insolação (I_{HIS}) acrescida em vinte por cento, apresenta valor numérico estabelecido pela tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Resultados de irradiação e irradiância em Aracati

Irradiação / irradiância	Unidade	Resultado
DNI_{DIS}	[kWh/m ²]	4,58
I_{DIS}	[kW/m ²]	0,572
I_P	[kW/m ²]	0,73

A análise dos resultados da irradiância solar média diária restrita ao período de insolação (I_{DIS}) e irradiância solar de projeto (I_P) indica que o ponto de funcionamento do sistema de conversão de energia solar foi estabelecido a 0,78% do ponto de projeto. Conclusivamente, o sistema de conversão de energia projetado estabelecerá seu funcionamento próximo a sua

plena capacidade, constituindo-se apto a operar sob aumento de irradiância solar de até 0,27% em relação ao ponto de funcionamento.

A determinação do fator de correlação da lei da potência (α_p) intrínseco ao município de Aracati consistiu na aplicação da equação 3.2 fundamentada nas alturas de 50 e 100 metros e posteriormente nas alturas de 100 e 200 metros. Por conseguinte, foram determinados dois fatores de correlação da lei da potência (α_p), dispostos respectivamente na tabela 4.2.

Tabela 4.2 - Resultados concernentes ao fator de correlação da lei da potência (α_p)

H_z/H_r	α_p
50/100	0,0195
100/200	0,0192

Os fatores de correlação da lei da potência (α_p) apresentados na tabela 4.2 apresentam variação de 2% entre si, corroborando a validade destes resultados. A especificação de dois fatores de correlação estabelece invariavelmente a determinação de duas velocidades dos ventos (U_∞) à altura de oito metros, mediante aplicação da equação 3.2. Os resultados referentes às velocidades dos ventos (U_∞) à altura de 8 metros no município de Aracati são apresentados na tabela 4.3.

Tabela 4.3 - Resultados concernentes a velocidade dos ventos (U_∞) à altura de 8 metros

H_z/H_r	α_p	U_∞ [m/s]
8/50	0,0195	6,001
8/50	0,0192	6,004

A análise dos resultados apresentados na tabela 4.3 estabelece efetivamente a velocidade dos ventos (U_∞) à altura de 8 metros em relação ao solo de 6,00 m/s, considerando dois algarismos significativos. A aplicação de dois algarismos significativos na velocidade do vento (U_∞) foi fundamentada nos dados fornecidos por Energydata.info (2018), que apresentam esta grandeza sob o mesmo número de algarismos significativos.

Os resultados demonstrados neste tópico corroboram a notável disponibilidade solar e eólica intrínseca a localização aplicada ao projeto e estudo de viabilidade do sistema híbrido. Conclusivamente, o município de Aracati constitui-se efetivamente numa localidade caracterizada por notável disponibilidade eólica e solar, atendendo a premissa inicialmente estabelecida ao estudo de viabilidade.

4.2. PROJETO SOLAR (SISTEMA HÍBRIDO E DISH-STIRLING CORRESPONDENTE)

Os resultados apresentados neste tópico, estabelecidos pela aplicação da metodologia de dimensionamento geométrico e térmico ao projeto solar do sistema híbrido e seu sistema Dish-Stirling correspondente, foram determinados mediante programa computacional em Maple®. Este programa computacional e seus respectivos resultados são demonstrados nas figuras C.1 e C.2 integrada ao apêndice C e figuras D.1 e D.2 integrada ao apêndice D.

Os resultados numéricos estabelecidos pelo dimensionamento geométrico e térmico do sistema híbrido, inerentes ao ponto de projeto e ponto de funcionamento, são apresentados respectivamente nas tabelas 4.4 e 4.5.

Tabela 4.4 - Dimensionamento do sistema híbrido no ponto de projeto

Parâmetros geométricos e térmicos, eficiências, potências e energia elétrica anual gerada	Simbologia	Unidade	Resultado
Distância focal	f	[m]	6,25
Diâmetro do receptor	D_R	[m]	0,19
Área de abertura do concentrador	A_C	[m ²]	17,28
Área de abertura do receptor	A_R	[m ²]	0,03
Concentração geométrica	C_G		593
Rendimento do concentrador	η_C	[%]	55,05
Temperatura do receptor	T_R	[K]	569
Rendimento do receptor	η_R	[%]	70,17
Rendimento do motor Stirling	η_S	[%]	23,62
Rendimento global	η_G	[%]	8,21
Potência solar disponível	P_{SD}	[kW]	12,61
Potência elétrica líquida	P_{ELS}	[kW]	1,03
Energia elétrica anual gerada teórica (período-24 h)	E_{AGST}	[MWh/ano]	9,07

Tabela 4.5 - Dimensionamento do sistema híbrido no ponto de funcionamento

Parâmetros geométricos e térmicos, eficiências, potências e energia elétrica anual gerada	Simbologia	Unidade	Resultado
Distância focal	f	[m]	6,25
Diâmetro do receptor	D_R	[m]	0,19
Área de abertura do concentrador	A_C	[m ²]	17,28
Área de abertura do receptor	A_R	[m ²]	0,03
Concentração geométrica	C_G		593
Rendimento do concentrador	η_C	[%]	55,05
Temperatura do receptor	T_R	[K]	535
Rendimento do receptor	η_R	[%]	70,02
Rendimento do motor Stirling	η_S	[%]	21,96
Rendimento global	η_G	[%]	7,62
Potência solar disponível	P_{SD}	[kW]	9,88
Potência elétrica líquida	P_{ELS}	[kW]	0,75
Energia elétrica anual gerada teórica (período-8 h)	E_{AGST}	[MWh/ano]	2,20

Os resultados numéricos relativos aos fatores de capacidade e energia elétrica anual gerada pelo sistema híbrido são apresentados na tabela 4.6.

Tabela 4.6 - Fatores de capacidade e energia elétrica anual gerada mediante conversão de energia solar no sistema híbrido

Fatores de capacidade e energia elétrica anual gerada	Simbologia	Unidade	Resultado
Fator de capacidade solar de projeto	F_{CSP}	[%]	24,23
Fator de capacidade solar médio anual teórico	F_{CSMAT}	[%]	19,39
Fator de capacidade solar médio anual SAM	F_{CSMAS}	[%]	16,60
Energia elétrica anual gerada solar	E_{AGS}	[MWh/ano]	1,51

Os resultados numéricos estabelecidos pelo dimensionamento geométrico e térmico do sistema Dish-Stirling correspondente, relativos ao ponto de projeto e ponto de funcionamento, são apresentados respectivamente nas tabelas 4.7 e 4.8.

Tabela 4.7 - Dimensionamento do sistema Dish-Stirling correspondente no ponto de projeto

Parâmetros geométricos e térmicos, eficiências, potências e energia elétrica anual gerada	Simbologia	Unidade	Resultado
Distância focal	f	[m]	6,25
Diâmetro do receptor	D_R	[m]	0,19
Área de abertura do concentrador	A_C	[m ²]	28,27
Área de abertura do receptor	A_R	[m ²]	0,03
Concentração geométrica	C_G		971
Rendimento do concentrador	η_C	[%]	55,05
Temperatura do receptor	T_R	[K]	643
Rendimento do receptor	η_R	[%]	70,48
Rendimento do motor Stirling	η_S	[%]	26,68
Rendimento global	η_G	[%]	9,32
Potência solar disponível	P_{SD}	[kW]	20,64
Potência elétrica líquida	P_{ELS}	[kW]	1,92
Energia elétrica anual gerada teórica (período-24 h)	E_{AGST}	[MWh/ano]	16,84

Tabela 4.8 - Dimensionamento do sistema Dish-Stirling correspondente no ponto de funcionamento

Parâmetros geométricos e térmicos, eficiências, potências e energia elétrica anual gerada	Simbologia	Unidade	Resultado
Distância focal	f	[m]	6,25
Diâmetro do receptor	D_R	[m]	0,19
Área de abertura do concentrador	A_C	[m ²]	28,27
Área de abertura do receptor	A_R	[m ²]	0,03
Concentração geométrica	C_G		971
Rendimento do concentrador	η_C	[%]	55,05
Temperatura do receptor	T_R	[K]	605
Rendimento do receptor	η_R	[%]	70,33
Rendimento do motor Stirling	η_S	[%]	25,21
Rendimento global	η_G	[%]	8,79
Potência solar disponível	P_{SD}	[kW]	16,17
Potência elétrica líquida	P_{ELS}	[kW]	1,42
Energia elétrica anual gerada teórica (período-8 h)	E_{AGST}	[MWh/ano]	4,15

Os resultados numéricos estabelecidos aos fatores de capacidade e energia elétrica anual gerada pelo sistema Dish-Stirling correspondente, são apresentados na tabela 4.9.

Tabela 4.9 - Fatores de capacidade e energia elétrica anual gerada pelo sistema Dish-Stirling correspondente

Fatores de capacidade e energia elétrica anual gerada	Simbologia	Unidade	Resultado
Fator de capacidade solar de projeto	F_{CSP}	[%]	24,63
Fator de capacidade solar médio anual teórico	F_{CSMAT}	[%]	19,71
Fator de capacidade solar médio anual SAM	F_{CSMAS}	[%]	16,60
Energia elétrica anual gerada	E_{AGS}	[MWh/ano]	2,79

Os resultados apresentados nas tabelas 4.4, 4.5, 4.7 e 4.8, estabelecidos sob aspectos geométricos compreendidos pela distância focal (f), diâmetro do receptor (D_R) e área de abertura do receptor (A_R), apresentaram-se iguais em ambos os sistemas sob seus pontos de projeto e funcionamento. Esta conjuntura é decorrente da premissa estabelecida em projeto, a qual determina a aplicação de parâmetros geométricos construtivos do concentrador, compreendidos pelo ângulo de curvatura (φ_C) e diâmetro do concentrador (D_C), em ambos os sistemas. Os valores numéricos estabelecidos a distância focal (f), diâmetro do receptor (D_R) e área de abertura do receptor (A_R) nestas tabelas são análogos aos atribuídos ao sistema Dish-Stirling aplicado na validação do programa em Maple®, mediante tabela 3.5. As pequenas variações estabelecidas na distância focal (f), diâmetro do receptor (D_R) e área de abertura do receptor (A_R) entre os sistemas projetados e o aplicado na validação do programa estão fundamentadas nas diferenças de valores atribuídos ao ângulo de curvatura (φ_C) e diâmetro do concentrador (D_C) entre estes mesmos sistemas.

Os valores atribuídos aos rendimentos dos concentradores dish e híbrido (η_C), sob seus pontos de projeto e funcionamento nas tabelas 4.4, 4.5, 4.7 e 4.8, também são iguais, pois esta eficiência é exclusivamente determinada mediante variáveis compreendidas por características construtivas e fatores, as quais são igualmente aplicadas a ambos os sistemas. A análise comparativa entre os rendimentos dos concentradores projetados nesta dissertação e do concentrador dish concernente ao sistema aplicado na validação do programa demonstra grande discrepância, fundamentada nos valores distintos atribuídos ao produto entre os fatores de sombreamento (F_S) e interceptação (I). Conforme Castellanos et al. (2017), o produto entre estes dois fatores é determinado fundamentalmente pelo ângulo de curvatura (φ_C) através da equação 3.11. Portanto, a discrepância entre valores aplicados ao produto dos

fatores de sombreamento (F_S) e interceptação (I) esta fundamentada na divergência entre os ângulos de curvatura (φ_C) dos concentradores dish e híbrido projetados e o concentrador dish de referência. As demais características geométricas e térmicas, apresentadas nas tabelas 4.4, 4.5, 4.7 e 4.8, são expressas na tabela 4.10 mediante variação estabelecida entre os valores inerentes aos resultados dos sistemas Dish-Stirling correspondente e híbrido, em seus pontos de projeto e ponto de funcionamento.

Tabela 4.10 - Relação e variação percentual entre os resultados concernentes ao sistema híbrido e Dish-Stirling correspondente em seus pontos de projeto e ponto de funcionamento

Parâmetros térmicos, eficiências, potências e energia elétrica anual gerada	Ponto de projeto		Ponto de funcionamento	
	Relação [%]	Variação [%]	Relação [%]	Variação [%]
(A_C) - Área de abertura do concentrador	61,12%	38,88%	61,12%	38,88%
(C_G) - Concentração geométrica	61,07%	38,93%	61,07%	38,93%
(T_R) - Temperatura do receptor	88,49%	11,51%	88,43%	11,57%
(η_R) - Rendimento do receptor	99,56%	0,44%	99,56%	0,44%
(η_S) - Rendimento do motor Stirling	88,53%	11,47%	87,11%	12,89%
(η_G) - Rendimento global	88,09%	11,91%	86,69%	13,31%
(P_{SD}) - Potência solar disponível	61,09%	38,91%	61,10%	38,90%
(P_{EDS}) - Potência elétrica líquida	53,65%	46,35%	52,82%	47,18%
(E_{AGST}) - Energia elétrica anual gerada teórica	53,86%	46,14%	53,01%	46,99%

As áreas de abertura (A_C) dos concentradores solar e híbrido apresentam significativa variação entre si, estabelecida em aproximadamente de 39%, conforme tabela 4.10. Esta variação constitui-se proveniente da diferença de área estabelecida entre concentradores, fundamentada na aplicação de lacunas ao concentrador híbrido dish. Os resultados apresentados nesta mesma tabela concernentes a variação percentual na concentração geométrica (C_G) e potência solar disponível (P_{SD}) entre sistemas, em seus pontos de projeto e funcionamento, demonstram o mesmo valor atribuído à variação entre áreas de abertura (A_C). A correspondência fidedigna de variação destes dois parâmetros e a área de abertura (A_C) constitui-se fundamentada nas equações 3.9 e 3.32, as quais determinam que os valores numéricos da concentração geométrica (C_G) e potência solar disponível (P_{SD}) são diretamente proporcionais a área de abertura (A_C). Conclusivamente, tal como na área de abertura (A_C), a variação na concentração geométrica (C_G) e potência solar disponível (P_{SD}) entre sistemas, em

seus pontos de projeto e funcionamento, constitui-se fundamentada na diferença de área estabelecida entre concentradores, mediante aplicação de lacunas ao concentrador híbrido dish.

A variação entre as temperaturas do receptor (T_R) dos concentradores solar e híbrido, conforme tabela 4.10, foram estabelecidas em torno de 11,5% em ambos os pontos de projeto e funcionamento. Mediante a análise da equação 3.12, conclui-se que estas variações são constituídas por duas parcelas, as quais são determinadas por dois parâmetros: a concentração geométrica (C_G) e a irradiância solar (I_P ou I_{DIS}). A aplicação da irradiância de projeto (I_P) no ponto de projeto e a irradiância solar média diária restrita ao período de insolação (I_{DIS}) no ponto de funcionamento determina a parcela da variação estabelecida entre estes pontos. A concentração geométrica (C_G) estabelece a parcela da variação entre sistema Dish-Stirling e híbrido.

Os rendimentos dos receptores (η_R) entre os sistemas Dish-Stirling e híbrido apresentaram pequena variação, estabelecida em torno de 0,5% em seu ponto de projeto e funcionamento, conforme tabela 4.10. A análise da equação 3.22 demonstra que esta variação constitui-se fundamentada no decréscimo da concentração geométrica (C_G) e temperatura do receptor (T_R) estabelecida ao concentrador híbrido dish em relação ao concentrador solar dish.

Os rendimentos do motor Stirling (η_S) e global (η_G), ponderados na tabela 4.10, apresentam variações médias entre sistemas de aproximadamente 12,5%.

A variação da potência elétrica líquida (P_{EDS}) estabelecida entre sistemas Dish-Stirling e híbrido em seus pontos de projeto e funcionamento consistem aproximadamente em 46,5%, essencialmente estabelecido pela variação nas áreas de abertura (A_C) entre concentradores solar e híbrido de aproximadamente 39%, associado à variação nos rendimentos globais (η_G) entre sistemas de aproximadamente 12%. A comprovação desta composição constituída por duas variáveis (A_C e η_G) estabelecida na definição da variação percentual da potência elétrica líquida (P_{EDS}) é corroborada mediante análise das equações 3.29 e 3.30.

A variação estabelecida sob os fatores de capacidade solar de projeto (F_{CSP}) e solar médio anual teórico (F_{CSAT}), estabelecida fundamentalmente entre os sistemas Dish-Stirling correspondente, apresentou valores iguais, compreendidos por 1,62%. Este resultado é plausível, pois ambos os sistemas de conversão de energia solar são análogos, diferenciando entre si unicamente pela área dos refletores, fator que influencia diretamente a energia elétrica anual gerada (E_{AGS}). Esta afirmação é comprovada pelo resultado apresentado na tabela 4.11, a qual demonstra uma variação de 45,88% entre a energia gerada pelo sistema híbrido e Dish-Stirling correspondente.

Tabela 4.11 - Relação entre os resultados concernentes ao sistema híbrido e Dish-Stirling correspondente em seus pontos de projeto e ponto de funcionamento

Fatores de capacidade e energia elétrica anual gerada	Relação [%]	Variação [%]
(F_{CSP}) - Fator de capacidade solar de projeto	98,38%	1,62%
(F_{CSAT}) - Fator de capacidade solar médio anual teórico	98,38%	1,62%
(E_{AGS}) - Energia elétrica anual gerada	54,12%	45,88%

4.3. PROJETO EÓLICO DO SISTEMA HÍBRIDO

Os resultados numéricos apresentados neste tópico, estabelecidos fundamentalmente pela metodologia aplicada ao projeto eólico do sistema híbrido, foram determinados mediante programa computacional desenvolvido em Maple®. Este programa computacional e seus respectivos resultados são demonstrados na figura E.1 e E.2 integrada ao apêndice E.

A velocidade angular do concentrador híbrido dish expressa em radianos por segundo (Ω), intrínseca a razão de velocidades na ponta da pá preliminarmente aplicada ao projeto eólico ($\lambda=1,04$), apresentou o resultado demonstrado na tabela 4.12.

O resultado da velocidade angular do concentrador híbrido expressa em rotações por minuto (n) é demonstrado pela tabela 4.12.

O número de Reynolds (Re), intrínseco à velocidade do vento de projeto ($U_{\infty}=6\text{m/s}$) o qual invariavelmente atravessa o concentrador híbrido dish, apresentou o resultado denotado pela tabela 4.12.

Tabela 4.12 - Resultado de velocidade angular e número de Reynolds

Velocidades / grandeza adimensional	Unidade	Resultado
Velocidade angular (Ω)	[rad/s]	2,08
Velocidade angular (n)	[rpm]	20
Número de Reynolds (Re)		$2,45 \times 10^6$

Os ângulos de ataque (α), coeficientes de sustentação (C_L), coeficientes de arrasto (C_D) e relação entre coeficientes de sustentação e arrasto (C_L/C_D), concernentes ao perfil NACA 4415 sob o número de Reynolds (Re) de projeto, são apresentados na tabela 4.13.

Tabela 4.13 - Ângulos de ataque (α), coeficientes de sustentação (C_L), coeficientes de arrasto (C_D) e relação entre coeficientes de sustentação e arrasto (C_L/C_D)

α [°]	C_L	C_D	C_L/C_D
0,00	0,40	0,01	48,90
0,75	0,47	0,01	57,18
1,00	0,49	0,01	59,90
1,25	0,51	0,01	62,61
1,50	0,53	0,01	65,20
1,75	0,55	0,01	68,30
2,00	0,57	0,01	71,20
2,25	0,59	0,01	74,43
2,50	0,61	0,01	77,49
2,75	0,63	0,01	80,00
3,00	0,65	0,01	82,87
3,25	0,66	0,01	85,26
3,50	0,69	0,01	90,42
3,75	0,85	0,01	103,83
4,00	0,88	0,01	105,00
4,25	0,91	0,01	105,63
4,50	0,95	0,01	107,32
4,75	0,99	0,01	109,09
5,00	1,00	0,01	108,80
5,25	1,02	0,01	108,80
5,50	1,03	0,01	108,48
5,75	1,05	0,01	108,40
6,00	1,06	0,01	107,54
6,25	1,08	0,01	106,93
6,50	1,10	0,01	106,03
6,75	1,11	0,01	104,82
7,00	1,13	0,01	104,07
7,25	1,15	0,01	102,63
7,50	1,16	0,01	101,05
7,75	1,18	0,01	99,48
8,00	1,19	0,01	97,56

Fonte: Adaptado de Airfoil Tools (2018)

A análise dos dados contidos na tabela 4.13, indica a melhor relação (C_L/C_D) aplicável ao projeto do concentrador híbrido dish 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 no projeto estão descritos na tabela 4.14.

Tabela 4.14- Ângulo de ataque (α), coeficiente de sustentação (C_L), coeficiente de arrasto (C_D) e relação entre estes coeficientes (C_L/C_D) aplicados ao projeto eólico

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

A especificação da relação entre coeficiente de sustentação e arrasto (C_L/C_D) intrínseca ao projeto do concentrador híbrido dish, associada às suas especificações de número de pás (N_{PA}), determina-se mediante equação 3.30 a curva característica do coeficiente de potência máxima teórico do concentrador híbrido dish. A figura 4.1 apresenta a curva característica do coeficiente de potência máximo teórico do concentrador híbrido dish (C_{PMTTC}) no diagrama do coeficiente de potência (C_P) em função da razão de velocidades na ponta da pá (λ).

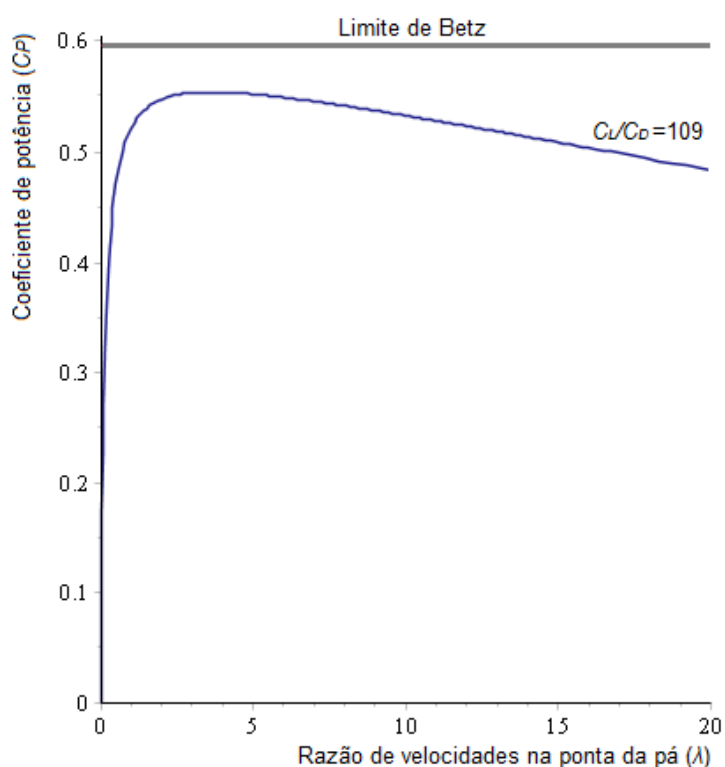


Figura 4.1 - Curva de coeficiente de potência máximo teórico do concentrador híbrido (C_{PMTTC})

O coeficiente de potência máximo teórico do concentrador híbrido dish (C_{PMTTC}) foi determinado fundamentalmente através da equação 3.30, apresentando o resultado denotado pela tabela 4.15.

Tabela 4.15 - Coeficiente de potência máximo teórico do concentrador híbrido (C_{PMTTC})

Grandeza adimensional	Resultado
C_{PMTTC}	0,5245

A aplicação do resultado estabelecido pela tabela 4.15 na equação 3.31 culminou na obtenção de três raízes alusivas ao fator de indução axial (a). Estas três raízes, denominadas respectivamente por (a_1), (a_2) e (a_3), são descritas na tabela 4.16.

Tabela 4.16- Resultado das raízes alusivas ao fator de indução axial (a)

α_1	α_2	α_3
0,2102	0,4741	1,3160

A análise das raízes (a_1), (a_2) e (a_3), fundamentada em critérios de aprovação estabelecidos no tópico 3.5, culminou na especificação do fator de indução axial (a) igual à raiz (a_1).

A determinação do fator de indução axial (a) estabeleceu invariavelmente a especificação da velocidade do vento no concentrador híbrido dish (U_D), denotada pela tabela 4.17.

Tabela 4.17 - Velocidade do vento no concentrador híbrido dish (U_D)

Velocidade	Unidade	Resultado
Vento no concentrador híbrido (U_D)	[m/s]	4,74

Os resultados das grandezas de funcionamento e adimensionais intrínsecos ao concentrador híbrido dish, determinadas fundamentalmente através das equações 3.41 a 3.48, são apresentados na tabela 4.18.

Tabela 4.18 - Resultados das grandezas de funcionamento e adimensionais do concentrador híbrido

Grandezas de funcionamento e adimensionais concernentes ao concentrador híbrido dish	Simbologia	Unidade	Resultado
Vazão de ar	Q	[m ³ /s]	46,91
Área projetada relativa às lacunas	A_{PL}	[m]	11,00
Altura de energia	H	[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	D_{ic}/D_e		0,81
Rotação específica	n_{qA}		372
Coefficiente de diâmetro	δ_D		1,70
Coefficiente de ligeireza	σ_L		0,78
Coefficiente de pressão	ψ		0,57
Coefficiente de pressão relativo ao diagrama 3.16	$10*\psi^{0,5}$		7,60

Os resultados apresentados na tabela 4.18, concernentes as grandezas adimensionais, foram fundamentalmente aplicados na determinação do ponto de projeto do concentrador híbrido dish nos diagramas das figuras 4.2 e 4.3.

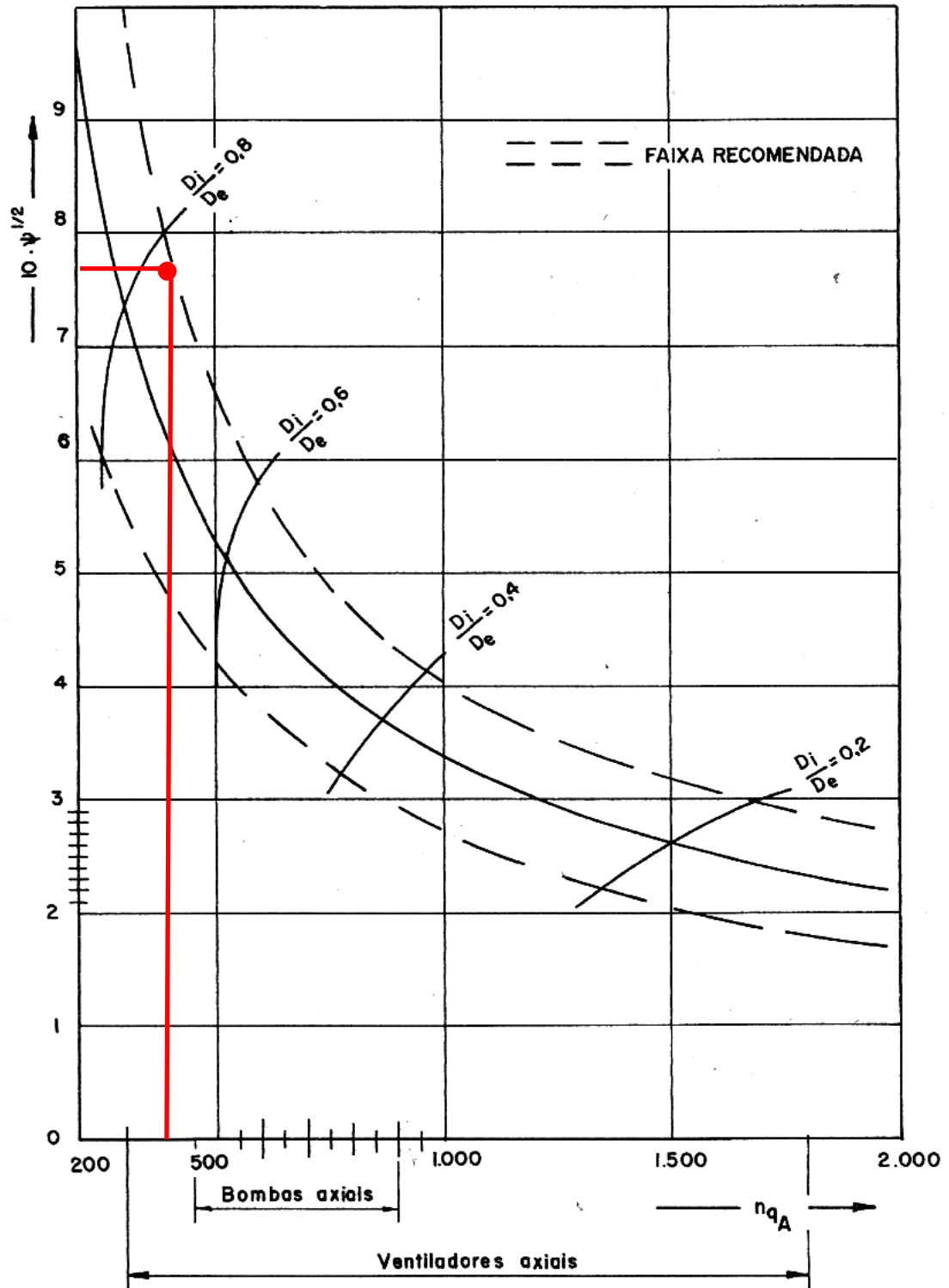


Figura 4.2 - Ponto de projeto do concentrador híbrido no diagrama de dimensionamento de rotores de ventiladores

Fonte: Adaptado de Bran e Souza (1969)

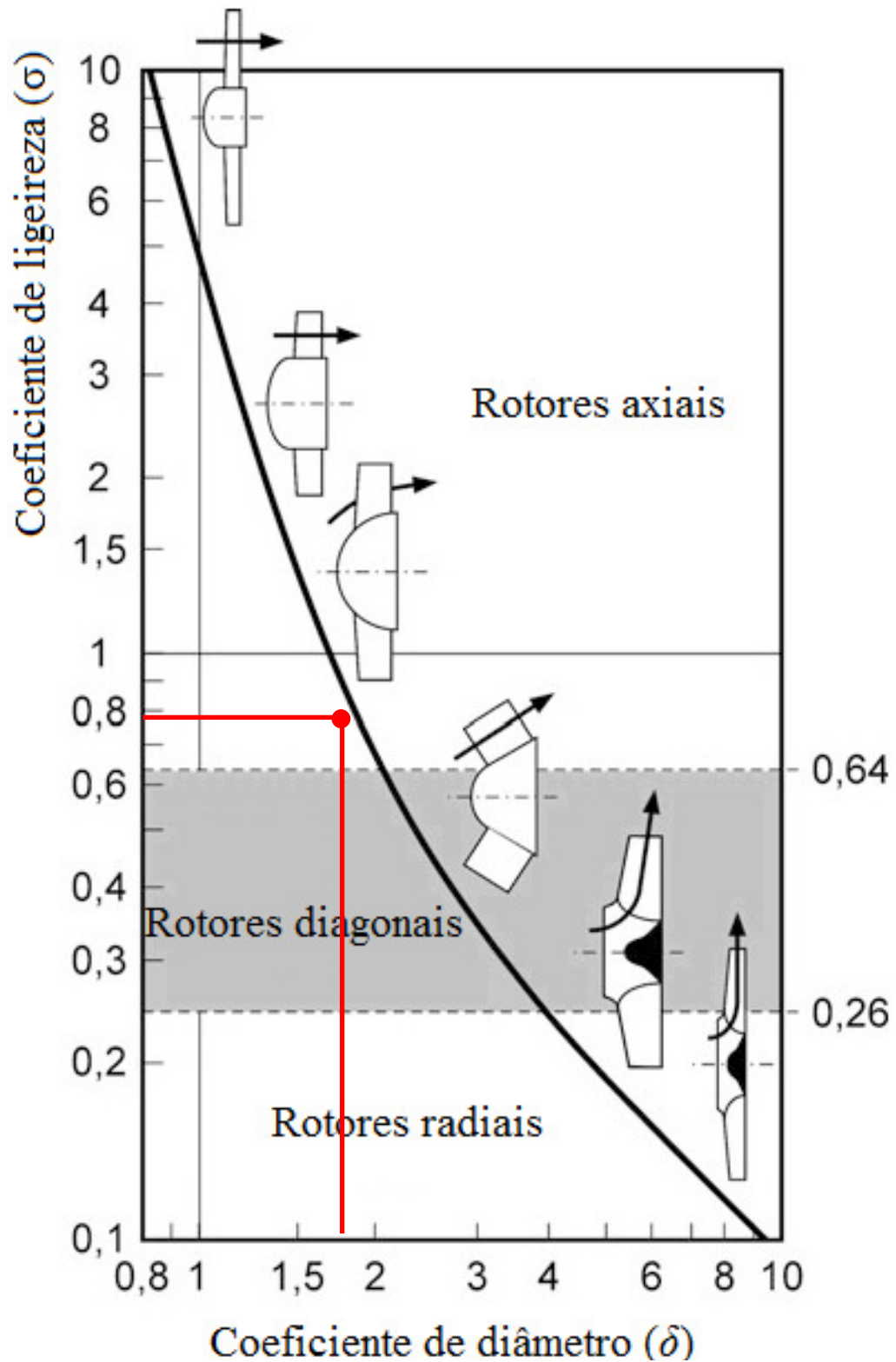


Figura 4.3 - Ponto de projeto do concentrador híbrido no diagrama de Cordier
 Fonte: Adaptado de Bohl (2008)

Os resultados intrínsecos aos elementos de pá, constituídos por grandezas adimensionais, parâmetros geométricos e velocidades, fundamentalmente determinados pelas equações 3.49 a 3.68, são apresentados na tabela 4.19.

Tabela 4.19 - Resultados intrínsecos aos elementos de pá aplicados ao projeto eólico

Parâmetros geométricos, grandezas adimensionais e velocidades concernentes aos elementos de pá	Simbologia	Unidade	Elemento de pá										
			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	λ_r		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	[°]	43,73	44,10	43,67	42,76	41,58	40,26	38,86	37,44	36,04	34,67	33,36
Ângulo de passo	β_r	[°]	38,98	39,35	38,92	38,01	36,83	35,51	34,11	32,69	31,29	29,92	28,61
Corda	c_r	[m]	0,26	0,27	0,26	0,26	0,25	0,25	0,24	0,23	0,22	0,22	0,21

O número de elementos de pá aplicado a determinação da solidez do concentrador híbrido dish (b_s), especificado segundo critério estabelecido no tópico 3.5, é apresentado na tabela 4.20. O resultado da solidez do concentrador híbrido dish (σ_{Sch}), determinado fundamentalmente pelas equações 3.63 a 3.71 sob número de elementos de pá (b_s), é demonstrado na tabela 4.20.

Tabela 4.20 - Número de elementos de pá (b_s) e solidez do concentrador híbrido (σ_{Sch})

Parâmetro e grandeza adimensional	Resultado
Elementos de pá aplicados solidez do concentrador híbrido (b_s)	5000
Solidez do concentrador híbrido dish (σ_{Sch})	0,723

O valor estabelecido à solidez do concentrador híbrido dish (σ_{SCH}) e o respectivo valor atribuído a razão de velocidades na ponta da pá (λ) foram aplicados ao diagrama proposto por Park (1981), estabelecendo o ponto de projeto do concentrador híbrido dish. A figura 4.4 apresenta o referido digrama e o respectivo ponto de projeto do concentrador híbrido dish.

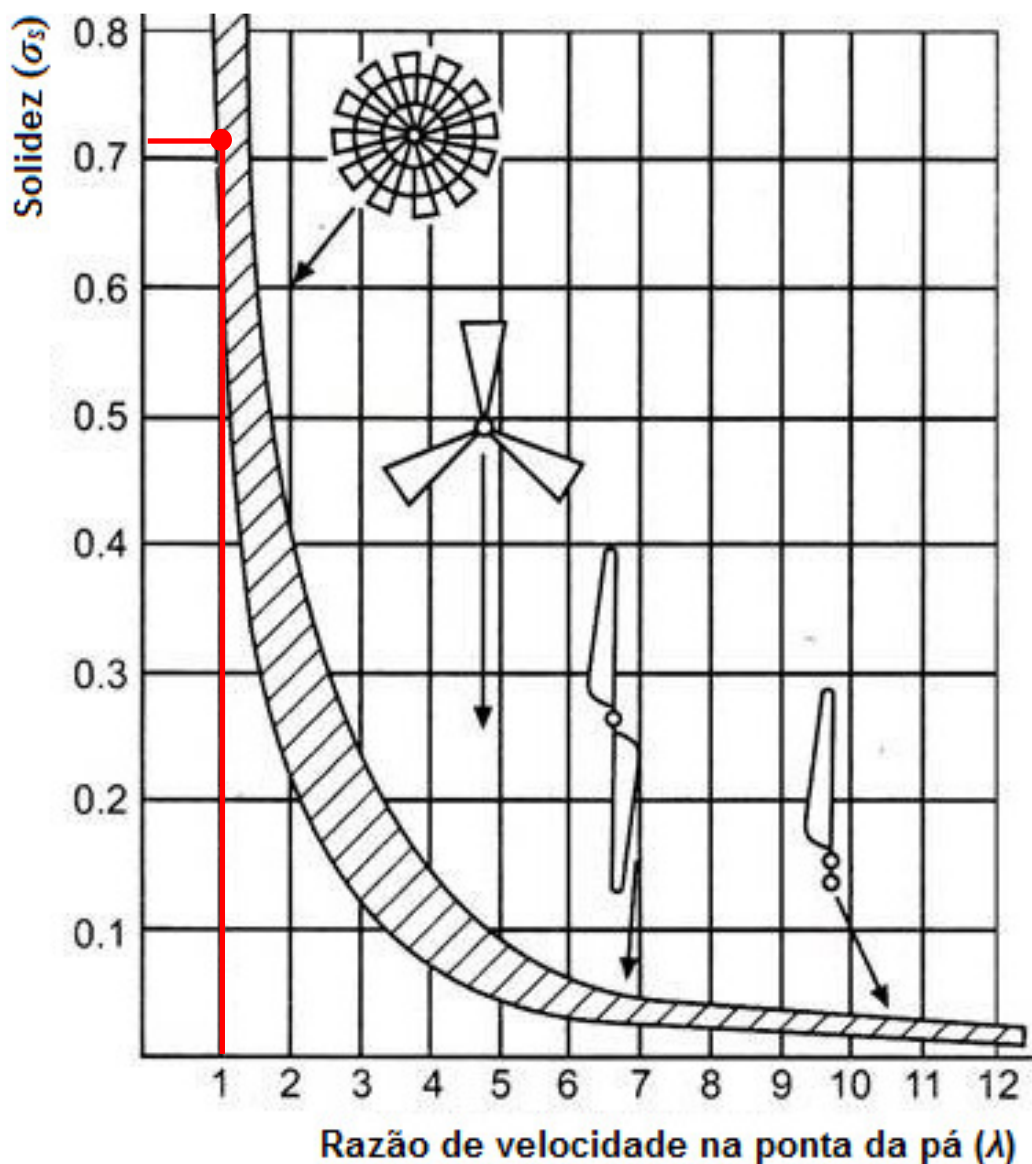


Figura 4.4 - Ponto de projeto do concentrador híbrido no diagrama de solidez (σ_s) x razão de velocidades na ponta da pá (λ)

Fonte: Adaptado de Park (1981)

Os resultados apresentados nos diagramas das figuras 4.2, 4.3 e 4.4 corroboram a efetividade da aplicação da metodologia intrínseca ao dimensionamento de ventiladores associada à aplicação da teoria da quantidade de movimento do elemento de pá (BEM) ao projeto eólico do concentrador híbrido dish. A análise estabelecida sob estes diagramas, fundamentada nos pontos de projeto estabelecidos neste tópico, nas curvas e intervalos

intrínsecos a rotores otimizados, classifica o projeto eólico do concentrador híbrido dish em otimizado, atestando a validade da metodologia aplicada.

4.4. DESENHO 3D DO CONCENTRADOR HÍBRIDO DISH E DOMÍNIOS

Os resultados do projeto do concentrador híbrido dish, apresentados no tópico 4.3 associados às especificações definidas no tópico 3.4, estabeleceram invariavelmente os parâmetros geométricos fundamentais aplicados ao modelamento 3D do concentrador híbrido dish mediante aplicação do software AutoCAD®.

O NACA4415 constitui o perfil aerodinâmico aplicado ao modelamento 3D das pás do concentrador híbrido dish mediante seu respectivo desenho 2D, o qual foi estabelecido fundamentalmente sob coordenadas cartesianas provenientes da tabela D.1 integrada ao anexo D. Portanto, o desenho 2D concernente ao perfil NACA4415 aplicado ao modelamento 3D das pás do concentrador híbrido dish é demonstrado na figura 4.5.

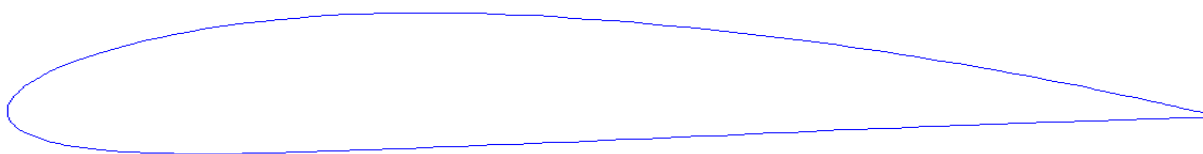


Figura 4.5 - Desenho 2D do perfil NACA4415

O modelo 3D do concentrador híbrido dish é apresentado na figura 4.6 sob sua vista isométrica, vista lateral e sua vista frontal.

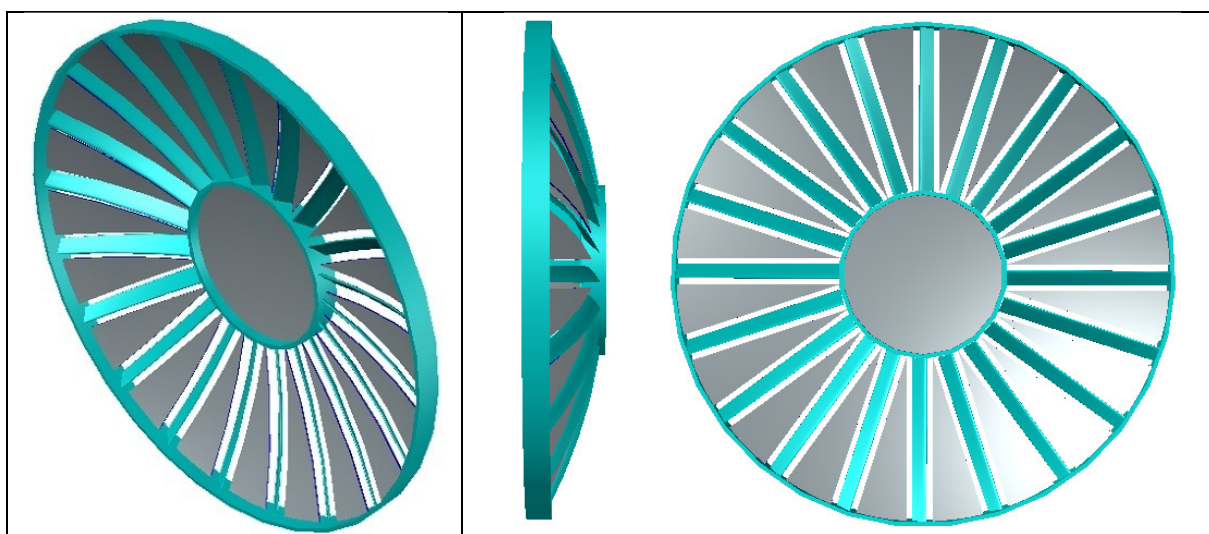


Figura 4.6 - Vista isométrica (esquerda), frontal e lateral (direita) do concentrador híbrido

O modelo 3D do concentrador híbrido dish não é integralmente aplicado a análise fluidodinâmica computacional desenvolvida nesta dissertação, pois esta aplica efetivamente a função denominada periodicidade. Portanto, a análise CFD aplica uma fração deste modelo 3D, compreendida fundamentalmente por 1/20 do concentrador híbrido dish conforme demonstrado na região esquerda superior da figura 4.7. Esta fração deste concentrador, denominada concentrador híbrido dish periódico, é apresentada na região direita superior da figura 4.7 sob sua vista isométrica e na região inferior desta figura, a vista detalhada.

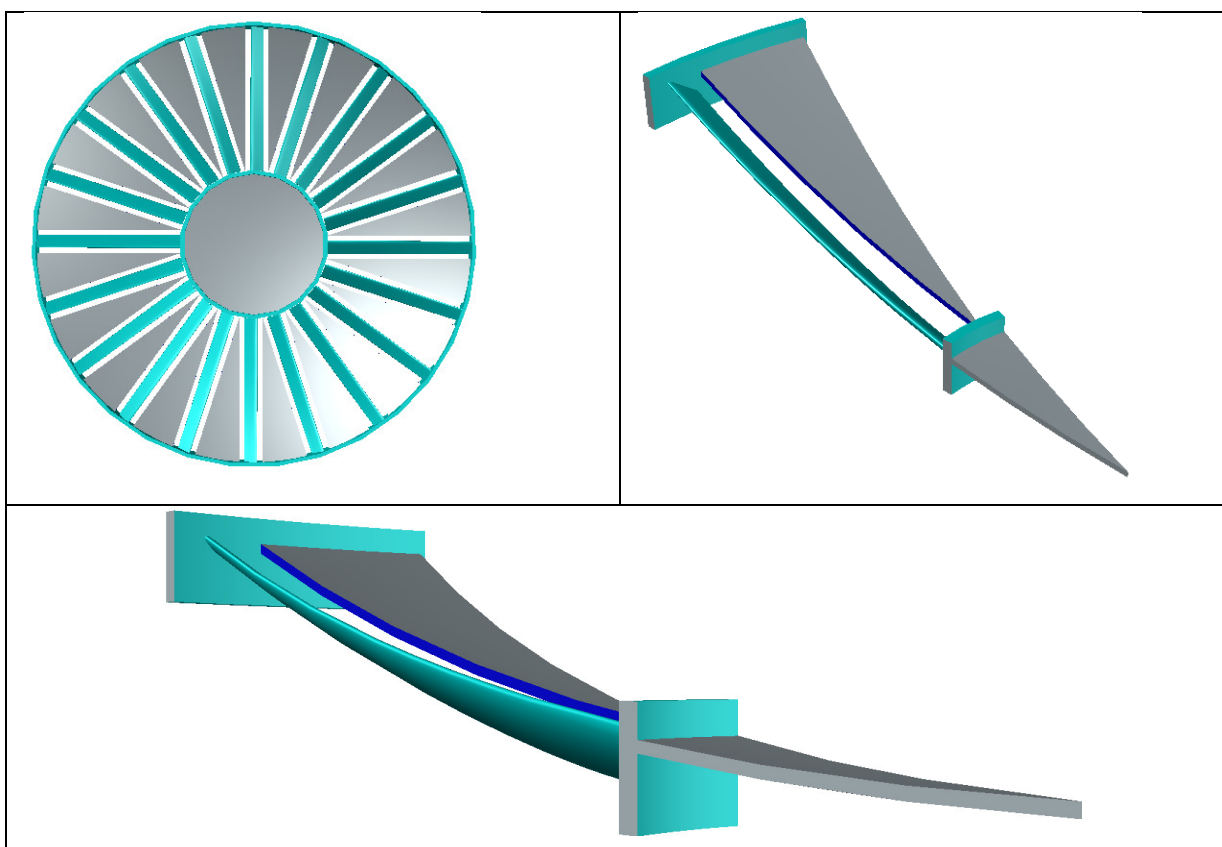


Figura 4.7 - Concentrador híbrido e concentrador híbrido periódico (esquerda superior), vista isométrica (direita superior) e detalhe (inferior) do concentrador híbrido periódico

A análise fluidodinâmica computacional demanda a caracterização de duas regiões distintas concernente ao volume compreendido pelo fluido aplicado a esta simulação. Estas regiões são respectivamente denominadas domínio geral e domínio rotativo. Igualmente ao estabelecido no concentrador híbrido dish, estas regiões demandam a aplicação de uma fração de seus volumes compreendidos por 1/20 de seu volume total, denominadas respectivamente domínio geral periódico e domínio rotativo periódico.

A figura 4.8 apresenta em sua direita superior o desenho 3D do concentrador híbrido dish periódico. Em sua esquerda superior, a figura 4.8 apresenta o desenho 3D do domínio rotativo

periódico integrado ao concentrador híbrido dish periódico. Na região inferior, a figura 4.8 apresenta o desenho 3D do domínio geral periódico integrado ao domínio rotativo periódico que concomitantemente é integrado ao concentrador híbrido dish periódico. O domínio geral periódico integrado ao domínio rotativo periódico que concomitantemente é integrado ao concentrador híbrido dish periódico estabelece efetivamente o elemento periódico aplicado à simulação.

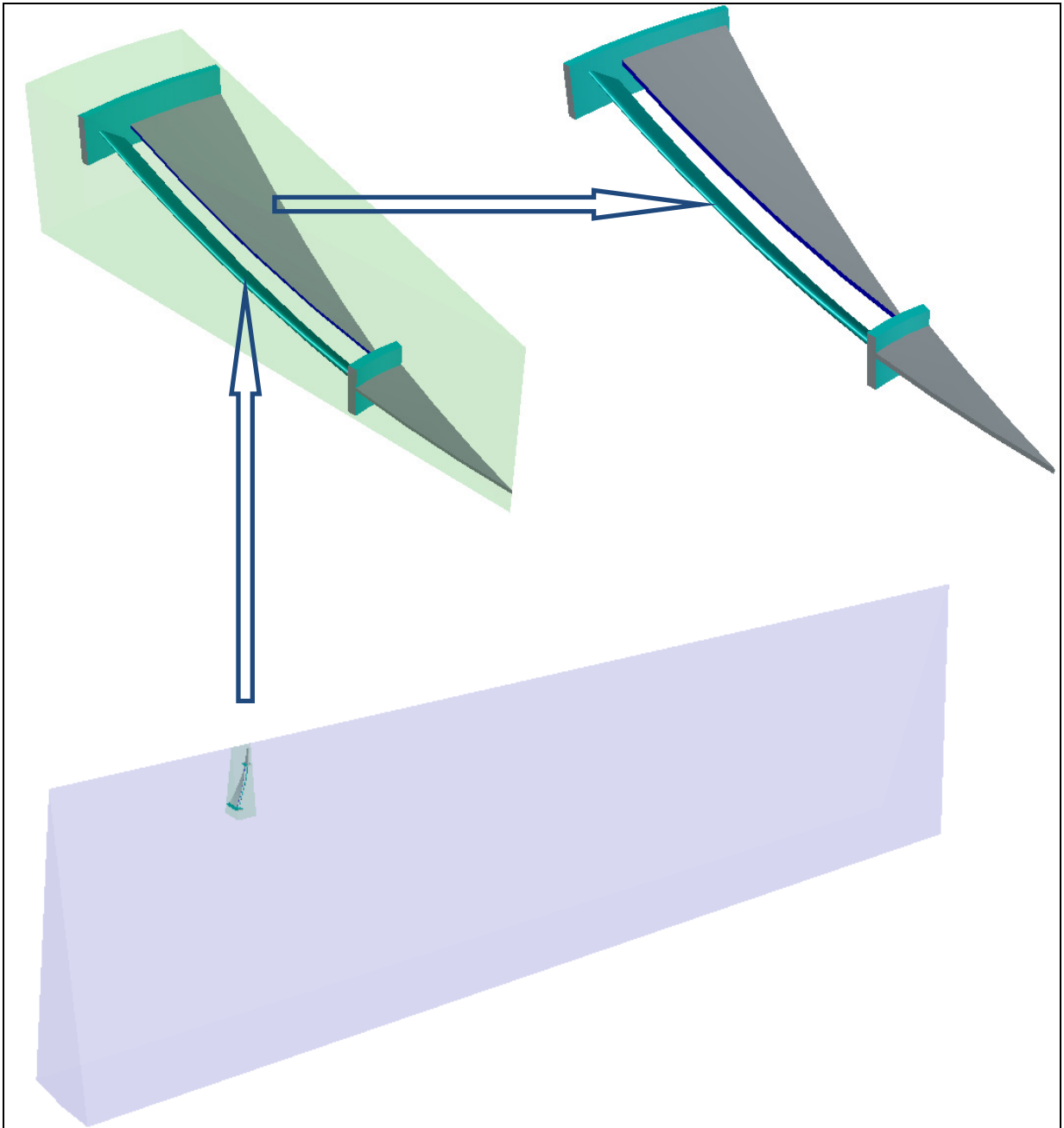


Figura 4.8 - Elemento periódico (inferior), domínio rotativo periódico integrado ao concentrador híbrido periódico (esquerda superior) e concentrador híbrido periódico (direita superior)

4.5. ANÁLISE CFD APLICADA AO PROJETO EÓLICO

O desenho 3D desenvolvido em AutoCAD® do elemento periódico foi exportado ao Ansys DesignModeler®. Este software, mediante operações booleanas de subtração estabelecidas primeiramente entre o domínio geral periódico e domínio rotativo periódico e posteriormente, entre o domínio rotativo periódico e o elemento periódico, definiu o desenho 3D definitivo aplicado ao desenvolvimento da malha. As operações booleanas de subtração estabeleceram a modificação nos três desenhos integrados (domínio geral periódico, domínio rotativo periódico e concentrador híbrido dish periódico) em duas regiões distintas e independentes, compreendidas efetivamente pela região do domínio geral periódico e domínio rotativo periódico. Por conseguinte, o elemento periódico após as operações booleanas de subtração é efetivamente compreendido pelas regiões do domínio geral periódico e domínio rotativo periódico. A figura 4.9 apresenta o elemento periódico e as regiões do domínio geral periódico e domínio rotativo periódico.

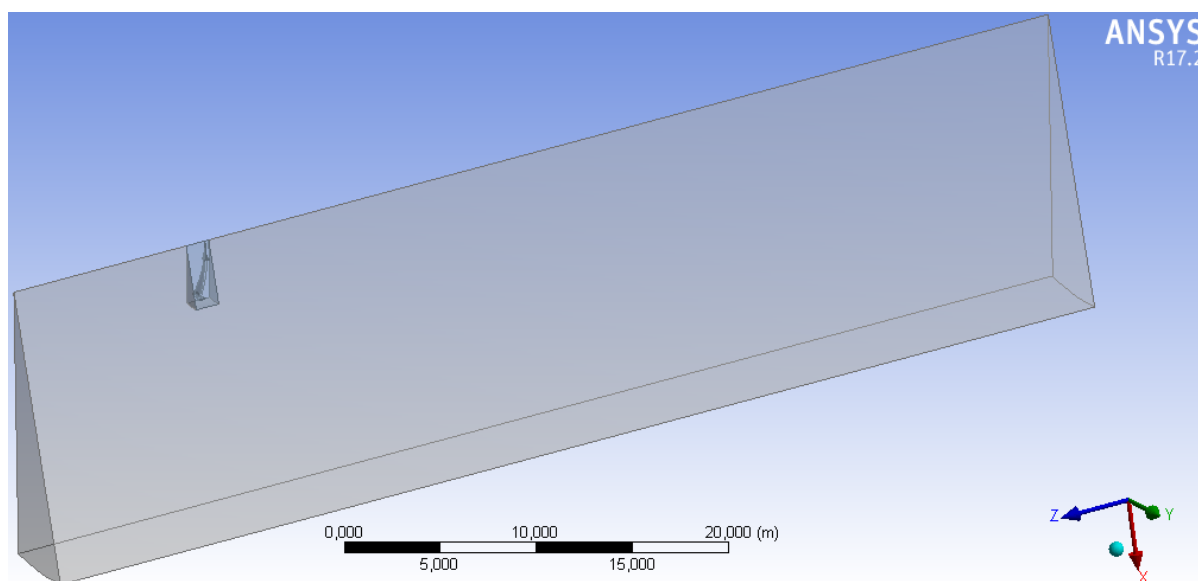


Figura 4.9 - Elemento periódico, domínio geral periódico e domínio rotativo periódico

As malhas aplicadas a análise fluidodinâmica computacional, intrínsecas ao elemento periódico, foram desenvolvidas mediante aplicação do software Ansys Meshing®. As malhas desenvolvidas são efetivamente duas, estabelecidas sob a região do domínio geral periódico e domínio rotativo periódico. As figuras 4.10 e 4.11 apresentam ambas as malhas desenvolvidas.

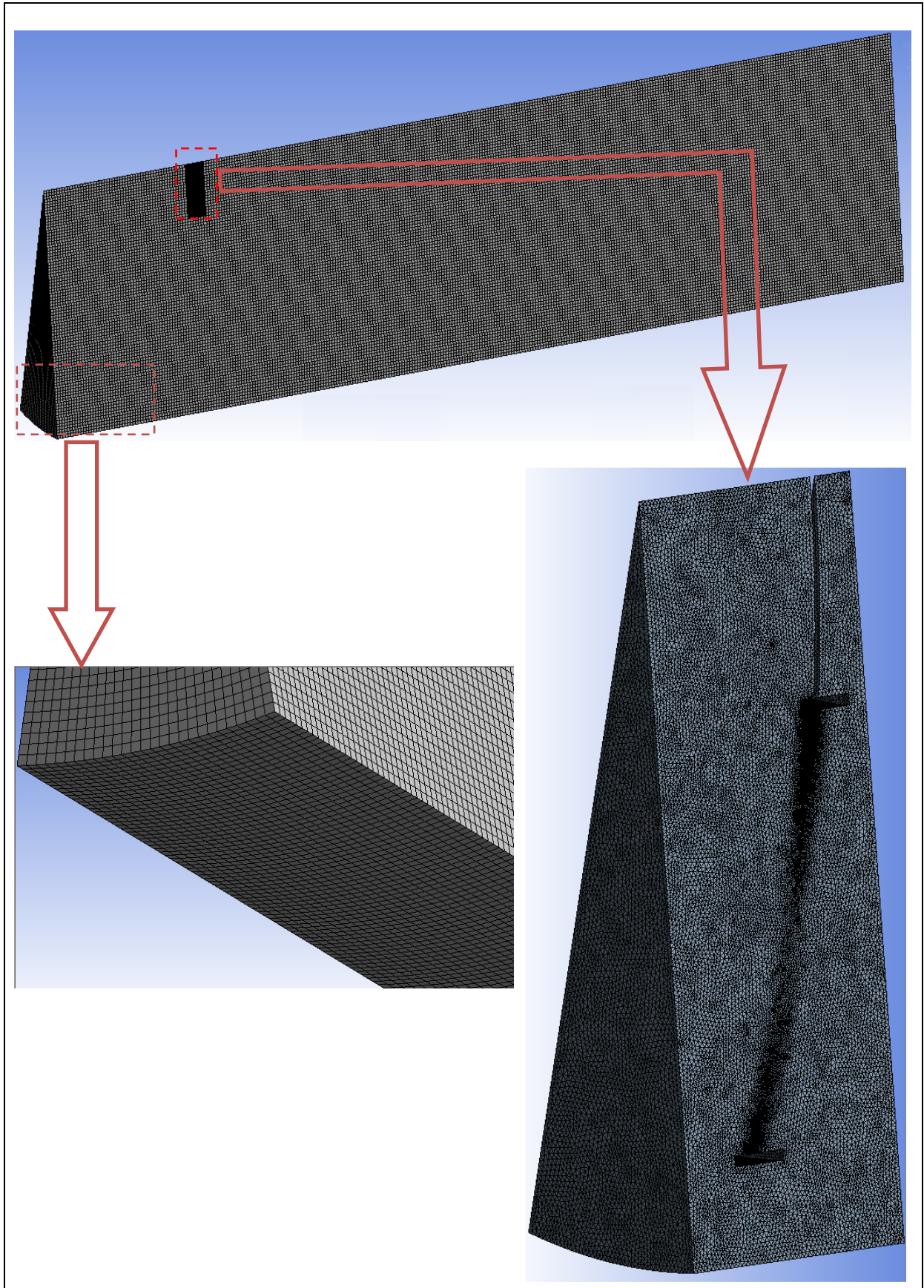


Figura 4.10 - Malha do elemento periódico (superior), detalhe da malha do domínio geral periódico (inferior esquerdo) e malha do domínio rotativo periódico (direita inferior)

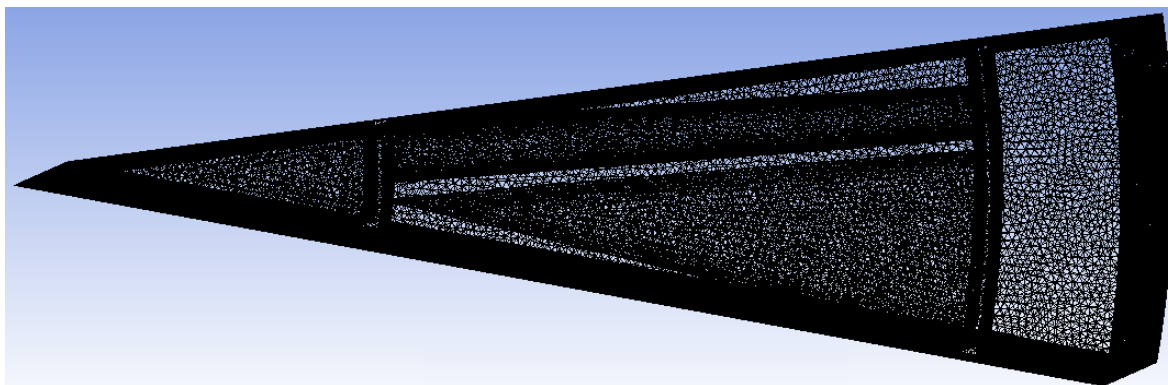


Figura 4.11 - Detalhe da malha (wireframe) concernente ao domínio rotativo

O número de elementos de malha e o número de nós das malhas concernentes ao domínio rotativo, domínio geral e o elemento periódico são apresentados na tabela 4.21.

Tabela 4.21 - Especificações quantitativas concernentes aos elementos e nós das malhas

Especificações da malha	Domínio rotativo	Domínio geral	Elemento periódico
Número de elementos	3.231.193	739.989	3.971.182
Número de nós	584.994	770.795	1.355.789

As malhas das regiões do domínio rotativo e domínio geral foram desenvolvidas mediante aplicação de distintas funções disponíveis no software Ansys Meshing®, culminando invariavelmente em duas malhas constituídas por elementos de malha distintos entre si. A malha do domínio geral foi estabelecida mediante função “*multizone*”, a qual aplica elementos de malha prismáticos de base quadrangular (tipo Hex 8) e elementos prismáticos de base triangular (tipo Wed 6). A malha do domínio rotativo foi estabelecida mediante função “*Patch conforming*”, a qual aplica elementos de malha tetraédricos de topologia Tet4.

A qualidade da malha desenvolvida foi analisada mediante dois critérios estabelecidos em ANSYS (2016), denominados respectivamente Skewness (torção) e Orthogonal Quality (qualidade ortogonal).

A figura 4.12 apresenta a escala aplicada na avaliação da torção (Skewness) dos elementos de malha.

Excelente	Muito bom	Bom	Aceitável	Ruim	Inaceitável
0-0.25	0.25-0.50	0.50-0.80	0.80-0.94	0.95-0.97	0.98-1.00

Figura 4.12 - Escala analítica da torção dos elementos de malha
Autor: ANSYS (2016)

Os valores concernentes a torção (Skewness) dos elementos da malha desenvolvida são demonstradas na tabela 4.22.

Tabela 4.22 - Torção (Skewness) dos elementos de malha

Torção (Skewness)			
Elementos de malha	Domínio rotativo	Domínio geral	Elemento periódico
Média	0,22	$1,51 \cdot 10^{-2}$	0,88
Mínimo	$6,42 \cdot 10^{-2}$	$3,63 \cdot 10^{-2}$	$2,28 \cdot 10^{-2}$
Máximo	0,81	0,99	1
Desvio padrão	0,12	0,10	0,10

Os resultados apresentados na tabela 4.22 concernentes ao domínio rotativo, classificados conforme escala aplicada na avaliação da torção (Skewness) apresentada na figura 4.12, estabelece a todos os elementos de malha a qualidade excelente, muito bom e bom.


Os resultados apresentados na tabela 4.22 concernentes ao domínio geral, classificados conforme escala aplicada na avaliação da torção (Skewness) e analisados mediante valor de sua média, desvio padrão e a definição da população mínima de seis sigmas, estabelecem que mais de 97% dos elementos de malha do domínio geral apresentam qualidade excelente, muito bom e bom.

Os valores intrínsecos a qualidade ortogonal (orthogonal quality) dos elementos da malha desenvolvida são efetivamente demonstradas na tabela 4.23.

Tabela 4.23 - Qualidade ortogonal (orthogonal quality) dos elementos de malha

Qualidade ortogonal (Orthogonal Quality)			
Elementos de malha	Domínio rotativo	Domínio geral	Elemento periódico
Média	0,86	0,96	0,88
Mínimo	0,99	$2,52 \cdot 10^{-2}$	$2,28 \cdot 10^{-2}$
Máximo	0,26	1	1
Desvio padrão	$8,52 \cdot 10^{-2}$	0,15	0,11

A figura 4.13 apresenta a escala aplicada na avaliação da qualidade ortogonal (orthogonal quality) dos elementos de malha.



Inaceitável	Ruim	Aceitável	Bom	Muito bom	Excelente
0-0.001	0.001-0.14	0.15-0.20	0.20-0.69	0.70-0.95	0.95-1.00

Figura 4.13 - Escala analítica da qualidade ortogonal dos elementos de malha
Autor: ANSYS (2016)

Os resultados apresentados na tabela 4.23 inerentes ao domínio rotativo, classificados conforme escala aplicada na avaliação da qualidade ortogonal (orthogonal quality) apresentada na figura 4.13, estabelece a todos os elementos de malha a qualidade excelente, muito bom e bom.

Os resultados apresentados na tabela 4.23 relativos ao domínio geral, classificados conforme escala aplicada na avaliação da qualidade ortogonal (orthogonal quality) e analisados mediante valor de sua média, desvio padrão e a população mínima concernente a seis sigmas, estabelecem que mais de 97% dos elementos de malha do domínio geral apresentam qualidade excelente, muito bom e bom.

Os resultados obtidos intrínsecos ao domínio rotativo e domínio geral estabelecidos sob os parâmetros de torção (Skewness) e qualidade ortogonal (orthogonal quality) são suficientes para a aprovação da malha, conforme critérios estabelecidos pela ANSYS®.

A análise fluidodinâmica computacional foi fundamentalmente desenvolvida mediante aplicação do software Ansys Fluent®. O modelo de turbulência aplicado na análise fluidodinâmica computacional do concentrador híbrido dish consiste no $k-\omega$ SST. A análise fluidodinâmica computacional estabelecida ao concentrador híbrido dish foi efetivamente desenvolvida sob regime permanente.

O domínio geral periódico e domínio rotativo periódico são definidos no Ansys Fluent® fundamentalmente sob a especificação de material concernente ao ar. A rotação desenvolvida pelo domínio rotativo, estabelecida efetivamente no projeto eólico do concentrado híbrido dish em 20 RPM, é especificada mediante aplicação da função “*Frame Motion*” intrínseca a operação de configuração dos domínios no Ansys Fluent® denominada “*cell zone condition*”.

As condições de contorno aplicadas as superfícies (paredes) do domínio geral periódico são especificadas no Ansys Fluent® mediante operação de configuração denominada de modo inteligível por “*boundary condition*”. As superfícies caracterizadas nesta operação de configuração, demonstradas na figura 4.14, são denominadas respectivamente por entrada, saída e fronteira.

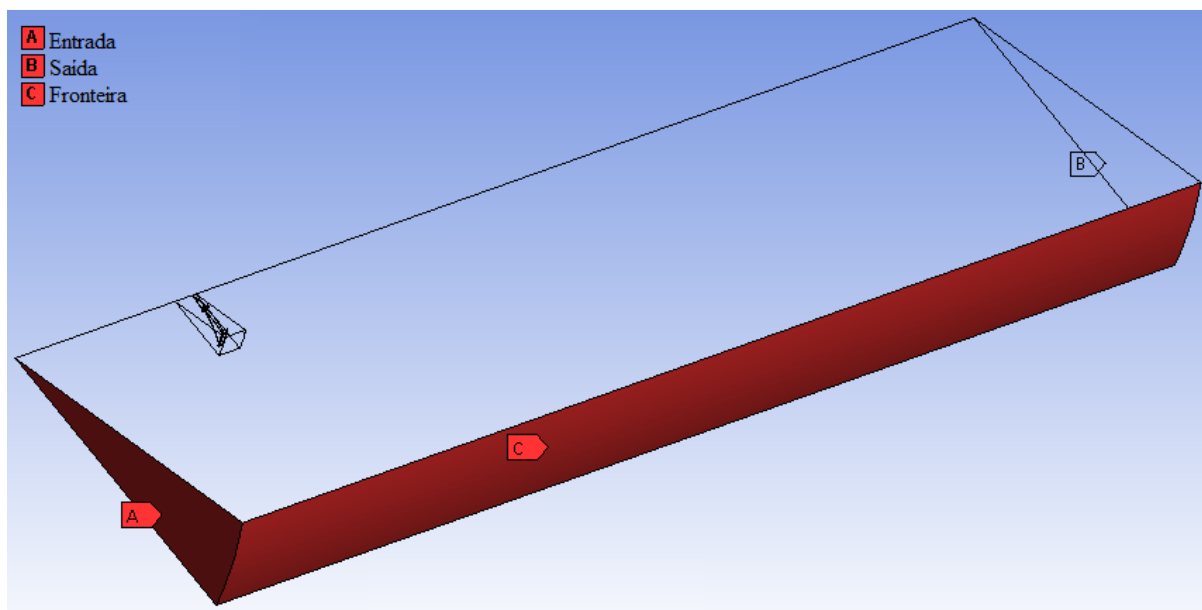


Figura 4.14 - Superfícies de entrada, saída e fronteira do elemento periódico

A velocidade da corrente livre (U_∞) de projeto, especificada em 6 m/s no tópico 4.1, foi especificada nas superfícies de entrada e fronteira. A pressão atmosférica foi especificada na superfície de saída em termos de pressão absoluta, sob valor numérico de 0 Pa.

O algoritmo de solução aplicado ao acoplamento da velocidade e pressão sob regime permanente aplicado a análise fluidodinâmica computacional do concentrador híbrido dish consiste no SIMPLE.

A tabela 4.24 apresenta as configurações aplicadas aos respectivos parâmetros intrínsecos a discretização espacial concernente a análise fluidodinâmica computacional do concentrador híbrido dish.

Tabela 4.24 - Parâmetros de discretização espacial aplicados ao CFD do concentrador híbrido

Parâmetros intrínsecos a discretização espacial	Configuração
Gradiente	Método dos mínimos quadrados
Pressão	Padrão
Momento	Primeira ordem
Energia cinética turbulenta	Primeira ordem
Taxa de dissipação específica	Primeira ordem

A tabela 4.25 demonstra os parâmetros e os respectivos valores numéricos atribuídos aos fatores de relaxamento aplicados a análise fluidodinâmica computacional do concentrador híbrido dish.

Tabela 4.25 - Fatores de relaxamento aplicados ao CFD do concentrador híbrido

Parâmetros	Valores atribuídos aos fatores de relaxamento	
	Anterior a iteração 4250	Posterior a iteração 4250
Pressão	0,3	0,3
Densidade	1	1
Forças	1	1
Momento	0,7	0,4
Energia cinética turbulenta	0,8	0,4
Taxa de dissipação específica	0,8	0,8
Viscosidade turbulenta	1	1

O diagrama de resíduos e número de iterações inerentes a análise fluidodinâmica computacional do concentrador híbrido dish é apresentado na figura 4.15.

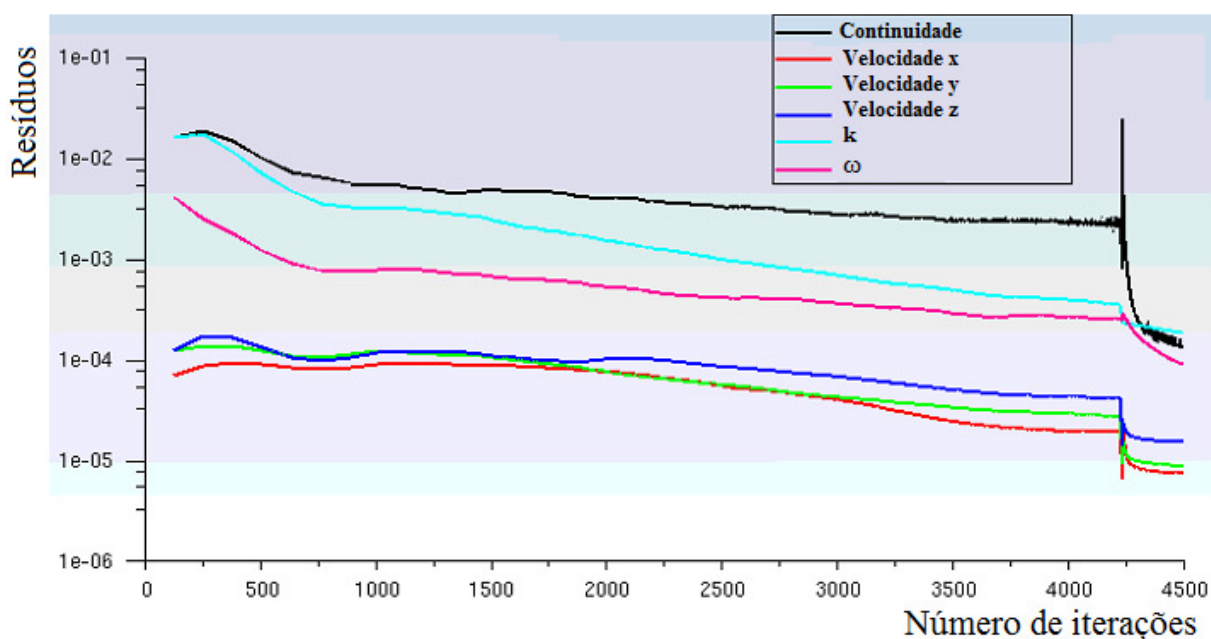


Figura 4.15 - Diagrama resíduos x número de iterações concernente a simulação CFD do concentrador híbrido

O critério de convergência aplicado aos resíduos concernentes as equações da continuidade, k , ω e velocidades x , y e z , demonstrados no diagrama da figura 4.15, compreende o valor de 10^{-3} . Este critério foi fundamentalmente estabelecido por ANSYS (2017), culminando num número de interações resultantes da simulação CFD desenvolvida de 4.500. Análise do diagrama da figura 4.15 demonstra que, entre as iterações 3.750 e 4.250, as curvas das equações da continuidade, k , ω e velocidades x , y e z , estabeleceram valores constantes aos resíduos ao longo destas iterações. Portanto, foram alterados os parâmetros de

relaxamento a partir da iteração 4.250 que, por conseguinte, estabeleceu-se a convergência na iteração 4.500.

A figura 4.16 apresenta a distribuição de pressão total estabelecida sobre a superfície do concentrador híbrido dish, especificada fundamentalmente pela análise fluidodinâmica computacional.

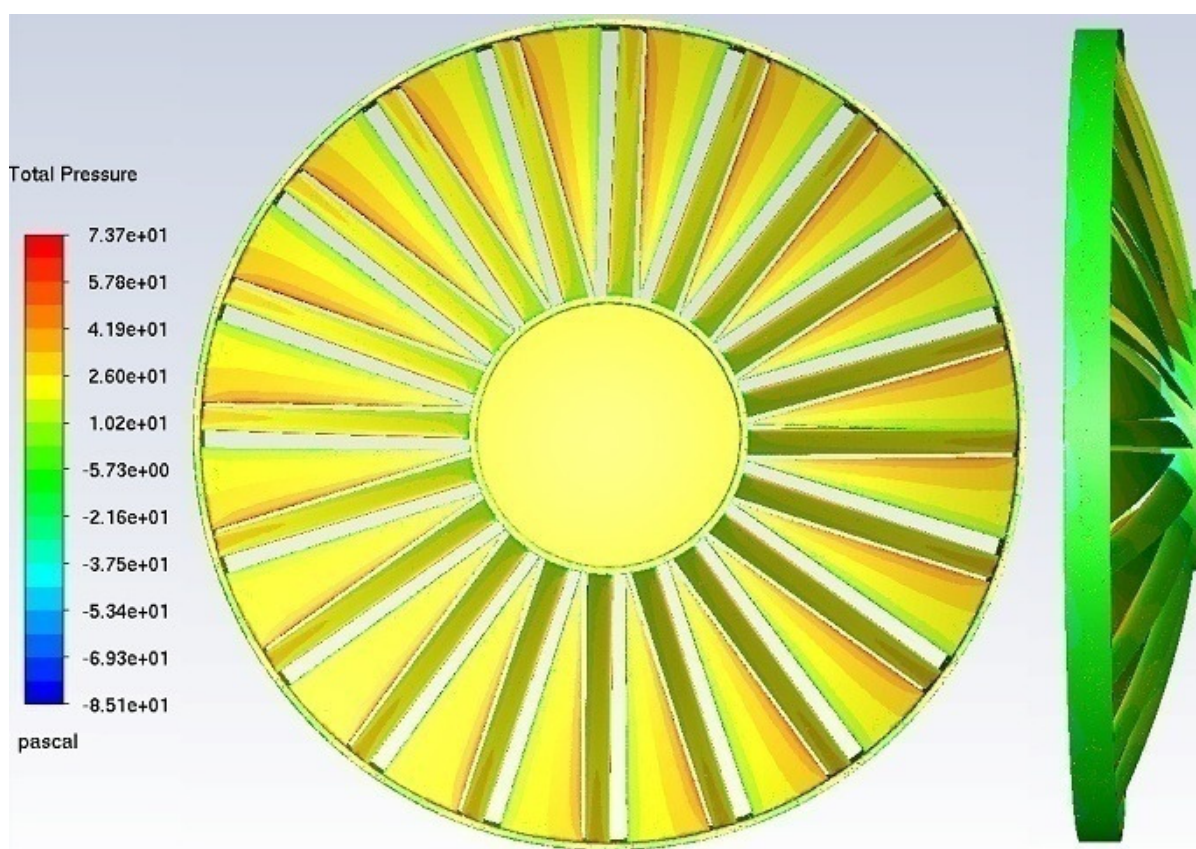


Figura 4.16 - Distribuição de pressão no concentrador híbrido sob vistas frontal e lateral

A variação de pressão estabelecida sob a superfície do concentrador híbrido dish, demonstrada na escala da figura 4.16, fomenta invariavelmente a geração de torque.

O torque intrínseco ao elemento periódico (T_{EP}) determinado mediante simulação computacional CFD, conforme demonstrado na figura F.1 integrada ao apêndice F, apresenta valor de 13,4 N m.

Os resultados apresentados na tabela 4.26 foram determinados fundamentalmente através das equações 3.61 a 3.68 mediante aplicação do programa computacional desenvolvido em Maple®. Este programa computacional e seus respectivos resultados são demonstrados na figura G.1 integrada ao apêndice G.

Tabela 4.26 - Torque, potências, grandeza adimensional e energia gerada concernente ao concentrador híbrido

Torque, potências, coeficiente de potência e energia elétrica gerada	Simbologia	Unidade	Resultado
Torque	T_C	[N.m]	268
Potência de eixo	P_{EC}	[kW]	0,56
Potência eólica disponível	P_{ED}	[kW]	3,37
Coeficiente de potência	C_{PC}	[%]	16,68
Potência elétrica líquida	P_{ELE}	[kW]	0,51
Energia elétrica anual gerada	E_{AGE}	[MWh/ano]	1,38

O resultado apresentado na tabela 4.26, inerente ao coeficiente de potência do concentrador híbrido dish (C_{PC}), corrobora a efetividade da metodologia aplicada. O concentrador híbrido dish consiste num conceito inovador, portanto não há referências na literatura especificando características de eficiência e comportamento intrínsecos a conversão de energia eólica estabelecida neste concentrador. O rotor eólico multipás, exemplificado no tópico 2.5.3.1 mediante turbina eólica de Charles Bush, apresenta apreciável semelhança ao concentrador híbrido dish. Portanto, este modelo de rotor comumente descrito na literatura, será adotado como referência na análise das características de eficiência e comportamento do concentrador híbrido dish.

O resultado numérico estabelecido ao coeficiente de potência do concentrador híbrido dish (C_{PC}) consiste em 16,68%. Entretanto, o coeficiente de potência (C_P) atribuído ao rotor eólico multipás sob a mesma razão de velocidades na ponta da pá (λ) consiste em 31%, conforme diagrama da figura 2.23. Esta divergência estabelecida entre o resultado do coeficiente de potência do concentrador híbrido dish (C_{PC}) e o coeficiente de potência de referência concernente aos rotores multipás esta fundamentada no projeto das pás do concentrador híbrido dish. As pás eólicas foram projetadas sob montante compreendido por quarenta pás, entretanto a aplicação efetiva no concentrador híbrido dish consistiu em apenas vinte, procedimento justificado e elucidado no tópico 3.4. O torque desenvolvido pelo rotor eólico é efetivamente estabelecido mediante somatório dos momentos gerados nas pás (Burton et al. 2011). Portanto, a aplicação de cinquenta por cento das pás estabelecidas em projeto invariavelmente resulta num teórico torque de cinquenta por cento do projetado. Conclusivamente, fundamentado na linearidade entre torque e potência estabelecida pela equação 3.62, a potência teórica desenvolvida pelo concentrador híbrido dish constitui-se efetivamente metade do valor numérico da potência estabelecida em projeto. Por conseguinte,

fundamentado na equação 3.65, o resultado concernente ao coeficiente de potência do concentrador híbrido dish (C_{PC}) determinado mediante análise fluidodinâmica computacional constitui-se validado, pois este consiste em aproximadamente metade do valor teórico. Efetivamente, o coeficiente de potência do concentrador híbrido dish (C_{PC}), determinado mediante análise fluidodinâmica computacional, apresenta valor numérico infimamente superior à metade teórica estabelecida as turbinas multipás americanas pelo diagrama da figura 2.23. Esta ínfima discrepância esta fundamentada efetivamente na presença de refletores no concentrador híbrido dish. O diagrama da figura 2.23 apresenta coeficientes de potência (C_P) fundamentados em torques estabelecidos exclusivamente pelas pás do rotor eólico. Entretanto, o concentrador híbrido dish apresenta efetivamente torque oriundo das pás eólicas e dos refletores, conforme variação de pressão demonstrada na figura 4.16. Portanto, o coeficiente de potência apresentado mediante análise fluidodinâmica computacional é efetivamente válido.

Os resultados de geração de energia elétrica anual em MWh/ano, relativos a conversão de energia solar e eólica no sistema híbrido estabelecidos respectivamente nas tabelas 4.6 e 4.26, são transcritos na tabela 4.27. Mediante somatório destes resultados, foi determinado o resultado de geração de energia elétrica anual total do sistema híbrido em MWh/ano, o qual é demonstrado na tabela 4.27.

O resultado de geração de energia anual do sistema Dish-Stirling correspondente, estabelecido pelo resultado da conversão de energia solar deste sistema descrito na tabelas 4.9 são transcritos na tabela 4.27.

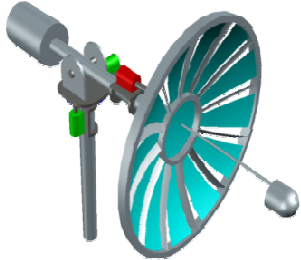
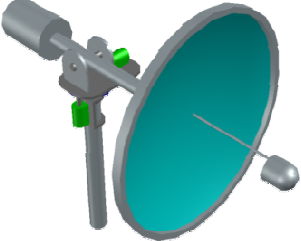
A análise comparativa entre os resultados relativos à energia elétrica anual gerada pela conversão de energia solar no sistema Dish-Stirling correspondente e híbrido, demonstram um sensível decréscimo neste parâmetro. Este decréscimo foi estabelecido pela hibridização, fundamentado na aplicação de lacunas ao refletor solar do sistema híbrido, promovendo a diminuição da área de reflexão do concentrador híbrido dish.

A especificação das dimensões das lacunas do concentrador híbrido dish foi desenvolvida mediante análise fundamentada na maior dimensão transversal projetada das pás eólicas associada ao estabelecimento arbitrário de uma área livre ao escoamento. Adicionalmente, as lacunas foram especificadas sob formato retangular, estabelecendo áreas livres ao escoamento variáveis, visto que a dimensão transversal projetada das pás eólicas varia ao longo de seu comprimento.

As informações da metodologia aplicada na especificação das dimensões das lacunas associadas à relevância da área de reflexão na conversão de energia solar, estabelecem

expectativas de ganhos sensíveis a conversão de energia no concentrador híbrido dish mediante otimização destes parâmetros.

Tabela 4.27 - Resultados de geração de energia dos sistemas híbrido e Dish-Stirling correspondente

Sistema / Desenho		Geração de energia elétrica [MWh/ano]		
		Conversão de energia		Total
		Solar	Eólica	
Híbrido		1,51	1,38	2,89
Dish-Stirling correspondente		2,79	-	2,79

5. CONCLUSÃO

5.1. CONCLUSÕES E CONTRIBUIÇÕES

A análise comparativa estabelecida entre os resultados de geração de energia elétrica anual do sistema híbrido e o sistema Dish-Stirling correspondente indicam que o sistema proposto apresentou pequeno acréscimo no parâmetro analisado, corroborando sua viabilidade técnica. A energia anual gerada pelo sistema híbrido consiste em 2,89 MWh, enquanto o Dish-Stirling correspondente gera 2,79 MWh. O ganho efetivo estabelecido pela hibridização consiste em 100 kWh/ano, que percentualmente, compreende aproximadamente 3,6%.

A análise desenvolvida nesta dissertação, sob determinados parâmetros de projetos (área de reflexão do concentrador híbrido dish e dimensões das lacunas), é conclusiva no que concerne o estabelecimento de ganhos efetivos na geração de energia elétrica mediante aplicação de estudos de otimização ao projeto do sistema híbrido. A otimização estabeleceria acréscimos na energia elétrica anual gerada pela conversão de energia solar (mediante aumento da área de reflexão) e eólica (mediante aumento no coeficiente de potência) no sistema híbrido.

O aspecto operacional de grande relevância a viabilidade do sistema híbrido, o qual não foi considerado neste estudo, consiste no efeito do sistema de rastreamento solar e eólico na geração de energia eólica anual. Este sistema não foi abordado nesta dissertação, entretanto sua operação estabelece o melhor aproveitamento dos recursos solar e eólico em sistemas híbridos, pois define qual disponibilidade estabelecerá a maior geração de energia elétrica. Por conseguinte, estabelecendo uma ampliação na geração de energia elétrica anual.

A especificação da energia elétrica anual gerada pelo sistema híbrido foi fundamentada na premissa que a conversão de energia solar e eólica não se processam concomitantemente, entretanto durante o funcionamento do sistema proposto esta condição de operação irá ocorrer. Esta condição também estabelecerá ampliação na geração de energia elétrica anual.

O potencial de geração de energia elétrica anual do sistema híbrido, analisado unicamente pelos parâmetros estabelecidos nesta dissertação, não é conclusivo. A determinação efetiva deste potencial é estabelecida mediante aplicação de métodos de otimização ao projeto do sistema proposto, associado à inclusão do sistema de rastreamento solar e eólico na análise de geração de energia eólica anual e desenvolvimento de estudo relativo ao funcionamento deste sistema operando concomitantemente na conversão de energia solar e eólica.

A relevante contribuição estabelecida por esta dissertação consiste no desenvolvimento do projeto de um novo conceito de sistema híbrido o qual promove efetivamente a conversão de

energia solar e eólica. O concentrador híbrido dish, conceito e componente primordial do sistema proposto, estabelece uma configuração singular de escoamento através de suas lacunas sob rotação que efetivamente constitui-se distinta ao escoamento comumente presente em rotores eólicos. O estudo e os respectivos resultados concernentes a esta singular configuração de escoamento na geração de potência consistem em importantes contribuições estabelecidas por esta dissertação. Adicionalmente, a metodologia aplicada ao projeto eólico constituída pela teoria da quantidade de movimento do elemento de pá (BEM) associada à metodologia intrínseca ao dimensionamento de rotores de ventiladores compreende em outra importante contribuição estabelecida pela dissertação.

5.2. RECOMENDAÇÕES AOS ESTUDOS FUTUROS

A recomendação preponderante aos estudos futuros fundamentados nesta dissertação consiste na aplicação efetiva de técnicas de otimização ao projeto eólico e solar do sistema híbrido proposto. As principais características construtivas intrínsecas ao concentrador híbrido dish que impreterivelmente devem ser analisadas neste estudo de otimização consistem nas dimensões das lacunas e número de pás.

A recomendação complementar aos estudos futuros fundamentados nesta dissertação consiste na determinação do fator de indução axial (a) do concentrador híbrido dish mediante aplicação de método iterativo, constituído pelo equacionamento concernente ao projeto das pás eólicas e análise fluidodinâmica computacional associada ao equacionamento aplicado na determinação de seu coeficiente de potência. Esta metodologia iterativa atribui o valor efetivo do fator de indução axial (a) intrínseco ao concentrador híbrido dish.

Outra recomendação adicional aos estudos futuros fundamentados nesta dissertação consiste no estudo do sistema de rastreamento solar e eólico aplicável ao sistema híbrido proposto. O sistema de rastreamento solar e eólico não foi abordado nesta dissertação, entretanto consiste numa temática de vital importância aos resultados de geração de energia elétrica.

6. REFERÊNCIAS

- Ahmadi, M. H; Ahmadi, M. A; Pourfayaz, F. Thermal models for analysis of performance of Stirling engine: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol.68, pp.168-184, 2017.
- Airfoil Tools. Disponível em: < <http://airfoiltools.com/>> Acesso em: 29 de novembro de 2018.
- Amenedo, J. L. R.; Diaz, J. C. B.; Gomez, S. A. Sistemas eólicos de producción de energia eléctrica. Madri: **Rueda**, 2003.
- ANSYS - ANSYS Meshing Advanced Techniques, 2016. Disponível em:<<https://support.ansys.com/portal/site/AnsysCustomerPortal/>> Acesso em: 29 de novembro de 2018.
- ANSYS - ANSYS Fluent Tutorial Guide, 2017. Disponível em:<<https://support.ansys.com/portal/site/AnsysCustomerPortal/>> Acesso em: 29 de novembro de 2018.
- Aziz, M.S; Ahmed, S; Saleem, U; Mufti, G.M. Wind-hybrid power generation systems using renewable energy sources - A review. *International Journal of Renewable Energy Research*, Vol.7, pp.111-127, 2017.
- 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.
- Bergman, T. L; Lavine A. S; Incropera F. P; DeWitt D. P; Fundamentals of Heat and Mass Transfer, 7.ed. United States: **John Wiley & Sons**, 2011.
- Bohl, W. Strömungsmaschinen. Würzburg: **Vogel Buchverlag**, 2008.
- Blakers, A. Sustainable Energy Options, **Asian Perspective**, Vol.39, pp.559-589, 2015.
- Blanc, P; Espinar, B; Geuder, N; Gueymard, C; Meyer, R; Pitz-Paal, R; Reinhardt, B; Renné, D; Sengupta, M; Wald, L; Wilbert, S. Direct normal irradiance related definitions and applications: The circumsolar issue. *Solar Energy*, Vol.110, pp.561-577, 2014.
- Bran, R; Souza, Z. Máquinas de Fluxo – Turbinas, Bombas e Ventiladores. Rio de Janeiro: **Ao Livro Técnico**, 1969.
- Burton, T; Sharpe, D; Jenkins, N; Bossanyi, E. Wind Energy Handbook. 2.ed.United Kingdom: John Wiley & Sons, 2011.
- 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.

CEPEL - Atlas do Potencial Eólico Brasileiro, Rio de Janeiro, 2017. Disponível em: <http://novoatlas.cepel.br/wp-content/uploads/2017/07/Novo-Atlas-do-Potencial-Eolico-Brasileiro-SIM_2013.pdf>. 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.

Coventry, J; Andraka, C. Dish systems for CSP, **Solar Energy**, Vol.152, pp.140-170, 2017.

CRESESB – Atlas solarimétrico do Brasil, Recife, 2000. Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/atlas_solarimetrico_do_brasil_2000.pdf> Acesso em: 29 de novembro de 2018.

Dolce, O; Pompeo, J. N. Fundamentos de Matemática Elementar e Geometria Plana. 7ed. São Paulo: **Editora Atual**, 1997.

Duffie, J. A; Beckman, W.A. Solar Engineering of Thermal Processes, 4ed. United States: **John Wiley & Sons**, 2013.

Energydata.info. Global Solar Atlas. Disponível em: < <https://globalsolaratlas.info/>>. Acesso em: 25 de novembro de 2018.

Energydata.info. Global Wind Atlas. Disponível em: < <https://globalwindatlas.info/>>. Acesso em: 25 de novembro de 2018.

EERE - Energy Efficiency and Renewable Energy - United States Department of Energy. Disponível em: <https://www1.eere.energy.gov/solar/review_meeting/pdfs/prm2008_white_infinia.pdf>. Acesso em: 29 de novembro de 2018.

Enteria, N; Akbarzadeh, A. Solar energy sciences and engineering applications. United Kingdom: Taylor & Francis Group, 2014.

Fagbenro, K. A; Mohamed, M. A; Wood, D.H. Computational modeling of the aerodynamics of windmill blades at high solidity, *Energy for Sustainable Development*, Vol.22, pp.13-20, 2014.

Gil, R; Monne, C; Bernal, N; Munoz, M; Moreno, Francisco, R. Thermal Model of a Dish Stirling Cavity-Receiver, **Energies**, Vol.8, pp.1042-1057, 2015.

Google Maps. Disponível em: < <https://www.google.com.br/maps/@-4.6084503,-37.5680295,10.25z>>. Acesso em: 25 de novembro de 2018.

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.

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.

Hau, E. Wind Turbines Fundamentals, Technologies, Application, Economics, 3.ed. Germany: Springer, 2013.

Huleihil, M. Maximum windmill efficiency in finite time. **Journal of Applied Physics**, Vol.105, pp.104908-1-104908-4, 2009.

Innova. Disponível em: < <https://anest-italia.it/innova-solar-energy/>> Acesso em: 23 de março de 2017.

Javafoil, versão 2.25. Disponível em: < <https://www.mh-aerotoools.de/airfoils/java/ws/javafoil.jnlp>> Acesso em: 20 de abril de 2017.

Jiang, H; Li, Y; Cheng, Z. Performances of ideal wind turbine. **Renewable Energy**, Vol.83, pp.658-662, 2015.

Khan, M.A; Pillay, P; Visser, K.D. On Adapting a Small PM Wind Generator for a Multiblade, High Solidity Wind Turbine, IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol.20, pp.685-692, 2005.

Khare, V; Nema, S; Baredar, P. Solar wind hybrid renewable energy system: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. Vol.58, pp.23-33, 2016.

Kalogirou, S. Solar Energy Engineering: Processes and System. 1.ed. United States: **Elsevier**, 2009.

Karabulut, H; Yucesu, H; Cinar, C; Aksoy, F. Construction and testing of a Dish Stirling solar energy unit. **Journal Of The Energy Institute**, Vol.82, pp.228-232, 2009.

King, D. Charles Brush's Windmill Generator 120 Years Ago! (1888 wind energy technology) **Mechanical Engineering-CIME**, Vol.133, p.51, 2011.

Larwood, S; Van Dam, C. P; Schow, D. Design studies of swept wind turbine blades, **Renewable Energy**, Vol.71, pp.563-571, 2014.

Lee, C. Y; Chou, P. C; Chiang, C. M; Lin, C. F. Sun Tracking Systems: A Review. **Sensors**, Vol.9, pp.3875-3890, 2009.

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.

Lovegrove, K; Stein W. Concentrating Solar Power Technology - Principles, developments and applications. USA: Woodhead Publishing, 2012.

Lyatkher, V. Wind Power, Turbine Design, Selection, and Optimization. United States and Canada: **John Wiley & Sons and Scrivener**, 2013.

Mantilha, V. A. Avaliação técnica-econômica das tecnologias de concentração Heliotérmica no Brasil, integrando sistema de Armazenamento Térmico e Hibridização, utilizando software SAM, Universidade Federal de Itajubá - Mestrado, 2017.

Manwell, J.F; McGowan, J.G; Rogers, A.L. Wind Energy Explained, Theory, Design and Application. 2.ed. United Kingdom: John Wiley & Sons, 2010.

Massouh, F; Dobrev, I. Exploration of the vortex wake behind of wind turbine rotor, Journal of Physics, Vol.75, 2007.

McGowan, J. G; Connors, S. R. Wind power: A Turn of the Century Review. Annual Review of Energy and the Environment. Vol.251, p.147-197, 2000.

Ministério de Minas e Energia. Disponível em: < <http://www.mme.gov.br/documents/10584/3580498/17+-+Energia+Solar+-+Brasil+e+Mundo+-+ano+ref.+2015+%28PDF%29/4b03ff2d-1452-4476-907d-d9301226d26c;jsessionid=41E8065CA95D1FABA7C8B26BB66878C9.srv154> > Acesso em: 29 de novembro de 2018.

Mou, J; Hong, G. Startup mechanism and power distribution of free piston Stirling engine. Energy, Vol.123, pp.655-663, 2017.

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.

NREL, National Renewable Energy Laboratory, System Advisor Model (SAM), 2018.

Okulov, V. L; Van Kuik, G. A. M. The Betz–Joukowsky limit: on the contribution to rotor aerodynamics, **Wind Energy**, Vol.15, pp.335-344, 2012.

Paetzold, J; Cochard, S; Vassallo, A; Fletcher, D.F. Wind engineering analysis of parabolic trough solar collectors: The effects of varying the trough depth. Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics, Vol.135, pp.118-128, 2014.

Park, J. The Wind Power Book. Palo Alto: **Cheshire Books**, 1981.

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: < http://ftp.cptec.inpe.br/labren/publ/livros/brazil_solar_atlas_R1.pdf >. Acesso em: 25 de novembro de 2018.

Recktenwald, G. The k-ε Turbulence Model. Disponível em: http://web.cecs.pdx.edu/gerry/class/ME448/notes_2012/pdf/keModel.pdf > Acesso em: 20 de novembro de 2018

Reddy, K.S; Veershetty, G; Srihari Vikram, T. Effect of wind speed and direction on convective heat losses from solar parabolic dish modified cavity receiver. Solar Energy, Vol.131, pp.183-198, 2016.

Rajendran, C; Madhu, G. A CFD based multibody dynamics approach in horizontal axis wind turbine, International Journal of Dynamics of Fluids, Vol.6, p.219, 2010.

RENAI - Rede Nacional de Informações sobre o Investimento. Atração de investimentos no Estado do Ceará – Mapa territorial de parques eólicos, 2010. Disponível em: < <http://investimentos.mdic.gov.br/public/arquivo/arq1321639205.pdf>. Acesso em: 29 de novembro de 2018.

Roldán, M. I. S. Concentrating Solar Thermal Technologies Analysis and Optimization by CFD Modeling. Switzerland: **Springer**, 2017.

Schaffarczyk, A. P. Introduction to wind turbine aerodynamics. Germany: **Springer-Verlag Berlin Heidelberg**, 2014.

Schubel, P; Crossley, R. Wind Turbine Blade Design, *Energies*, Vol.5, pp.3425-3449, 2012.

Smulders, P.T. Physical aspects of windmill design. **Physics in Technology**, Vol.7, pp.208-14, 1976.

Stine, W. B; Diver, R. B. A compendium of solar dish/Stirling technology, Sandia, Technical report SAND93-7026, 1994.

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(1), pp.14-21, 2011.

Sun, H; Gong, B; Yao, Q. A review of wind loads on heliostats and trough collectors, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol.32, pp.206-221, 2014.

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 (17), pp.3664-3668, 2011.

Thombare, D.G; Verma, S.K. Technological development in the Stirling cycle engines. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol.12, pp.1-38, 2008.

Tong, Wei. Wind Power Generation and Wind Turbine Design. United Kingdom: **WIT Press**, 2010.

Versteeg H. K; Malalasekera W. An Introduction to Computational Fluid Dynamics. The Finite Volume Method.2.ed. England: **Pearson prentice hall**, 2007.

White, F. M. Fluid mechanics. 4.ed. New York: **McGraw-Hill**, 1998.

Wright, T. Fluid machinery: performance, analysis, and design. United States of America: **CRC Press**, 1999.

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, pp.37-43, 2015.

ANEXO A



Figura A.1 - Irradiação normal direta média diária (DNI_D) no município de Aracati - CE.
Fonte: Adaptado de Energydata.info (2018)

ANEXO B



Figura B.1 - A distância entre os municípios de Aracati e Icapuí – BA
Fonte: Adaptado de Google Maps (2018)

Capacity factor (year 1) 16.6%

Figura B.2 - Fator de capacidade concernente ao município de Aracati - CE
Fonte: Adaptado de SAM (2018)

ANEXO C

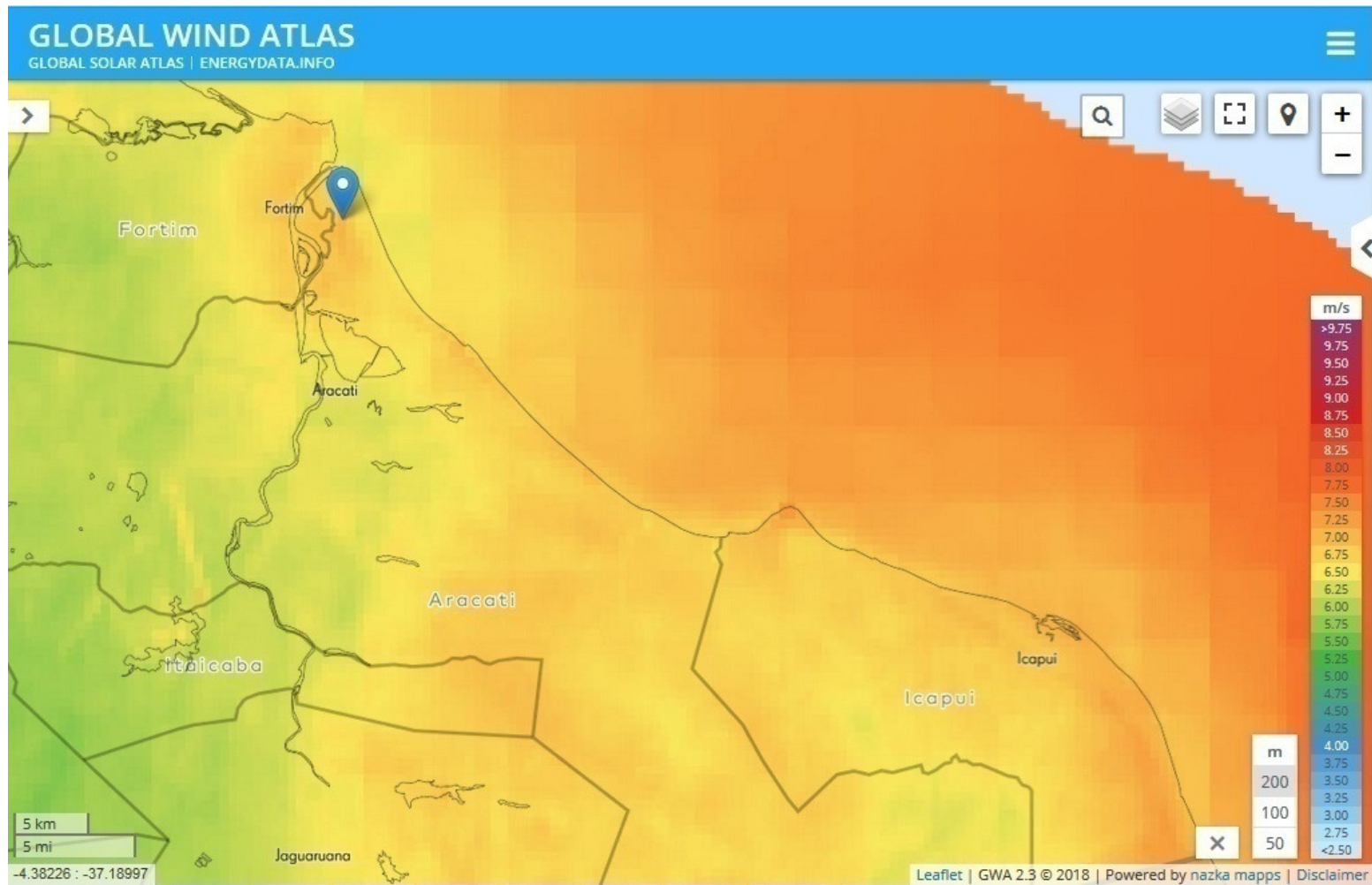


Figura C.1 - Localização aplicada na determinação da velocidade dos ventos (U_{∞}) no município de Aracati - CE
Fonte: Adaptado de Energydata.info (2018)

ANEXO D

Tabela. D.1 - Coordenadas (x,y) aplicadas ao desenho do perfil aerodinâmico NACA 4415

1° COLUNA		2° COLUNA		3° COLUNA		4° COLUNA		5° COLUNA	
x	y	x	y	x	y	x	y	x	y
1,0002	0,0016	0,6271	0,0888	0,0537	0,0593	0,1659	-0,041	0,7649	-0,012
1,0001	0,0016	0,6117	0,0912	0,0467	0,0556	0,1773	-0,041	0,7781	-0,011
0,9992	0,0019	0,5962	0,0935	0,04	0,0518	0,1889	-0,041	0,791	-0,010
0,998	0,0022	0,5806	0,0957	0,0339	0,0480	0,2009	-0,041	0,8036	-0,010
0,9964	0,0028	0,5649	0,0977	0,0283	0,0442	0,2131	-0,041	0,8159	-0,009
0,9942	0,0034	0,5491	0,0997	0,0231	0,0404	0,2255	-0,040	0,8279	-0,008
0,9915	0,0043	0,5333	0,1016	0,0185	0,0366	0,2382	-0,040	0,8397	-0,008
0,9884	0,0052	0,5174	0,1034	0,0144	0,0328	0,2512	-0,039	0,851	-0,007
0,9848	0,0063	0,5015	0,1050	0,0107	0,0290	0,2644	-0,039	0,8621	-0,007
0,9808	0,0076	0,4856	0,1066	0,0076	0,0252	0,2777	-0,038	0,8728	-0,006
0,9763	0,0090	0,4696	0,1080	0,005	0,0215	0,2913	-0,038	0,8831	-0,006
0,9713	0,0105	0,4538	0,1093	0,0029	0,0178	0,3051	-0,037	0,893	-0,006
0,9658	0,0121	0,4379	0,1104	0,0013	0,0141	0,3191	-0,036	0,9026	-0,005
0,9599	0,0138	0,4221	0,1114	0,0002	0,0105	0,3332	-0,035	0,9117	-0,005
0,9536	0,0157	0,4064	0,1122	0,0001	0,007	0,3475	-0,035	0,9205	-0,004
0,9468	0,0177	0,3906	0,1129	0,0000	0,003	0,362	-0,034	0,9288	-0,004
0,9396	0,0198	0,3748	0,1134	0,0000	0,0000	0,3766	-0,033	0,9367	-0,004
0,9319	0,0219	0,359	0,1137	0,0009	-0,003	0,3913	-0,033	0,9442	-0,003
0,9238	0,0242	0,3435	0,1137	0,0023	-0,006	0,4062	-0,032	0,9512	-0,003
0,9154	0,0266	0,328	0,1135	0,0042	-0,009	0,4214	-0,031	0,9578	-0,003
0,9064	0,0290	0,3128	0,1131	0,0066	-0,012	0,4367	-0,030	0,9639	-0,003
0,8971	0,0315	0,2977	0,1125	0,0094	-0,015	0,4521	-0,029	0,9696	-0,002
0,8874	0,0341	0,2829	0,1117	0,0127	-0,018	0,4676	-0,029	0,9748	-0,002
0,8774	0,0367	0,2683	0,1106	0,0165	-0,020	0,483	-0,028	0,9795	-0,002
0,8669	0,0394	0,2539	0,1094	0,0207	-0,022	0,4985	-0,027	0,9837	-0,002
0,8561	0,0422	0,2398	0,1079	0,0253	-0,025	0,514	-0,026	0,9875	-0,002
0,8449	0,0449	0,2259	0,1063	0,0304	-0,027	0,5295	-0,025	0,9907	-0,001
0,8334	0,0477	0,2124	0,1044	0,036	-0,029	0,545	-0,024	0,9935	-0,001
0,8215	0,0506	0,1991	0,1024	0,0419	-0,030	0,5605	-0,023	0,9958	-0,001
0,8093	0,0534	0,1862	0,1002	0,0483	-0,032	0,5759	-0,022	0,9975	-0,001
0,7968	0,0563	0,1737	0,0978	0,0551	-0,033	0,5912	-0,021	0,9988	-0,001
0,784	0,0591	0,1614	0,0953	0,0623	-0,035	0,6065	-0,020	0,9995	-0,001
0,7709	0,0620	0,1496	0,0926	0,0699	-0,036	0,6216	-0,020	0,9998	-0,001
0,7576	0,0648	0,1381	0,0898	0,0779	-0,037	0,6367	-0,019		
0,7439	0,0677	0,127	0,0868	0,0863	-0,038	0,6516	-0,018		
0,7301	0,0705	0,1163	0,0837	0,0951	-0,039	0,6664	-0,017		
0,716	0,0732	0,1061	0,0805	0,1042	-0,040	0,6811	-0,016		
0,7016	0,0760	0,0962	0,0771	0,1136	-0,040	0,6955	-0,015		
0,6871	0,0787	0,0868	0,0737	0,1234	-0,041	0,7098	-0,015		
0,6723	0,0813	0,0779	0,0702	0,1336	-0,041	0,7239	-0,014		
0,6574	0,0839	0,0694	0,0666	0,144	-0,041	0,7378	-0,013		
0,6423	0,0864	0,0613	0,0630	0,1548	-0,041	0,7515	-0,012		

APÊNDICE A

A.1. DINÂMICA DOS FLUIDOS COMPUTACIONAL (CFD)

A dinâmica de fluidos computacional ou CFD é a análise numérica de sistemas envolvendo fluxo de fluidos, transferência de calor e fenômenos associados por meio de simulação computacional (Versteeg e Malalasekera, 2007).

A análise relativa a projetos de sistemas fluídos aplicando CFD compreende diversas vantagens em relação às abordagens baseadas em experimentos (Versteeg e Malalasekera, 2007). A vantagem significativa da aplicação do CFD em relação ao experimental é relativa aos custos e prazos (Versteeg e Malalasekera, 2007). Os custos e prazos envolvidos na análise CFD são sensivelmente menores que a abordagem experimental (Versteeg e Malalasekera, 2007). A análise CFD possibilita o estudo de sistemas em condições perigosas que seriam impossíveis de serem reproduzidos experimentalmente devido aos critérios de segurança (Versteeg e Malalasekera, 2007). A análise CFD também possibilita o estudo de sistemas de difícil e dispendiosa reprodução, disponibilizando ao usuário a escolha quase ilimitada relativa ao nível de detalhe de seus resultados. (Versteeg e Malalasekera, 2007).

A.1.1. Estrutura dos códigos CFD

Os programas computacionais CFD são estruturados em algoritmos numéricos basicamente constituídos de pré-processador, solver e pós-processador (Versteeg e Malalasekera, 2007).

A.1.1.1. Pré-processador

O pré-processamento compreende as atividades de interface entre o usuário e o programa computacional CFD (Versteeg e Malalasekera, 2007). Portanto, o pré-processador obtém as informações de entradas através de uma interface amigável ao usuário e executa o processamento destas informações para uso do solver (Versteeg e Malalasekera, 2007).

Na simulação CFD, a definição da geometria relativa à região analisada ou domínio computacional e a especificação das condições de contorno compreendem as atividades fundamentais do pré-processamento (Versteeg e Malalasekera, 2007).

A seleção dos fenômenos físicos envolvidos e das propriedades dos fluidos representa a caracterização física do caso analisado (Versteeg e Malalasekera, 2007). Os pré-processadores

dos programas computacionais CFD apresentam extensas bibliotecas relativas aos materiais (sólidos e fluidos) aplicados na simulação e suas respectivas propriedades físicas (Versteeg e Malalasekera, 2007). Os pré-processadores dos programas computacionais CFD permitem a aplicação de diversos modelos relativos a processos físicos especiais, como modelos de turbulência, transferência de calor e combustão (Versteeg e Malalasekera, 2007).

A geração de malha, em simulações CFD, constitui na principal atividade relativa ao pré-processamento (Versteeg e Malalasekera, 2007). A geração de malha consiste na subdivisão do domínio computacional em uma série de subdomínios menores e não sobrepostos (Versteeg e Malalasekera, 2007). Esta atividade relativa ao pré-processamento demanda até 50% do tempo empenhado na simulação CFD (Versteeg e Malalasekera, 2007).

A solução da simulação CFD é definida em nós contidos nas células ou elementos da malha (Versteeg e Malalasekera, 2007). A precisão da solução relativa à simulação CFD é regida pelo número de elementos da malha (Versteeg e Malalasekera, 2007). Portanto, quanto maior o número de elementos da malha, melhor será a precisão da solução relativa à simulação CFD (Versteeg e Malalasekera, 2007). Tanto a precisão de uma solução como seu custo em termos de hardware e tempo de cálculos necessários dependem do refinamento da malha (Versteeg e Malalasekera, 2007). As malhas ótimas aplicadas à simulação CFD não são uniformes, apresentando-se refinadas em regiões onde ocorrem grandes variações nos fenômenos estudados e mais grossas em regiões com baixas variações relativas a estes fenômenos (Versteeg e Malalasekera, 2007). Atualmente estão sendo desenvolvidos programas computacionais CFD que apresentam as denominadas malhas de capacidade auto-adaptativa (Versteeg e Malalasekera, 2007). Em última análise, esses programas refinarão automaticamente a malha em áreas de variações rápidas (Versteeg e Malalasekera, 2007). Uma quantidade substancial de trabalho para seu desenvolvimento ainda precisa ser feito antes que essas técnicas sejam suficientemente robustas para serem incorporadas aos códigos CFD comerciais (Versteeg e Malalasekera, 2007). Atualmente, as simulações CFD dependem diretamente das habilidades do usuário no desenvolvimento de malhas adequadas que proporcionem resultados conforme precisão e custo desejado (Versteeg e Malalasekera, 2007).

Os principais programas computacionais CFD, visando à maximização de sua produtividade, permitem a importação de dados oriundos de modeladores de superfície e geradores de malha, como o AutoCAD®, Patran® e I-deas® (Versteeg e Malalasekera, 2007).

A.1.1.2. Solver

O solver relativo a programas computacionais CFD são comumente constituídos de três distintas técnicas de solução numérica: diferenças finitas, elementos finitos e os métodos espectrais (Versteeg e Malalasekera, 2007).

A metodologia aplicada à simulação CFD relativa ao estudo eólico do concentrador híbrido dish se restringe a técnica de solução numérica dos volumes finitos. Esta metodologia consiste na principal técnica de solução numérica aplicada pelos programas computacionais CFD estabelecidos no mercado, como o CFX®, Fluent® e Phoenics® (Versteeg e Malalasekera, 2007). O algoritmo numérico referente ao solver promove primeiramente a integração das principais equações associadas ao fluxo do fluido com relação a todos os volumes de controle finitos do domínio (Versteeg e Malalasekera, 2007). Posteriormente, o algoritmo numérico referente ao solver promove a discretização das equações integrais em equações algébricas (Versteeg e Malalasekera, 2007). Finalmente, o algoritmo numérico referente ao solver promove a solução das equações algébricas pela aplicação de um método iterativo (Versteeg e Malalasekera, 2007). Estas três etapas promovidas pelo algoritmo numérico do solver (integração das equações do fluxo de fluido, discretização das equações integrais e solução das equações algébricas) são descritas nos tópicos A.1.1.2.1, A.1.1.2.2 e A.1.1.2.3.

A.1.1.2.1. Integração das equações do fluxo de fluido

O método dos volumes finitos, aplicado na integração das equações do fluxo de fluido, consiste basicamente em uma 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). A aplicação do método dos volumes finitos determina que o domínio seja dividido em um número finito de volumes de controle representados pelos elementos da malha (Versteeg e Malalasekera, 2007). O método dos volumes finitos é aplicável a todos os tipos de malhas (Versteeg e Malalasekera, 2007). Esta característica determina a principal vantagem deste método, que consiste em sua aplicabilidade sob geometrias complexas (Versteeg e Malalasekera, 2007).

O método dos volumes finitos é intrinsecamente conservativo, portanto os resultados estabelecidos pela sua simulação numérica expressam a conservação “exata” de propriedades relevantes em cada célula da malha representada em termos do volume finito (Versteeg e Malalasekera, 2007). Portanto, a conservação de uma variável de fluxo (ϕ_F), sendo esta uma

componente de velocidade ou entalpia no volume de controle finito (elemento de malha), pode ser expressa pelo equilíbrio entre os vários processos que tendem a aumentar ou diminuir a variável de fluxo (ϕ_F) (Versteeg e Malalasekera, 2007). Esta relação, fundamentada no princípio da conservação física, constitui na principal característica do método de volumes finitos, tornando o conceito desta metodologia de fácil compreensão para engenheiros, quando comparada ao método dos elementos finitos ou espectrais (Versteeg e Malalasekera, 2007).

A.1.1.2.2. Discretização das equações integrais

O solver intrínseco a programas computacionais CFD apresenta técnicas de discretização que consistem basicamente na conversão de equações integrais em um sistema de equações algébricas (Versteeg e Malalasekera, 2007). A discretização determina o tratamento adequado das equações associadas aos principais fenômenos de transporte; a convecção (transporte devido ao fluxo de fluido) e difusão (transporte oriundo da variação de ϕ_F) (Versteeg e Malalasekera, 2007). A discretização determina também o tratamento adequado das equações associadas aos termos fonte (criação ou destruição de ϕ_F) e a taxa de variação em relação ao tempo (Versteeg e Malalasekera, 2007).

A.1.1.2.3. Solução das equações algébricas

A discretização das equações integrais, conforme mencionado no tópico A.1.1.2.2, resulta em um sistema de equações algébricas lineares (Versteeg e Malalasekera, 2007). A complexidade e o número de equações algébricas envolvidas na simulação CFD dependem das dimensões intrínsecas do caso estudado, do número de nós da malha e metodologia aplicada na discretização (Versteeg e Malalasekera, 2007). A metodologia aplicada na solução de equações algébricas lineares é dividida basicamente em duas famílias, constituída pelos métodos diretos e métodos indiretos ou iterativos (Versteeg e Malalasekera, 2007).

Os fenômenos físicos analisados nas simulações CFD são extremamente complexos, portanto a metodologia aplicada na solução de suas equações algébricas lineares é necessariamente fundamentada em métodos indiretos ou iterativos (Versteeg e Malalasekera, 2007). Os métodos iterativos são fundamentados na aplicação de um algoritmo desenvolvido no intuito realizar iterações até que a convergência da solução seja alcançada (Versteeg e Malalasekera, 2007). O número de iterações desenvolvidas em uma simulação CFD é

diretamente relacionado à precisão aplicada ao critério de convergência (Versteeg e Malalasekera, 2007).

Os métodos de solução iterativos comumente aplicados a programas computacionais CFD são o TDMA, Jacobi e Gauss-Seidel (Versteeg e Malalasekera, 2007).

A.1.1.3. Pós-processador

O pós-processamento, assim como o pré-processamento, configura-se dentre os principais focos de desenvolvimento observados em pacotes CFD (Versteeg e Malalasekera, 2007). A popularização de Workstations em aplicações de engenharia, muitas das quais apresentam recursos gráficos excepcionais, fomentou o desenvolvimento de ferramentas versáteis de visualização de dados relativas ao pós-processamento (Versteeg e Malalasekera, 2007). Estas ferramentas, além de gráficos, incluem animações que permitem a exibição de resultados dinâmicos, como por exemplo, o rastreamento de partículas (Versteeg e Malalasekera, 2007). O pós-processador relativo à maioria dos pacotes CFD gera dados alfanuméricos no intuito de estabelecer a exportação de dados para outros programas (Versteeg e Malalasekera, 2007).

A.1.2. A simulação CFD

Os fenômenos físicos associados à análise CFD geralmente são complexos e os resultados obtidos através do programa de simulação constituem numa aproximação realista do sistema simulado (Versteeg e Malalasekera, 2007). Portanto, os resultados obtidos através da simulação CFD devem corresponder aos resultados experimentais relativos ao mesmo fenômeno físico simulado (Versteeg e Malalasekera, 2007). Esta correspondência entre os resultados simulados e experimentais é estabelecida à medida que os usuários do programa disponham do conhecimento relativo aos fenômenos físicos envolvidos na simulação e apliquem corretamente ao programa CFD (Versteeg e Malalasekera, 2007). Este conhecimento requerido aos usuários do programa CFD é amplo, envolvendo diversas áreas (Versteeg e Malalasekera, 2007).

Inicialmente, antes mesmo de configurar-se ou executar uma simulação CFD, é imprescindível a identificação dos fenômenos físicos relacionados ao estudo (Versteeg e Malalasekera, 2007). Os fenômenos físicos relacionados ao estudo devem ser analisados no intuito de definir-se como serão aplicados na simulação CFD ou até mesmo se serão negligenciados (Versteeg e Malalasekera, 2007). Exemplos típicos desta análise constituem na aplicação de domínios em duas ou três dimensões, considerar-se ou não os efeitos da

temperatura ambiente, variações de pressão, densidade do ar, assim como as equações de fluxo turbulento ou negligenciar seus efeitos (Versteeg e Malalasekera, 2007).

A análise dos fenômenos físicos relativos ao estudo CFD também é aplicável no intuito de reduzir-se sua complexidade a um nível gerenciável, e concomitantemente, preservando suas características físicas (Versteeg e Malalasekera, 2007). Uma aplicação típica desta análise compreende no estudo da especificação da geometria do domínio (Versteeg e Malalasekera, 2007). O estudo aplicado na definição da geometria do domínio deve impreterivelmente objetivar a determinação da forma geométrica que promova sua máxima simplificação e não acarrete prejuízos à simulação CFD (Versteeg e Malalasekera, 2007).

O desenvolvimento da malha constitui o principal procedimento executado pelo usuário, sendo extremamente dependente das habilidades do usuário e determinante na obtenção de simulações CFD bem ou mal sucedida (Versteeg e Malalasekera, 2007). A caracterização da simulação CFD bem sucedida ou mal sucedida é estabelecida através de parâmetros de convergência (Versteeg e Malalasekera, 2007).

A solução da simulação CFD é de natureza iterativa, portanto soluções convergentes apresentam resíduos pequenos (Versteeg e Malalasekera, 2007). Os resíduos são definidos como medidas da conservação geral das propriedades do fluxo analisado (Versteeg e Malalasekera, 2007). O desenvolvimento de malhas adequadas às quais estabeleçam soluções convergentes associada à aplicação de diversos parâmetros no programa de simulação CFD, como por exemplo, fatores de relaxamento, constituem fatores de extrema relevância na obtenção de simulações bem sucedidas (Versteeg e Malalasekera, 2007). A correta aplicação destes parâmetros na simulação CFD não é estabelecida sob regras ou diretrizes definidas, apresentando variações de acordo com os fenômenos físicos envolvidos e suas condições de contorno (Versteeg e Malalasekera, 2007). Deste modo, a correta aplicação destes parâmetros no programa de simulação CFD requer considerável experiência do usuário com o programa, a qual somente pode ser adquirida pelo uso extensivo do mesmo (Versteeg e Malalasekera, 2007).

O desenvolvimento de malhas inadequadas introduz erros ao fluxo analisado na simulação CFD, porém não há uma metodologia aplicável na estimativa destes erros (Versteeg e Malalasekera, 2007). Deste modo, o desenvolvimento de malhas adequadas depende principalmente da estimativa do usuário relativas aos erros estabelecidos pela malha que conseqüentemente são impostos ao fluxo simulado (Versteeg e Malalasekera, 2007). Esta estimativa torna-se possível através do conhecimento dos erros relativos a simulações

semelhantes que invariavelmente aplicam malhas semelhantes (Versteeg e Malalasekera, 2007).

A.1.3. Turbulência

O regime intrínseco ao escoamento de um determinado fluido é determinado pelo seu respectivo número de Reynolds (Versteeg e Malalasekera, 2007). Os escoamentos que apresentam baixos números de Reynolds são denominados laminares (Versteeg e Malalasekera, 2007). As equações relativas ao regime laminar, em determinados casos devido a sua simplicidade, podem ser resolvidas analiticamente (Versteeg e Malalasekera, 2007).

Os escoamentos que apresentam altos de Reynolds são denominados turbulentos (Versteeg e Malalasekera, 2007). Estes escoamentos são extremamente complexos, portanto comumente são abordados numericamente através do CFD, pela aplicação do método dos volumes finitos sem aproximações adicionais (Versteeg e Malalasekera, 2007). A maioria dos escoamentos aplicados aos estudos de engenharia são efetivamente turbulentos, portanto este regime de fluxo não se restringe ao interesse teórico (Versteeg e Malalasekera, 2007).

A visualização de escoamentos turbulentos revela a presença de estruturas de fluxo rotacional, denominados turbilhões, os quais apresentam ampla gama de escala de comprimento (Versteeg e Malalasekera, 2007). As características intrínsecas aos escoamentos turbulentos, sobretudo presente nos turbilhões, proporcionam grande movimentação caótica, aleatória e instável nas partículas do fluido (Versteeg e Malalasekera, 2007). Esta movimentação de partículas intrínseca ao escoamento turbulento determina a maior eficiência na transferência de calor e difusão de massa, quando comparado ao escoamento laminar (Versteeg e Malalasekera, 2007).

Os grandes turbilhões extraem energia do escoamento médio por meio de um processo chamado alongamento de vórtice (Versteeg e Malalasekera, 2007). Portanto, o alongamento imposto pelo escoamento médio aos grandes turbilhões fornece a energia que mantém a turbulência (Versteeg e Malalasekera, 2007).

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

Os pequenos turbilhões são alongados predominantemente pelos grandes turbilhões e infimamente pelo fluxo médio (Versteeg e Malalasekera, 2007). Portanto, a energia relativa

aos grandes turbilhões é transferida aos pequenos turbilhões, em um processo denominado de cascata de energia. (Versteeg e Malalasekera, 2007).

Os escoamentos turbulentos são caracterizados pelo movimento caótico, aleatório e instável na qual se desenvolvem, apresentando mudanças contínuas na velocidade e pressão ao longo deste escoamento (Versteeg e Malalasekera, 2007). A natureza aleatória, intrínseca ao escoamento turbulento, determina que as velocidades (u, v, w) e pressão (p) das partículas fluidas sejam decompostas em um valor médio constante (u_M, v_M, w_M, p_M) associada a sua respectiva componente flutuante (u', v', w', p'). Esta é a denominada decomposição de Reynolds, que aplicada exclusivamente à componente de velocidade (u) de uma determinada partícula fluída, é regida pela equação A.1 e estabelece o diagrama da figura A.1 (Versteeg e Malalasekera, 2007).

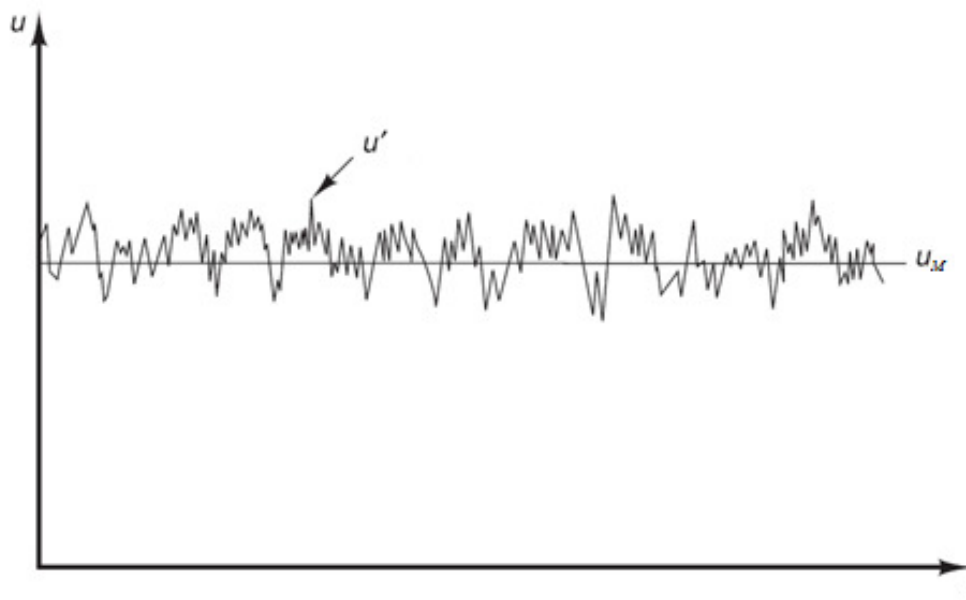


Figura A.1 - Diagrama da velocidade de uma determinada partícula fluída (u) em relação ao tempo(t), seu valor médio constante (u_M) e sua componente flutuante (u')
Fonte: Adaptado de Versteeg e Malalasekera (2007)

$$u = u_M + u' \quad (\text{A.1})$$

A decomposição de Reynolds permite que um determinado escoamento turbulento seja caracterizado em termos dos valores médios de suas propriedades (u_M, v_M, w_M, p_M) e as flutuações de suas propriedades (u', v', w', p') em termos estatísticos (Versteeg e Malalasekera, 2007). Determinados escoamentos apresentam valores médios de suas propriedades (u_M, v_M, w_M, p_M) variando apenas uma ou duas dimensões, contudo as flutuações

turbulentas de suas propriedades (u' , v' , w' , p') impreterivelmente são tridimensionais (Versteeg e Malalasekera, 2007).

As flutuações das propriedades de um escoamento turbulento apresentam sua energia expressa através de uma ampla gama de frequências (Versteeg e Malalasekera, 2007). Os grandes turbilhões apresentam sua energia expressa sob baixas frequências, condição esta que denota altos níveis de energia. (Versteeg e Malalasekera, 2007). Por conseguinte, os pequenos turbilhões apresentam sua energia expressa sob 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 efetivamente pelos efeitos viscosos (Versteeg e Malalasekera, 2007). Nestas escalas, o trabalho realizado contrapõe a ação das tensões viscosas, de modo que a energia associada aos movimentos do turbilhão em pequena escala 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).

A.1.4. Função de parede e lei de parede

As simulações de escoamento turbulento em CFD aplicam as condições de contorno relativas às suas propriedades (u, v, w, p) através das funções de parede (Recktenwald, 2018). A aplicação da função de parede esta fundamentada no fato que as variações nos gradientes de velocidade e temperatura são abruptos em regiões próximas à parede, portanto não se torna viável a resolução de todos os detalhes do escoamento nesta região (Recktenwald, 2018). A função de parede é aplicada, pois se torna sensivelmente dispendioso a resolução da estrutura da camada limite turbulenta, especialmente as subcamadas próximas a parede (Recktenwald, 2018). A simulação CFD da camada limite turbulenta exigiria um elevado número de elementos a serem posicionados próximos à parede, consumindo memória e aumentando o tempo de processamento para obter-se a solução convergente (Recktenwald, 2018). Portanto, a função de parede estabelece uma sensível economia em termos do número de elementos de malha, e conseqüentemente, uma sensível economia em termos de utilização e capacidade do hardware aplicado na simulação CFD (Recktenwald, 2018).

A função de parede é derivada de um modelo semi-empírico da camada limite turbulenta denominada lei de parede (Recktenwald, 2018). A lei e função de parede serão abordadas através da análise da figura A.2, a qual apresenta o perfil de velocidades de uma camada limite turbulenta (Recktenwald, 2018).

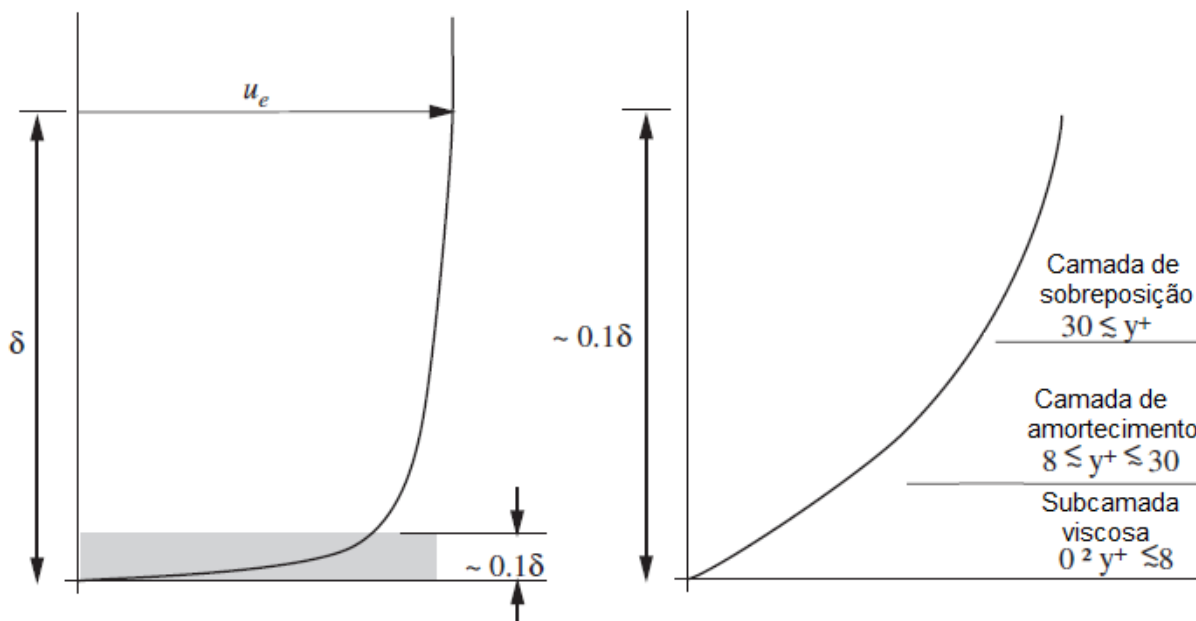


Figura A.2 - Perfil de velocidades e regiões da camada limite turbulenta (esquerda) e as camadas relativas à região interna da camada limite turbulenta (direita)

Fonte: Adaptado de Recktenwald (2018)

A camada limite turbulenta, mostrada no lado esquerdo da figura A.2, compreende a região do escoamento a uma determinada altura de (δ) (Recktenwald, 2018). A camada limite turbulenta apresenta um perfil de velocidades em função da altura relativa à parede analisada, conforme mostrada no lado esquerdo da figura A.2 (Recktenwald, 2018). O perfil de velocidades relativo à camada limite turbulenta apresenta velocidade zero na parede analisada e velocidade do fluxo externo à camada limite (u_e) sob altura (δ) (Recktenwald, 2018). O modelo comumente aplicado às simulações CFD assume que o incremento da velocidade externa a camada limite turbulenta em relação ao aumento de sua altura é insignificante (Recktenwald, 2018). Conclusivamente, a velocidade externa a camada limite turbulenta não apresentará variações relevantes ao longo das alturas da ordem de 10δ (Recktenwald, 2018). Esta condição determina que a camada limite, associada ao seu fluxo externo, apresente uma estrutura universal, aplicável aos distintos escoamentos estudados em simulações CFD (Recktenwald, 2018). Esta estrutura universal representa o principal conceito relativo ao modelo de turbulência aplicado às regiões próximas as paredes em simulações CFD (Recktenwald, 2018).

As funções de parede são definidas como modelos computacionais aplicados na aproximação numérica relativa ao escoamento turbulento na região compreendida entre a parede analisada e a fronteira entre a camada limite turbulenta e seu fluxo externo (Recktenwald, 2018). As funções de parede determinam a aproximação numérica deste

escoamento turbulento desconsiderando determinados pormenores relativos à camada limite turbulenta (Recktenwald, 2018). Conclusivamente, as funções da parede consistem em modelos de transporte do momento turbulento relativos à região da camada limite turbulenta (Recktenwald, 2018).

A figura A.2, em seu lado esquerdo, apresenta a camada limite turbulenta, dividida em duas regiões denominadas de região interna (entre a parede e a altura de $0,1\delta$) e região externa (entre a altura de $0,1\delta$ e a altura de δ) (Recktenwald, 2018). O estabelecimento destas duas regiões distintas é fundamental para a caracterização da camada limite turbulenta (Recktenwald, 2018). O escoamento relativo à região externa é essencialmente caracterizado pelo fluxo estabelecido acima da camada limite (Recktenwald, 2018). O escoamento relativo à região interna é essencialmente caracterizado pelas condições de parede, determinadas pela lei de parede, que consiste em um modelo semi-empírico que descreve o comportamento da camada limite próxima a parede (Recktenwald, 2018).

A região interna, conforme mostrado no lado direito da figura A.2, é dividida em três camadas denominadas respectivamente de camada de sobreposição, camada de amortecimento e subcamada viscosa (Recktenwald, 2018). A lei de parede abrange estas três camadas relativas à região interna (Recktenwald, 2018). A altura relativa às camadas da região interna é caracterizada por uma variável adimensional denominada de “*y plus*” (y^+) (Recktenwald, 2018). A figura A.2, em seu lado direito, demonstra os valores de “*y plus*” (y^+) relativos às camadas da região interna (Recktenwald, 2018).

A variável adimensional “*y plus*” (y^+) é determinada através da equação A.2 (Recktenwald, 2018).

$$y^+ = \frac{y u_*}{\nu} \quad (\text{A.2})$$

A velocidade de fricção (u_*), expressa na equação A.2 é determinada através da equação A.3 (Recktenwald, 2018).

$$u_* = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} \quad (\text{A.3})$$

A variável adimensional relativa à velocidade do escoamento na região interna da camada limite turbulenta denominada “*x plus*” (u^+) é expressa através da equação A.4 (Recktenwald, 2018).

$$u^+ = \frac{u}{u_*} \quad (\text{A.4})$$

O perfil de velocidades na região interna da camada limite turbulenta é estabelecido a partir de distintas condições físicas e equações inerentes ao escoamento na camada de sobreposição, camada de amortecimento e subcamada viscosa (Recktenwald, 2018).

As tensões de cisalhamento na subcamada viscosa são determinadas pelas forças viscosas (Recktenwald, 2018). A relação entre as variáveis adimensionais “*y plus*” (y^+) e “*x plus*” (u^+) na subcamada viscosa é demonstrada pela equação A.5 (Recktenwald, 2018).

$$u^+ = y^+ \quad (\text{A.5})$$

A relação apresentada na equação A.5 estabelece a expressão A.6 aplicada na definição do perfil de velocidade na subcamada viscosa (Recktenwald, 2018).

$$u = y \quad (\text{A.6})$$

A equação A.6 demonstra que o perfil de velocidades na subcamada viscosa é nominalmente linear (Recktenwald, 2018). A validação experimental da equação A.6 é impraticável, pois a subcamada viscosa é muito próxima à parede, tornando mandatório o desenvolvimento de uma sonda de dimensões minúsculas, inviabilizando tecnicamente este experimento (Recktenwald, 2018).

A camada de amortecimento, localizada entre a subcamada viscosa e a camada de sobreposição, não apresenta uma equação trivial que descreva seu perfil de velocidades (Recktenwald, 2018).

O perfil de velocidades relativo à camada de sobreposição é estabelecido através da relação entre as variáveis adimensionais “*y plus*” (y^+) e “*x plus*” (u^+) através da equação A.7 (Recktenwald, 2018).

$$u^+ = c_1 \ln y^+ + c_2 \quad (\text{A.7})$$

A função de parede, em simulações CFD, estabelece uma região na malha computacional que permite que escoamento turbulento seja vinculado às condições de contorno físicas da

parede (Recktenwald, 2018). Esta conjuntura será elucidada a partir da análise da figura A.3, a qual demonstra um escoamento muito próximo a uma determinada parede sólida.

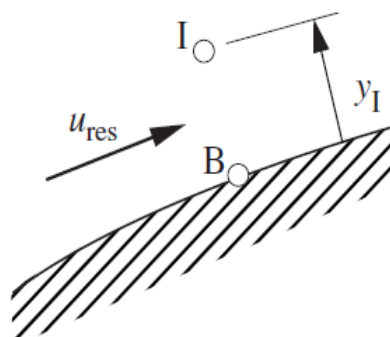


Figura A.3 - Condições de contorno aplicadas a função de parede
Fonte: Adaptado de Recktenwald (2018)

Os círculos denominados de "B" e "I" na figura A.3 representam respectivamente o nó da malha relativo à fronteira do escoamento na parede e o nó interno mais próximo à malha computacional (Recktenwald, 2018). A dimensão vertical (altura) do nó "I" é caracterizada pela variável (y_I), assim como a velocidade resultante do escoamento paralela a parede na região compreendida entre os nós "B" e "I" caracterizada pela variável (u_{res}) (Recktenwald, 2018).

A função de parede estabelece que o nó "I" esteja acima da região relativa à camada de sobreposição, apresentando perfil de velocidade entre os nós "B" e "I" conforme demonstrado no lado esquerdo da figura A.2 (Recktenwald, 2018).

O intuito da função de parede é modelar a tensão de cisalhamento na parede (τ_w) a partir do valor da velocidade do escoamento no nó "I" (Recktenwald, 2018). A função de parede permite a determinação da tensão de cisalhamento e o fluxo de calor na parede, desconsiderando a estrutura detalhada da camada limite (Recktenwald, 2018).

A.1.5. Equacionamento aplicado a análise fluidodinâmica computacional

As equações intrínsecas à análise CFD são aplicadas segundo premissas relativas às leis de conservação física (Versteeg e Malalasekera, 2007). A primeira premissa consiste na conservação da massa, ou seja, a massa do fluido é conservada (Versteeg e Malalasekera, 2007). A segunda premissa é fundamentada na segunda lei de Newton, determinado que a variação de momento em um elemento infinitesimal seja igual à soma das forças neste mesmo elemento (Versteeg e Malalasekera, 2007). A terceira premissa é fundamentada na primeira lei da termodinâmica, determinado que a variação de energia em um elemento infinitesimal é

igual à soma das variações de calor e trabalho neste mesmo elemento (Versteeg e Malalasekera, 2007).

A análise CFD considera o fluido relativo ao escoamento simulado um continuum (Versteeg e Malalasekera, 2007). Portanto, a análise CFD é desempenhada em escala macroscópica, desconsiderando a estrutura molecular da matéria e seus movimentos moleculares (Versteeg e Malalasekera, 2007). Os elementos infinitesimais constituintes do fluido compreendem o objeto da análise CFD, cujas propriedades macroscópicas não são influenciadas por suas moléculas (Versteeg e Malalasekera, 2007).

A simulação CFD, efetivamente, analisa 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).

A primeira premissa (conservação da massa), aplicada ao elemento infinitesimal, sob regime não permanente e relativo a fluidos compressíveis é expressa através da equação A.8 (Versteeg e Malalasekera, 2007).

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u) = 0 \quad (\text{A.8})$$

A equação A.8 também é denominada equação da continuidade. O primeiro termo da equação A.8 descreve a taxa de variação da densidade em relação ao tempo (Versteeg e Malalasekera, 2007). O segundo termo da equação A.8 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 sob uma abordagem Euleriana ou Lagrangeana (Versteeg e Malalasekera, 2007).

A abordagem Lagrangeana determina que a propriedade física (φ) relativa ao elemento infinitesimal seja função de sua posição (x, y, z) e do tempo (t) (Versteeg e Malalasekera, 2007). Portanto, 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 (φ) por unidade de volume, intrínseca ao elemento infinitesimal sob a abordagem Lagrangeana, é expressa através da equação A.9 (Versteeg e Malalasekera, 2007).

$$\rho \frac{D\varphi}{Dt} = \rho \left(\frac{\partial\varphi}{\partial t} + \nabla\varphi \right) \quad (\text{A.9})$$

A abordagem Euleriana determina que o elemento infinitesimal permaneça fixo no espaço, sendo denominado de elemento fluido (Versteeg e Malalasekera, 2007). Esta abordagem estabelece uma posição invariável (x, y, z) no tempo (t) 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 (φ) por unidade de volume, intrínseca ao elemento infinitesimal sob a abordagem Euleriana e mediante aplicação da equação da continuidade, é expressa através da equação A.10 (Versteeg e Malalasekera, 2007).

$$\frac{\partial(\rho\varphi)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho\varphi u) = 0 \quad (\text{A.10})$$

A relação entre a taxa de variação de uma propriedade física (φ) relativa à partícula fluída (abordagem Lagrangeana) e a taxa de variação desta mesma propriedade física (φ) relativa ao elemento fluido (abordagem Euleriana) é estabelecida através da equação A.11 (Versteeg e Malalasekera, 2007).

$$\rho \frac{D\varphi}{Dt} = \frac{\partial(\rho\varphi)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho\varphi) \quad (\text{A.11})$$

A primeira parcela da equação A.11 é constituída pela derivada substantiva ou total da propriedade física (φ) por unidade de volume em relação ao tempo, determinando a taxa de variação desta propriedade física (φ) na partícula de fluída (Versteeg e Malalasekera, 2007). A segunda parcela da equação A.11 representa a taxa de variação da propriedade física (φ) por unidade de volume no elemento de fluido em relação ao tempo (Versteeg e Malalasekera, 2007). A terceira parcela da equação A.11 representa a taxa líquida relativa ao fluxo da

propriedade física (φ) fora do elemento fluido por unidade de volume (Versteeg e Malalasekera, 2007).

A aplicação da conservação do momento relativo aos três eixos (x,y,z) na equação A.11 é expressa respectivamente através das equações A.12, A.13 e A.14 (Versteeg e Malalasekera, 2007).

$$\rho \frac{Du}{Dt} = \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u) \quad (\text{A.12})$$

$$\rho \frac{Dy}{Dt} = \frac{\partial(\rho y)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho y) \quad (\text{A.13})$$

$$\rho \frac{Dz}{Dt} = \frac{\partial(\rho z)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho z) \quad (\text{A.14})$$

A aplicação da conservação da energia na equação A.11 é expressa através da equação A.15 (Versteeg e Malalasekera, 2007).

$$\rho \frac{DE}{Dt} = \frac{\partial(\rho E)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho E) \quad (\text{A.15})$$

A segunda premissa, fundamentada 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 forças viscosas (Versteeg e Malalasekera, 2007). As forças de campo são compreendidas pelas forças centrífugas, Coriolis e eletromagnéticas (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.4 (Versteeg e Malalasekera, 2007). A notação relativa aos índices (i) e (j) são aplicadas na indicação da direção dos componentes de tensões viscosas, portanto o componente da tensão

viscosa (τ_{ij}) indica a direção de atuação (j) sob uma superfície normal à direção (i) (Versteeg e Malalasekera, 2007).

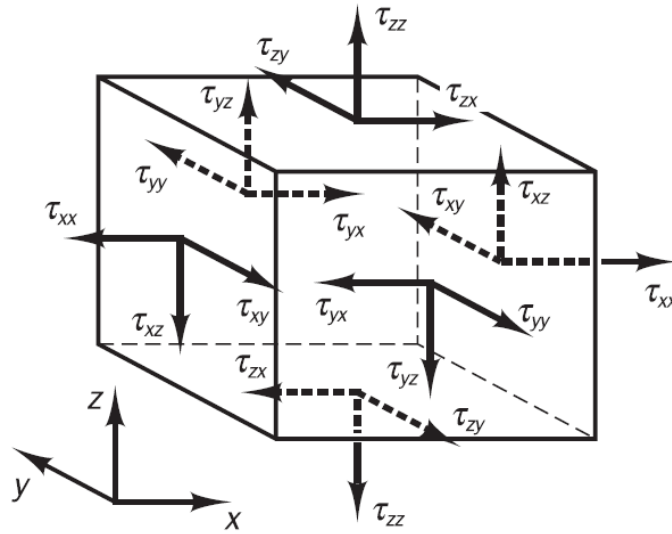


Figura A.4 - Estado de tensão intrínseco ao elemento infinitesimal
Fonte: Versteeg e Malalasekera (2007)

As componentes (x,y,z) relativas à equação do momento são expressas respectivamente através das equações A.16, A.17 e A.18 (Versteeg e Malalasekera, 2007).

$$\rho \frac{Du}{Dt} = \frac{\partial (-p + \tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + S_{MX} \quad (\text{A.16})$$

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial (-p + \tau_{yy})}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + S_{MY} \quad (\text{A.17})$$

$$\rho \frac{Dw}{Dt} = \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial (-p + \tau_{yy})}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + S_{MZ} \quad (\text{A.18})$$

A primeira parcela das equações A.16, A.17 e A.18, assim como as primeiras parcelas das equações A.12, A.13 e A.14, são constituídas respectivamente pela taxa de variação de momento relativo aos eixos (x,y,z) por unidade de volume (Versteeg e Malalasekera, 2007). A segunda, terceira e quarta parcela das equações A.16, A.17 e A.18 representam respectivamente a força total nas direções (x,y,z) exercidas no elemento infinitesimal devido as tensões superficiais (Versteeg e Malalasekera, 2007). A quinta parcela das equações A.16, A.17 e A.18 representa respectivamente o termo fonte de momento relativo aos eixos (x,y,z) por unidade de volume e tempo (Versteeg e Malalasekera, 2007).

A terceira premissa, fundamentada na primeira lei da termodinâmica, estabelece invariavelmente 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 nesta premissa (Versteeg e Malalasekera, 2007). A equação de energia é expressa através da equação A.19 (Versteeg e Malalasekera, 2007).

$$\rho \frac{DE}{Dt} = -\nabla \cdot (pu) + \left[\frac{\partial(u\tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial(u\tau_{yx})}{\partial y} + \frac{\partial(u\tau_{zx})}{\partial z} + \frac{\partial(v\tau_{xy})}{\partial x} + \frac{\partial(v\tau_{yy})}{\partial y} + \frac{\partial(v\tau_{zy})}{\partial z} \right] \\ \left[\frac{\partial(w\tau_{xz})}{\partial x} + \frac{\partial(w\tau_{yz})}{\partial y} + \frac{\partial(w\tau_{zz})}{\partial z} \right] + \nabla \cdot (k\nabla T) + S_E \quad (\text{A.19})$$

A primeira parcela da equação A.19 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.19 expressam a taxa total de trabalho realizado pelas tensões superficiais sob a partícula fluida (Versteeg e Malalasekera, 2007). A quarta parcela da equação A.19 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.19 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.19 é aplicada na definição da equação da energia interna (i), a qual é expressa através da equação A.20 (Versteeg e Malalasekera, 2007).

$$\rho \frac{Di}{Dt} = -p\nabla \cdot (u) + \nabla \cdot (k\nabla T) + \tau_{xx} \frac{\partial u}{\partial x} + \tau_{yx} \frac{\partial u}{\partial y} + \tau_{zx} \frac{\partial u}{\partial z} + \tau_{xy} \frac{\partial v}{\partial x} + \tau_{yy} \frac{\partial v}{\partial y} + \tau_{zy} \frac{\partial v}{\partial z} \\ \tau_{xz} \frac{\partial w}{\partial x} + \tau_{yz} \frac{\partial w}{\partial y} + \tau_{zz} \frac{\partial w}{\partial z} + S_I \quad (\text{A.20})$$

Até o momento, a dinâmica dos fluidos tridimensional esta sendo caracterizada por um sistema constituído de cinco equações diferenciais parciais; equação da conservação da massa (A.8), equações do momento (x,y,z) (A.16, A.17 e A.18) e equação da energia (A.19) (Versteeg e Malalasekera, 2007). Este sistema de equações apresenta, dentre suas incógnitas, quatro variáveis termodinâmicas; massa específica (ρ), pressão (p), energia interna (i) e temperatura (T) (Versteeg e Malalasekera, 2007). Determinadas relações entre estas variáveis

termodinâmicas podem ser estabelecidas através da premissa do equilíbrio termodinâmico (Versteeg e Malalasekera, 2007).

A análise fluidodinâmica aplica invariavelmente esta premissa do equilíbrio termodinâmico do fluido, sendo válida na pluralidade dos estudos intrínsecos a análise CFD (Versteeg e Malalasekera, 2007). A premissa do 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 massa específica (ρ) e temperatura (T), determina-se a pressão (p) e a energia interna (i) conforme demonstrado nas equações A.21 e A.22 (Versteeg e Malalasekera, 2007).

$$p = p(\rho, T) \quad (\text{A.21})$$

$$i = i(\rho, T) \quad (\text{A.22})$$

A análise fluidodinâmica aplicada aos gases perfeitos determina a observância das equações de estado A.23 e A.24 (Versteeg e Malalasekera, 2007).

$$p = \rho R_{GP} T \quad (\text{A.23})$$

$$i = C_v T \quad (\text{A.24})$$

Em escoamentos compressíveis, as equações de estado estabelecem a relação entre a equação da energia (A.19) e as equações da conservação de massa (A.8) e momento (x, y, z) (A.16, A.17 e A.18) (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).

A premissa do equilíbrio termodinâmico adicionou as cinco equações diferenciais parciais (conservação da massa (A.8), equações de momento (x, y, z) (A.16, A.17 e A.18) e equação da energia (A.19)) duas equações algébricas, totalizando deste modo um sistema de 7 equações (Versteeg e Malalasekera, 2007).

As equações diferenciais parciais A.16, A.17 e A.18 apresentam entre suas incógnitas as componentes de tensão viscosa (τ_{ij}) (Versteeg e Malalasekera, 2007). As equações intrínsecas a análise fluidodinâmica são obtidas através da aplicação de um modelo adequado as tensões viscosas (τ_{ij}) contidas nas equações A.16, A.17 e A.18 e A.20 (Versteeg e Malalasekera, 2007). Neste modelo, as tensões viscosas (τ_{ij}) 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, portanto as tensões viscosas (τ_{ij}) são proporcionais às taxas de deformação (s_{ij}) (Versteeg e Malalasekera, 2007). O modelo tridimensional da lei de viscosidade de Newton aplicado a escoamentos compressíveis determina a constante de proporcionalidade (μ) relativa à viscosidade dinâmica, relacionando tensões a deformações lineares (Versteeg e Malalasekera, 2007). A aplicação do modelo newtoniano determina que as tensões viscosas (τ_{ij}) 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 (τ_{ij}) nas equações A.16, A.17 e A.18 e A.20 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 (x,y,z) e a energia interna (i) são apresentadas respectivamente através equações A.25, A.26, A.27 e A.28 (Versteeg e Malalasekera, 2007).

$$\rho \frac{Du}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \nabla \cdot (\mu \rho \nabla u) + S_{MX} \quad (\text{A.25})$$

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \nabla \cdot (\mu \rho \nabla v) + S_{MY} \quad (\text{A.26})$$

$$\rho \frac{Dw}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial z} + \nabla \cdot (\mu \rho \nabla w) + S_{MZ} \quad (\text{A.27})$$

$$\rho \frac{Di}{Dt} = -p \nabla \cdot (u) + \nabla \cdot (k \nabla T) + \Phi + S_I \quad (\text{A.28})$$

As equações A.12, A.13, A.14 e A.15 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.12, A.13, A.14 e A.15 definem respectivamente as primeiras parcelas das equações A.25, A.26, A.27 e A.28. Procedendo a substituição das equações A.12, A.13, A.14 e A.15 respectivamente nas equações A.25, A.26, A.27 e A.28, obtém-se as equações de Navier-Stokes comumente apresentadas na literatura (Versteeg e Malalasekera, 2007). Estas equações de Navier-Stokes são demonstradas através das equações A.29, A.30, A.31 e A.32 (Versteeg e Malalasekera, 2007).

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \nabla \cdot (\mu \rho \nabla u) + S_{MX} \quad (\text{A.29})$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \nabla \cdot (\mu \rho \nabla v) + S_{MY} \quad (\text{A.30})$$

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho w) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \nabla \cdot (\mu \rho \nabla w) + S_{MZ} \quad (\text{A.31})$$

$$\frac{\partial(\rho i)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho i) = -p \nabla \cdot (u) + \nabla \cdot (k \nabla T) + \Phi + S_I \quad (\text{A.32})$$

As equações de Navier-Stokes (A.29, A.30, A.31 e A.32), a equação da conservação da massa (A.8) e equações de estado (A.21, A.22 ou A.23, A.24) 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 (ϕ) é expressa através da equação A.33 (Versteeg e Malalasekera, 2007).

$$\frac{\partial(\rho \phi)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \phi u) = \nabla \cdot (\Gamma \nabla \phi) + S_\phi \quad (\text{A.33})$$

A primeira parcela da equação A.33 expressa à taxa de variação da propriedade física (ϕ) relativa ao elemento fluido (Versteeg e Malalasekera, 2007). A segunda parcela da equação A.33 expressa à taxa líquida de variação de (ϕ) fora do elemento fluido (Versteeg e Malalasekera, 2007). A terceira parcela da equação A.33 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.33 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.33 sob o volume de controle, e aplicando o teorema da divergência de Gauss, estabelece a equação A.34 (Versteeg e Malalasekera, 2007).

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\int_{VC} \rho \phi dV \right) + \int_A n \cdot (\rho \phi u) dA = \int_A n \cdot (\Gamma \nabla \phi) dA + \int_{VC} S_\phi dV \quad (\text{A.34})$$

A primeira parcela da equação A.34 expressa à taxa de variação da propriedade física (ϕ) no interior do volume de controle (Versteeg e Malalasekera, 2007). A segunda parcela da equação A.34 expressa à taxa líquida de variação da propriedade física (ϕ) 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.34 expressa à taxa líquida de variação da propriedade física (ϕ) 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.34 expressa à taxa de variação líquida de (ϕ) no interior do volume de controle (Versteeg e Malalasekera, 2007).

APÊNDICE B

```

# Determinação da velocidade do vento a uma altura de oito metros  $U(\infty_8)$ 

> restart :

#Determinação de fator de correlação da lei de potência (alpha) para alturas entre 200 100 metros.

> alpha(200_100) := solve( ( ( 6.71 / 6.8 ) = ( 100 / 200 )^alpha , alpha );
                                alpha(200_100) := 0.0192 (1)

#Determinação de fator de correlação da lei de potência (alpha) para alturas entre 100 50 metros.

> alfa(100_50) := solve( ( ( 6.62 / 6.71 ) = ( 50 / 100 )^alpha , alpha );
                                alfa(100_50) := 0.0195 (2)

#Determinação da velocidade do vento  $U(\infty)$  a uma altura de 8 metros aplicando o fator de
correlação da lei de potência (alpha) para alturas entre 200 100 metros

> U(∞_8) := solve( ( ( x / 6.22 ) = ( 8 / 50 )^0.0195 , x );
                                U(∞_8) := 6.0010 (3)

#Determinação da velocidade do vento  $U(\infty)$  a uma altura de 8 metros aplicando o fator de
correlação da lei de potência (alpha) para alturas entre 200 100 metros

> U(∞_8) := solve( ( ( x / 6.22 ) = ( 8 / 50 )^0.0192 , x );
                                U(∞_8) := 6.0040 (4)

```

Figura B-1 - Programa computacional aplicado a determinação do fator de correlação da lei de potência (α_E) e velocidade do vento (U_∞) a altura de 8 metros no município de Aracati - CE.

APÊNDICE C

Dimensionamento de sistema de conversão de energia solar Dish-Stirling

> restart :

Descrição das variáveis aplicadas ao programa:

Rendimentos:

η_g = Rendimento global ;

η_c = Rendimento do concentrador;

η_{ge} = Rendimento do gerador;

η_r = Rendimento do receptor;

η_s = Rendimento do motor stirling;

Potência:

P_{sd} = Potência solar disponível (KW);

P_{sl} = Potência solar líquida (KW);

Coefficientes de convecção:

hc_{nat} = Coeficiente de convecção natural ($W/m^2 \cdot K$);

hc_{wind} = Coeficiente de convecção forçada ($W/m^2 \cdot K$);

hc = Coeficiente global de convecção ($W/m^2 \cdot K$);

Temperaturas:

T_{cav} = Temperatura da cavidade (K);

T_a = Temperatura ambiente (K);

T_r = Temperatura do receptor (K);

Irradiância solar:

I_d = Irradiância solar diária $\left(\frac{W}{m^2} \right)$;

Períodos:

T_s = Período anual de geração de energia elétrica do sistema Dish-Stirling ;

T_d = Período de irradiância solar diária local;

Energia elétrica gerada:

E = A energia elétrica anual gerada;

Constantes e fatores:

σ = Constante de Stefan – Boltzmann $\left(\frac{W}{m^2 \cdot K^4} \right)$

F_d = Fator de deterioração

F_s = Fator de sombreamento

R_{ref} = Fator de resfriamento

K_s = Constante Stirling

ε = Emissividade

τ_{abs} = Transmitância – Absortância

α_{abs} = Absortância

τ = Fator de interceptação

ρ = Refletibilidade do concentrador solar

Figura C.1- Programa concernente ao dimensionamento geométrico e térmico do sistema híbrido estabelecido sob o ponto de funcionamento (Parte 1)

```

# Fcs = Fator de capacidade solar

# Características geométricas do concentrador dish:
# Aa=Área de abertura do concentrador solar Dish (m2);
# φr=Ângulo da curvatura (rim angle)(radianos);
# Cg = Concentração geométrica,
# θi = Erro do sistema de rastreamento solar;
# Nlac= Número de lacunas do concentrador dish
# Llac= largura das lacunas do concentrador dish
# Hlac= altura das lacunas do concentrador dish

# Erros intrínsecos aos sistemas Dish-Stirling

# σE=Erro relativo à estrutura;
# σSR = Erro relativo ao sensor de rastreamento;
# σMR = Erro relativo aos motores de rastreamento;
# σAR= Erro relativo ao alinhamento do receptor;
# σRE = Erro relativo à reflexão do espelho;
# σS = Erro relativo à dimensão do Sol;

# Características geométricas do receptor:
# Acav =Área da cavidade do receptor (m2);
# Ar=Área do receptor (m2);
# Dr=Diâmetro do receptor (m2);

# Valores numéricos atribuídos a constantes e fatores:

# Fator de resfriamento:
> Rref := 0.5;
Rref := 0.5000 (1)

# Fator de deterioração:
> Fd := 0.85;
Fd := 0.8500 (2)

# Constante Stirling :
> Ks := 0.50;
Ks := 0.5000 (3)

# Constante de Stefan –Boltzmann:
> σ := 5.6697 · 10-8;
σ := 5.6697 10-8 (4)

# Ângulo da curvatura de 27°

```

Figura C.1- Programa concernente ao dimensionamento geométrico e térmico do sistema híbrido estabelecido sob o ponto de funcionamento (Parte 2)

> $\varphi_r := 0.471239;$	$\varphi_r := 0.4712$	(5)
<u># Ângulo de sombreamento de 14°</u>		
> $\varphi_s := 0.244346;$	$\varphi_s := 0.2443$	(6)
<u># Absortância do absorvedor:</u>		
> $\alpha_{abs} := 0.80;$	$\alpha_{abs} := 0.8000$	(7)
<u># Emissividade:</u>		
> $\varepsilon := 0.14;$	$\varepsilon := 0.1400$	(8)
<u># Refletibilidade do concentrador solar:</u>		
> $\rho := 0.86;$	$\rho := 0.8600$	(9)
<u>Rendimento do gerador:</u>		
> $\eta_{ge} := 0.90;$	$\eta_{ge} := 0.9000$	(10)
<u># Erro relativo à estrutura:</u>		
> $\sigma_E := 0.007;$	$\sigma_E := 0.0070$	(11)
<u># Erro relativo ao sensor de rastreamento:</u>		
> $\sigma_{SR} := 0.002;$	$\sigma_{SR} := 0.0020$	(12)
<u># Erro relativo aos motores de rastreamento:</u>		
> $\sigma_{MR} := 0.002;$	$\sigma_{MR} := 0.0020$	(13)
<u># Erro relativo ao alinhamento do receptor:</u>		
> $\sigma_{AR} := 0.002;$	$\sigma_{AR} := 0.0020$	(14)
<u># Erro relativo à reflexão do espelho:</u>		
> $\sigma_{RE} := 0.0005;$	$\sigma_{RE} := 0.0005$	(15)

Figura C.1- Programa concernente ao dimensionamento geométrico e térmico do sistema híbrido estabelecido sob o ponto de funcionamento (Parte 3)

```

# Erro relativo à dimensão do Sol:
>  $\sigma_S := 0.0028;$ 
 $\sigma_S := 0.0028$  (16)

# Coeficiente de dispersão:
>  $\text{Lambda\_ar} := 0.6;$ 
 $\text{Lambda\_ar} := 0.6000$  (17)

# Coeficiente de turbidez
>  $\text{Beta\_ar} := 10^{-4};$ 
 $\text{Beta\_ar} := \frac{1}{10000}$  (18)

# Coeficiente de concentração
>  $\text{alfa\_ar} := 3.1;$ 
 $\text{alfa\_ar} := 3.1000$  (19)

# Massa específica do ar
>  $\text{Ro\_ar} := 1.225;$ 
 $\text{Ro\_ar} := 1.2250$  (20)
#####
# Dados de entrada do sistema Dish Sirling:
# Diâmetro do concentrador solar Dish (m):
>  $D_p := 6;$ 
 $D_p := 6$  (21)

# Temperatura ambiente (K):
>  $T_a := 300;$ 
 $T_a := 300$  (22)

# Radiação solar  $\left( \frac{W}{m^2} \right)$ :
>  $I_d := 572;$ 
 $I_d := 572$  (23)

# Velocidade do vento(m/s):
>  $V := 6;$ 
 $V := 6$  (24)

# Número de lacunas do concentrador dish
>  $N_{lac} := 20;$ 

```

Figura C.1- Programa concernente ao dimensionamento geométrico e térmico do sistema híbrido estabelecido sob o ponto de funcionamento (Parte 4)

```

|                                     Nlac := 20                                     (25)
| #####
| # Largura das lacunas do concentrador dish(m)
| > Llac := 0.275;
|                                     Llac := 0.2750                                     (26)
| # Altura das lacunas do concentrador dish(m)
| > Hlac := 2;
|                                     Hlac := 2                                     (27)
| #####
| # Determinação de fator aplicados ao dimensionamento térmico:
| # Fator do sombreamento x fator de interceptação:
| >  $F_s \tau := \frac{(\sin(\varphi_r))^2 - (\sin(\varphi_s))^2}{4 \cdot \left(\tan\left(\frac{\varphi_r}{2}\right)\right)^2};$ 
|                                      $F_s \tau := 0.6401$                                      (28)
| # Determinação dos parâmetros geométricos:
| # Determinação da área de abertura (m2):
| >  $A_a := \left(\frac{\text{evalf}(\text{Pi})}{4} \cdot D_p^2\right) - (Nlac \cdot Llac \cdot Hlac);$ 
|                                      $A_a := 17.2743$                                      (29)
| # Calculo de ponto focal(m):
| >  $f := \frac{D_p}{4 \cdot \tan\left(\frac{\varphi_r}{2}\right)};$ 
|                                      $f := 6.2479$                                      (30)
| # Massa de ar estabelecida entre o receptor e o concentrador
| >  $m_{ar} := \frac{\text{evalf}(\text{Pi}) \cdot D_p^2}{4} \cdot f \cdot Ro_{ar};$ 
|                                      $m_{ar} := 216.4043$                                      (31)
| # Transmitância
| >  $\tau := \exp(-Beta_{ar} \cdot Lambda_{ar}^{-alfa_{ar}} \cdot m_{ar});$ 
|                                      $\tau := 0.8999$                                      (32)
| # Erro do sistema de rastreamento medio diário(radianos):

```

Figura C.1- Programa concernente ao dimensionamento geométrico e térmico do sistema híbrido estabelecido sob o ponto de funcionamento (Parte 5)

$$\begin{aligned} > \theta_i := \left((\sigma E)^2 + (\sigma SR)^2 + (\sigma MR)^2 + (\sigma AR)^2 + (\sigma RE)^2 + (\sigma S)^2 \right)^{0.5}; \\ & \theta_i := 0.0083 \end{aligned} \quad (33)$$

Calculo do diâmetro do receptor(m):

$$\begin{aligned} > D_r := \frac{f^2 \cdot \theta_i}{\cos(\varphi r) \cdot (1 + \cos(\varphi r))}; \\ & D_r := 0.1926 \end{aligned} \quad (34)$$

Calculo da área de abertura do receptor(m²):

$$\begin{aligned} > A_r := \left(\frac{\text{evalf}(\text{Pi})}{4} \cdot D_r^2 \right); \\ & A_r := 0.0291 \end{aligned} \quad (35)$$

Calculo da concentração geométrica teórica:

$$\begin{aligned} > C_{gt} := \frac{A_a}{A_r}; \\ & C_{gt} := 593.0541 \end{aligned} \quad (36)$$

Calculo da concentração geométrica de projeto:

$$\begin{aligned} > C_g := 0.8 \cdot C_{gt}; \\ & C_g := 474.4433 \end{aligned} \quad (37)$$

Calculo do diâmetro da cavidade do concentrador (m):

$$\begin{aligned} > D_{cav} := \frac{4}{3} \cdot D_r; \\ & D_{cav} := 0.2568 \end{aligned} \quad (38)$$

Calculo da area da cavidade do concentrador (m²):

$$\begin{aligned} > A_{cav} := \frac{\text{evalf}(\text{Pi}) \cdot D_{cav}^2}{4}; \\ & A_{cav} := 0.0518 \end{aligned} \quad (39)$$

#Rendimento do concentrador:

$$\begin{aligned} > \eta_c := \cos(\theta) \cdot \rho \cdot F_s \bar{\tau} \\ & \eta_c := 0.5505 \end{aligned} \quad (40)$$

Calculo da temperatura teórica na cavidade do receptor:

$$\begin{aligned} > K_{att} := \eta_c \cdot F_d \cdot R_{ref}; \\ & K_{att} := 0.2340 \end{aligned} \quad (41)$$

Calculo da temperatura do receptor(K):

Figura C.1- Programa concernente ao dimensionamento geométrico e térmico do sistema híbrido estabelecido sob o ponto de funcionamento (Parte 6)

```

> 
$$Tr := \left( \frac{Id \cdot Cg \cdot \alpha_{abs}}{\sigma \cdot \varepsilon} \right)^{\frac{1}{4}} \cdot K_{att};$$

Tr := 535.0343
(42)
# Perdas por convecção forçada devido aos ventos:
# Angulo do receptor para o cálculo da convecção forçada devido aos ventos (radianos):
>  $\psi := 1.0472;$ 
 $\psi := 1.0472$ 
(43)
# Calculo da função F em função da inclinação do receptor:
>  $F := 0.1634 + 0.7498 \cdot \sin(\psi) + 0.5026 \cdot \sin(2 \cdot \psi) + 0.3278 \cdot \sin(3 \cdot \psi);$ 
F := 1.2480
(44)
# Calculo das perdas por convecção forçada devido aos ventos:
>  $hc_{wind} := F \cdot V^{(1.104)};$ 
hc_{wind} := 9.0219
(45)
# Determinação do número de Grashof:
# Dados auxiliares na determinação do número de Grashof:
# Aceleração da gravidade [m/s2]:
>  $g := 9.81;$ 
g := 9.8100
(46)
# Determinação do coeficiente  $\beta$ :
> 
$$\beta := \frac{1}{\frac{(Ta + Tr)}{2}};$$

 $\beta := 0.0024$ 
(47)
# Viscosidade cinemática para a temperatura de 550(K):
>  $v := 43.9 \cdot 10^{-6};$ 
v := 0.0000
(48)
# Condutividade térmica para a temperatura de 550(K):
>  $kar := 45.57 \cdot 10^{-3};$ 
kar := 0.0456
(49)
# Determinação do número de Grashof:

```

Figura C.1- Programa concernente ao dimensionamento geométrico e térmico do sistema híbrido estabelecido sob o ponto de funcionamento (Parte 7)

$$\begin{aligned}
 & \text{> } Gr := \frac{g \cdot \beta \cdot (Tr - Ta) \cdot Dr^3}{v^2}; \\
 & \qquad \qquad \qquad Gr := 2.0466 \cdot 10^7 \qquad \qquad \qquad (50) \\
 & \text{\#Determinação do coeficiente } S \text{:} \\
 & \text{> } S := 1.12 - 0.982 \cdot \left(\frac{Dr}{Dcav} \right); \\
 & \qquad \qquad \qquad S := 0.3835 \qquad \qquad \qquad (51) \\
 & \text{\#Determinação do número de Nusselt:} \\
 & \text{> } Nus := 0.088 \cdot Gr^{\frac{1}{3}} \cdot \left(\frac{Tr}{Ta} \right)^{0.18} \cdot \cos(\psi)^{2.47} \cdot \left(\frac{Dr}{Dcav} \right)^S; \\
 & \qquad \qquad \qquad Nus := 4.3177 \qquad \qquad \qquad (52) \\
 & \text{\#Determinação do coeficiente de convecção natural no receptor (W/m}^2\text{*K):} \\
 & \text{> } hc_{nat} := \frac{Nus \cdot kar}{Dr}; \\
 & \qquad \qquad \qquad hc_{nat} := 1.0217 \qquad \qquad \qquad (53) \\
 & \text{\# Determinação do coeficiente global de convecção no receptor (W/m}^2\text{K):} \\
 & \text{> } hc := hc_{wind} + hc_{nat}, \\
 & \qquad \qquad \qquad hc := 10.0436 \qquad \qquad \qquad (54) \\
 & \text{\# Determinação do rendimento do receptor:} \\
 & \text{> } \eta_r := \left(\bar{v} \cdot \alpha_{abs} - \left(\frac{hc \cdot (Tr - Ta) + \varepsilon \cdot \sigma \cdot (Tr^4 - Ta^4)}{\eta_c \cdot C_g \cdot Id} \right) \right); \\
 & \qquad \qquad \qquad \eta_r := 0.7002 \qquad \qquad \qquad (55) \\
 & \text{\# Determinação do rendimento do motor Stirling:} \\
 & \text{> } \eta_s := \left(1 - \left(\frac{Ta}{Tr} \right) \right) \cdot K_s; \\
 & \qquad \qquad \qquad \eta_s := 0.2196 \qquad \qquad \qquad (56) \\
 & \text{\# Determinação do rendimento global do sistema Dish Stirling:} \\
 & \text{> } \eta_g := \eta_r \cdot \eta_s \cdot \eta_c \cdot \eta_{ge}; \\
 & \qquad \qquad \qquad \eta_g := 0.0762 \qquad \qquad \qquad (57) \\
 & \text{\#Determinação da potência disponível ao sistema Dish Stirling (kW) :} \\
 & \text{> } P_{sd} := \frac{Id \cdot A_a}{1000}; \\
 & \qquad \qquad \qquad P_{sd} := 9.8809 \qquad \qquad \qquad (58)
 \end{aligned}$$

Figura C.1- Programa concernente ao dimensionamento geométrico e térmico do sistema híbrido estabelecido sob o ponto de funcionamento (Parte 8)

```

#Potência útil disponível ou potência elétrica gerada pelo sistema Dish Stirling (kW):
[
> Psl := ηg · Psd;
]
Psl := 0.7529 (59)

# Energia elétrica anual gerada pelo sistema Dish Stirling (MWh):
[
> Eag :=  $\frac{Psl \cdot 365 \cdot 8}{1000}$ ;
]
Eag := 2.1985 (60)

```

Figura C.1- Programa concernente ao dimensionamento geométrico e térmico do sistema híbrido estabelecido sob o ponto de funcionamento (Parte 9)

```

# Dimensionamento de sistema de conversão de energia solar Dish-Stirling
> restart :
# Descrição das variáveis aplicadas ao programa:

# Rendimentos:
#  $\eta_g$  = Rendimento global ;
#  $\eta_c$  = Rendimento do concentrador;
#  $\eta_{ge}$  = Rendimento do gerador;
#  $\eta_r$  = Rendimento do receptor;
#  $\eta_s$  = Rendimento do motor stirling;

# Potência:
#  $P_{sd}$  = Potência solar disponível (KW);
#  $P_{sl}$  = Potência solar líquida (KW);

# Coefficientes de convecção:
#  $h_{c\_nat}$  = Coeficiente de convecção natural ( $W/m^2 \cdot K$ );
#  $h_{c\_wind}$  = Coeficiente de convecção forçada ( $W/m^2 \cdot K$ );
#  $h_c$  = Coeficiente global de convecção ( $W/m^2 \cdot K$ );

# Temperaturas:
#  $T_{cav}$  = Temperatura da cavidade (K);
#  $T_a$  = Temperatura ambiente (K);
#  $T_R$  = Temperatura do receptor (K);

# Irradiância solar:
#  $I_d$  = Irradiância solar diária  $\left( \frac{W}{m^2} \right)$ ;

# Períodos:
#  $T_s$  = Período anual de geração de energia elétrica do sistema Dish-Stirling ;
#  $T_d$  = Período de irradiância solar diária local;

# Energia elétrica gerada:

#  $E$  = A energia elétrica anual gerada;

# Constantes e fatores:
#  $\sigma$  = Constante de Stefan – Boltzmann  $\left( \frac{W}{m^2 \cdot K^4} \right)$ 
#  $F_d$  = Fator de deterioração
#  $F_s$  = Fator de sombreamento
#  $R_{ref}$  = Fator de resfriamento
#  $K_s$  = Constante Stirling
#  $\varepsilon$  = Emissividade
#  $\tau_{\alpha abs}$  = Transmitância – Absortância
#  $\alpha abs$  = Absortância
#  $\tau$  = Fator de interceptação
#  $\rho$  = Refletibilidade do concentrador solar

```

Figura C.2- Programa concernente ao dimensionamento geométrico e térmico do sistema híbrido estabelecido sob o ponto de projeto (Parte 1)

```

# Fcs = Fator de capacidade solar

# Características geométricas do concentrador dish:
# Aa=Área de abertura do concentrador solar Dish (m2);
# φr=Ângulo da curvatura (rim angle)(radianos);
# Cg = Concentração geométrica;
# êi = Erro do sistema de rastreamento solar;
# Nlac= Número de lacunas do concentrador dish
# Llac= largura das lacunas do concentrador dish
# Hlac= altura das lacunas do concentrador dish

# Erros intrínsecos aos sistemas Dish-Stirling

# σE=Erro relativo à estrutura;
# σSR = Erro relativo ao sensor de rastreamento;
# σMR = Erro relativo aos motores de rastreamento;
# σAR= Erro relativo ao alinhamento do receptor;
# σRE = Erro relativo à reflexão do espelho;
# σS = Erro relativo à dimensão do Sol;

# Características geométricas do receptor:
# Acav =Área da cavidade do receptor (m2);
# Ar=Área do receptor (m2);
# Dr=Diâmetro do receptor (m2);

# Valores numéricos atribuídos a constantes e fatores:

# Fator de resfriamento:
> Rref := 0.50;
Rref := 0.5000 (1)

# Fator de deterioração:
> Fd := 0.85;
Fd := 0.8500 (2)

# Constante Stirling :
> Ks := 0.50;
Ks := 0.5000 (3)

# Constante de Stefan –Boltzmann:
> σ := 5.6697 · 10-8;
σ := 5.6697 10-8 (4)

# Ângulo da curvatura de 27°

```

Figura C.2- Programa concernente ao dimensionamento geométrico e térmico do sistema híbrido estabelecido sob o ponto de projeto (Parte 2)

> $\varphi_r := 0.471239;$	$\varphi_r := 0.4712$	(5)
<u># Ângulo de sombreamento de 14°</u>		
> $\varphi_s := 0.244346;$	$\varphi_s := 0.2443$	(6)
<u># Absortância do absorvedor:</u>		
> $\alpha_{abs} := 0.80;$	$\alpha_{abs} := 0.8000$	(7)
<u># Emissividade:</u>		
> $\varepsilon := 0.14;$	$\varepsilon := 0.1400$	(8)
<u># Refletibilidade do concentrador solar:</u>		
> $\rho := 0.86;$	$\rho := 0.8600$	(9)
<u>Rendimento do gerador:</u>		
> $\eta_{ge} := 0.90;$	$\eta_{ge} := 0.9000$	(10)
<u># Erro relativo à estrutura:</u>		
> $\sigma_E := 0.007;$	$\sigma_E := 0.0070$	(11)
<u># Erro relativo ao sensor de rastreamento:</u>		
> $\sigma_{SR} := 0.002;$	$\sigma_{SR} := 0.0020$	(12)
<u># Erro relativo aos motores de rastreamento:</u>		
> $\sigma_{MR} := 0.002;$	$\sigma_{MR} := 0.0020$	(13)
<u># Erro relativo ao alinhamento do receptor:</u>		
> $\sigma_{AR} := 0.002;$	$\sigma_{AR} := 0.0020$	(14)
<u># Erro relativo à reflexão do espelho:</u>		
> $\sigma_{RE} := 0.0005;$	$\sigma_{RE} := 0.0005$	(15)

Figura C.2- Programa concernente ao dimensionamento geométrico e térmico do sistema híbrido estabelecido sob o ponto de projeto (Parte 3)

```

# Erro relativo à dimensão do Sol:
>  $\sigma_S := 0.0028;$ 
 $\sigma_S := 0.0028$  (16)

# Coeficiente de dispersão:
>  $\text{Lambda\_ar} := 0.6;$ 
 $\text{Lambda\_ar} := 0.6000$  (17)

# Coeficiente de turbidez
>  $\text{Beta\_ar} := 10^{-4};$ 
 $\text{Beta\_ar} := \frac{1}{10000}$  (18)

# Coeficiente de concentração
>  $\text{alfa\_ar} := 3.1;$ 
 $\text{alfa\_ar} := 3.1000$  (19)

# Massa específica do ar
>  $\text{Ro\_ar} := 1.225;$ 
 $\text{Ro\_ar} := 1.2250$  (20)
#####
# Dados de entrada do sistema Dish Stirling:
# Diâmetro do concentrador solar Dish (m):
>  $D_p := 6;$ 
 $D_p := 6$  (21)

# Temperatura ambiente (K):
>  $T_a := 300;$ 
 $T_a := 300$  (22)

# Radiação solar  $\left(\frac{W}{m^2}\right)$ :
>  $I_d := 730;$ 
 $I_d := 730$  (23)

# Velocidade do vento(m/s):
>  $V := 6;$ 
 $V := 6$  (24)

# Número de lacunas do concentrador dish
>  $N_{lac} := 20;$ 

```

Figura C.2- Programa concernente ao dimensionamento geométrico e térmico do sistema híbrido estabelecido sob o ponto de projeto (Parte 4)

```

|
|                                     Nlac := 20                                (25)
| #####
| # Largura das lacunas do concentrador dish(m)
| > Llac := 0.275;
|                                     Llac := 0.2750                            (26)
| # Altura das lacunas do concentrador dish(m)
| > Hlac := 2;
|                                     Hlac := 2                                (27)
| #####
| # Determinação de fator aplicados ao dimensionamento térmico:
| # Fator do sombreamento x fator de interceptação:
| >  $F_s\tau := \frac{(\sin(\varphi_r))^2 - (\sin(\varphi_s))^2}{4 \cdot \left(\tan\left(\frac{\varphi_r}{2}\right)\right)^2};$ 
|                                      $F_s\tau := 0.6401$                                 (28)
| # Determinação dos parâmetros geométricos:
| # Determinação da área de abertura (m2):
| >  $A_a := \left(\frac{\text{evalf}(\text{Pi})}{4} \cdot Dp^2\right) - (Nlac \cdot Llac \cdot Hlac);$ 
|                                      $A_a := 17.2743$                                 (29)
| # Calculo de ponto focal(m):
| >  $f := \frac{Dp}{4 \cdot \tan\left(\frac{\varphi_r}{2}\right)};$ 
|                                      $f := 6.2479$                                 (30)
| # Massa de ar estabelecida entre o receptor e o concentrador
| >  $m_{ar} := \frac{\text{evalf}(\text{Pi}) \cdot Dp^2}{4} \cdot f \cdot Ro_{ar};$ 
|                                      $m_{ar} := 216.4043$                                 (31)
| # Transmitância
| >  $\tau := \exp(-Beta_{ar} \cdot Lambda_{ar}^{-alfa_{ar}} \cdot m_{ar});$ 
|                                      $\tau := 0.8999$                                 (32)
| # Erro do sistema de rastreamento medio diário(radianos):

```

Figura C.2- Programa concernente ao dimensionamento geométrico e térmico do sistema híbrido estabelecido sob o ponto de projeto (Parte 5)

$$\begin{aligned}
 & \theta_i := \left((\sigma E)^2 + (\sigma SR)^2 + (\sigma MR)^2 + (\sigma AR)^2 + (\sigma RE)^2 + (\sigma S)^2 \right)^{0.5}; \\
 & \theta_i := 0.0083 \quad (33) \\
 & \# \text{ Calculo do diâmetro do receptor (m):} \\
 & Dr := \frac{f^2 \cdot \theta_i}{\cos(\varphi r) \cdot (1 + \cos(\varphi r))}; \\
 & Dr := 0.1926 \quad (34) \\
 & \# \text{ Calculo da área de abertura do receptor (m}^2\text{):} \\
 & Ar := \left(\frac{\text{evalf}(\text{Pi})}{4} \cdot Dr^2 \right); \\
 & Ar := 0.0291 \quad (35) \\
 & \# \text{ Calculo da concentração geométrica teórica:} \\
 & C_{gt} := \frac{A_a}{A_r}; \\
 & C_{gt} := 593.0541 \quad (36) \\
 & \# \text{ Calculo da concentração geométrica de projeto:} \\
 & C_g := 0.8 \cdot C_{gt}; \\
 & C_g := 474.4433 \quad (37) \\
 & \# \text{ Calculo do diâmetro da cavidade do concentrador (m):} \\
 & D_{cav} := \frac{4}{3} \cdot Dr; \\
 & D_{cav} := 0.2568 \quad (38) \\
 & \# \text{ Calculo da area da cavidade do concentrador (m}^2\text{):} \\
 & A_{cav} := \frac{\text{evalf}(\text{Pi}) \cdot D_{cav}^2}{4}; \\
 & A_{cav} := 0.0518 \quad (39) \\
 & \# \text{Rendimento do concentrador:} \\
 & \eta_c := \cos(\theta_i) \cdot \rho \cdot F_s \tau \\
 & \eta_c := 0.5505 \quad (40) \\
 & \# \text{ Calculo da temperatura teórica na cavidade do receptor:} \\
 & K_{att} := \eta_c \cdot F_d \cdot R_{ref}; \\
 & K_{att} := 0.2340 \quad (41) \\
 & \# \text{ Calculo da temperatura do receptor (K):}
 \end{aligned}$$

Figura C.2- Programa concernente ao dimensionamento geométrico e térmico do sistema híbrido estabelecido sob o ponto de projeto (Parte 6)

```

> 
$$Tr := \left( \frac{Id \cdot Cg \cdot \alpha_{abs}}{\sigma \cdot \varepsilon} \right)^{\frac{1}{4}} \cdot K_{att};$$

Tr := 568.6739
(42)
# Perdas por convecção forçada devido aos ventos:
# Angulo do receptor para o cálculo da convecção forçada devido aos ventos (radianos):
>  $\psi := 1.0472;$ 
 $\psi := 1.0472$ 
(43)
# Calculo da função F em função da inclinação do receptor:
>  $F := 0.1634 + 0.7498 \cdot \sin(\psi) + 0.5026 \cdot \sin(2 \cdot \psi) + 0.3278 \cdot \sin(3 \cdot \psi);$ 
F := 1.2480
(44)
# Calculo das perdas por convecção forçada devido aos ventos:
>  $hc_{wind} := F \cdot V^{(1.104)};$ 
hc_{wind} := 9.0219
(45)
# Determinação do número de Grashof:
# Dados auxiliares na determinação do número de Grashof:
# Aceleração da gravidade [m/s2]:
>  $g := 9.81;$ 
g := 9.8100
(46)
# Determinação do coeficiente  $\beta$ :
>  $\beta := \frac{1}{\frac{(T_a + T_r)}{2}};$ 
 $\beta := 0.0023$ 
(47)
# Viscosidade cinemática para a temperatura de 550(K):
>  $\nu := 43.9 \cdot 10^{-6};$ 
 $\nu := 0.0000$ 
(48)
# Condutividade térmica para a temperatura de 550(K):
>  $kar := 45.57 \cdot 10^{-3};$ 
kar := 0.0456
(49)
# Determinação do número de Grashof:

```

Figura C.2- Programa concernente ao dimensionamento geométrico e térmico do sistema híbrido estabelecido sob o ponto de projeto (Parte 7)

$$\begin{aligned}
 & > Gr := \frac{g \cdot \beta \cdot (Tr - Ta) \cdot Dr^3}{v^2}; \\
 & & Gr := 2.2489 \cdot 10^7 \quad (50) \\
 & \# \text{Determinação do coeficiente } S : \\
 & > S := 1.12 - 0.982 \cdot \left(\frac{Dr}{Dcav} \right); \\
 & & S := 0.3835 \quad (51) \\
 & \# \text{Determinação do número de Nusselt :} \\
 & > Nus := 0.088 \cdot Gr^{\frac{1}{3}} \cdot \left(\frac{Tr}{Ta} \right)^{0.18} \cdot \cos(\psi)^{2.47} \cdot \left(\frac{Dr}{Dcav} \right)^S; \\
 & & Nus := 4.5047 \quad (52) \\
 & \# \text{Determinação do coeficiente de convecção natural no receptor (W/m}^2 \cdot \text{K)}: \\
 & > hc_{nat} := \frac{Nus \cdot kar}{Dr}; \\
 & & hc_{nat} := 1.0660 \quad (53) \\
 & \# \text{Determinação do coeficiente global de convecção no receptor (W/m}^2 \cdot \text{K)}: \\
 & > hc := hc_{wind} + hc_{nat}; \\
 & & hc := 10.0878 \quad (54) \\
 & \# \text{Determinação do rendimento do receptor:} \\
 & > \eta_r := \left(\tau \cdot \alpha_{abs} - \left(\frac{hc \cdot (Tr - Ta) + \varepsilon \cdot \sigma \cdot (Tr^4 - Ta^4)}{\eta_c \cdot C_g \cdot Id} \right) \right); \\
 & & \eta_r := 0.7017 \quad (55) \\
 & \# \text{Determinação do rendimento do motor Stirling :} \\
 & > \eta_s := \left(1 - \left(\frac{Ta}{Tr} \right) \right) \cdot K_s; \\
 & & \eta_s := 0.2362 \quad (56) \\
 & \# \text{Determinação do rendimento global do sistema Dish Stirling:} \\
 & > \eta_g := \eta_r \cdot \eta_s \cdot \eta_c \cdot \eta_{ge}; \\
 & & \eta_g := 0.0821 \quad (57) \\
 & \# \text{Determinação da potência disponível ao sistema Dish Stirling (kW) :} \\
 & > P_{sd} := \frac{Id \cdot Aa}{1000}; \\
 & & P_{sd} := 12.6103 \quad (58)
 \end{aligned}$$

Figura C.2- Programa concernente ao dimensionamento geométrico e térmico do sistema híbrido estabelecido sob o ponto de projeto (Parte 8)

```

#Potência útil disponível ou potência elétrica gerada pelo sistema Dish Stirling (kW):
=
> Psl := ηg · Psd;
Psl := 1.0356 (59)
=
# Energia elétrica anual gerada pelo sistema Dish Stirling (MWh):
=
> Eag :=  $\frac{Psl \cdot 365 \cdot 24}{1000}$ ;
Eag := 9.0721 (60)
=
> FCS :=  $\frac{2.1985}{Eag}$ ;
FCS := 0.2423 (61)
=
> FCSt := FCS · 0.8;
FCSt := 0.1939 (62)
=
> FCSs := 0.166;
FCSs := 0.1660 (63)
=
> Eagf := Eag · FCSs;
Eagf := 1.5060 (64)
=

```

Figura C.2- Programa concernente ao dimensionamento geométrico e térmico do sistema híbrido estabelecido sob o ponto de projeto (Parte 9)

APÊNDICE D

```

# Dimensionamento de sistema de conversão de energia solar Dish-Stirling
> restart :
# Descrição das variáveis aplicadas ao programa:

# Rendimentos:
#  $\eta_g$  = Rendimento global ;
#  $\eta_c$  = Rendimento do concentrador;
#  $\eta_{ge}$  = Rendimento do gerador;
#  $\eta_r$  = Rendimento do receptor;
#  $\eta_s$  = Rendimento do motor stirling;

# Potência:
#  $P_{sd}$  = Potência solar disponível (KW);
#  $P_{sl}$  = Potência solar líquida (KW);

# Coefficientes de convecção:
#  $hc_{nat}$  = Coeficiente de convecção natural ( $W/m^2 \cdot K$ );
#  $hc_{wind}$  = Coeficiente de convecção forçada ( $W/m^2 \cdot K$ );
#  $hc$  = Coeficiente global de convecção ( $W/m^2 \cdot K$ );

# Temperaturas:
#  $T_{cav}$  = Temperatura da cavidade (K);
#  $T_a$  = Temperatura ambiente (K);
#  $T_r$  = Temperatura do receptor (K);

# Irradiância solar:
#  $I_d$  = Irradiância solar diária  $\left( \frac{W}{m^2} \right)$ ;

# Períodos:
#  $T_s$  = Período anual de geração de energia elétrica do sistema Dish-Stirling ;
#  $T_d$  = Período de irradiância solar diário local;

# Energia elétrica gerada:
#  $E$  = A energia elétrica anual gerada;

# Constantes e fatores:
#  $\sigma$  = Constante de Stefan – Boltzmann  $\left( \frac{W}{m^2 \cdot K^4} \right)$ 
#  $F_d$  = Fator de deterioração
#  $F_s$  = Fator de sombreamento
#  $R_{ref}$  = Fator de resfriamento
#  $K_s$  = Constante Stirling
#  $\epsilon$  = Emissividade
#  $\tau_{\alpha abs}$  = Transmitância – Absortância
#  $\alpha abs$  = Absortância
#  $\tau$  = Fator de interceptação
#  $\rho$  = Refletibilidade do concentrador solar

```

Figura D.1 - Programa concernente ao dimensionamento geométrico e térmico do sistema Dish-Stirling correspondente estabelecido sob o ponto de funcionamento (Parte 1)

```

# Fcs = Fator de capacidade solar

# Características geométricas do concentrador dish:
# Aa=Área de abertura do concentrador solar Dish (m2);
# φr=Ângulo da curvatura (rim angle)(radianos);
# Cg = Concentração geométrica;
# θi = Erro do sistema de rastreamento solar;
# Nlac= Número de lacunas do concentrador dish
# Llac= largura das lacunas do concentrador dish
# Hlac= altura das lacunas do concentrador dish

# Erros intrínsecos aos sistemas Dish-Stirling

# σE=Erro relativo à estrutura;
# σSR = Erro relativo ao sensor de rastreamento;
# σMR = Erro relativo aos motores de rastreamento;
# σAR= Erro relativo ao alinhamento do receptor;
# σRE = Erro relativo à reflexão do espelho;
# σS = Erro relativo à dimensão do Sol;

# Características geométricas do receptor:
# Acav =Área da cavidade do receptor (m2);
# Ar=Área do receptor (m2);
# Dr=Diâmetro do receptor (m2);

# Valores numéricos atribuídos a constantes e fatores:

# Fator de resfriamento:
> Rref := 0.50;
Rref := 0.5000 (1)

# Fator de deterioração:
> Fd := 0.85;
Fd := 0.8500 (2)

# Constante Stirling :
> Ks := 0.50;
Ks := 0.5000 (3)

# Constante de Stefan –Boltzmann:
> σ := 5.6697 · 10-8;
σ := 5.6697 10-8 (4)

# Ângulo da curvatura de 27°

```

Figura D.1 - Programa concernente ao dimensionamento geométrico e térmico do sistema Dish-Stirling correspondente estabelecido sob o ponto de funcionamento (Parte 2)

> $\varphi_r := 0.471239;$	$\varphi_r := 0.4712$	(5)
<u># Ângulo de sombreamento de 14°</u>		
> $\varphi_s := 0.244346;$	$\varphi_s := 0.2443$	(6)
<u># Absortância do absorvedor:</u>		
> $\alpha_{abs} := 0.8;$	$\alpha_{abs} := 0.8000$	(7)
<u>#Emissividade:</u>		
> $\varepsilon := 0.14;$	$\varepsilon := 0.1400$	(8)
<u># Refletibilidade do concentrador solar:</u>		
> $\rho := 0.86;$	$\rho := 0.8600$	(9)
<u>Rendimento do gerador:</u>		
> $\eta_{ge} := 0.90;$	$\eta_{ge} := 0.9000$	(10)
<u># Erro relativo à estrutura:</u>		
> $\sigma_E := 0.007;$	$\sigma_E := 0.0070$	(11)
<u># Erro relativo ao sensor de rastreamento:</u>		
> $\sigma_{SR} := 0.002;$	$\sigma_{SR} := 0.0020$	(12)
<u># Erro relativo aos motores de rastreamento:</u>		
> $\sigma_{MR} := 0.002;$	$\sigma_{MR} := 0.0020$	(13)
<u># Erro relativo ao alinhamento do receptor:</u>		
> $\sigma_{AR} := 0.002;$	$\sigma_{AR} := 0.0020$	(14)
<u># Erro relativo à reflexão do espelho:</u>		
> $\sigma_{RE} := 0.0005;$	$\sigma_{RE} := 0.0005$	(15)

Figura D.1 - Programa concernente ao dimensionamento geométrico e térmico do sistema Dish-Stirling correspondente estabelecido sob o ponto de funcionamento (Parte 3)

```

# Erro relativo à dimensão do Sol:
>  $\sigma_S := 0.0028;$ 
                                 $\sigma_S := 0.0028$                                 (16)
# Coeficiente de dispersão:
>  $\text{Lambda\_ar} := 0.6;$ 
                                 $\text{Lambda\_ar} := 0.6000$                                 (17)
# Coeficiente de turbidez
>  $\text{Beta\_ar} := 10^{-4};$ 
                                 $\text{Beta\_ar} := \frac{1}{10000}$                                 (18)
# Coeficiente de concentração
>  $\text{alfa\_ar} := 3.1;$ 
                                 $\text{alfa\_ar} := 3.1000$                                 (19)
# Massa específica do ar
>  $\text{Ro\_ar} := 1.225;$ 
                                 $\text{Ro\_ar} := 1.2250$                                 (20)
#####
# Dados de entrada do sistema Dish Stirling:
# Diâmetro do concentrador solar Dish (m):
>  $D_p := 6;$ 
                                 $D_p := 6$                                 (21)
# Temperatura ambiente (K):
>  $T_a := 300;$ 
                                 $T_a := 300$                                 (22)
# Radiação solar  $\left(\frac{W}{m^2}\right)$ :
>  $I_d := 572;$ 
                                 $I_d := 572$                                 (23)
# Velocidade do vento(m/s):
>  $V := 6;$ 
                                 $V := 6$                                 (24)
#####
# Determinação de fator aplicados ao dimensionamento térmico:

```

Figura D.1 - Programa concernente ao dimensionamento geométrico e térmico do sistema Dish-Stirling correspondente estabelecido sob o ponto de funcionamento (Parte 4)

```

# Fator do sombreamento x fator de interceptação:
> 
$$F_{sT} := \frac{(\sin(\varphi_r))^2 - (\sin(\varphi_s))^2}{4 \cdot \left(\tan\left(\frac{\varphi_r}{2}\right)\right)^2};$$

FsT := 0.6401
(25)

# Determinação dos parâmetros geométricos:

# Determinação da área de abertura (m2):
> 
$$A_a := \left(\frac{\text{evalf}(\text{Pi})}{4} \cdot D_p^2\right);$$

Aa := 28.2743
(26)

# Calculo de ponto focal(m):
> 
$$f := \frac{D_p}{4 \cdot \tan\left(\frac{\varphi_r}{2}\right)};$$

f := 6.2479
(27)

# Massa de ar estabelecida entre o receptor e o concentrador
> 
$$m_{ar} := \frac{\text{evalf}(\text{Pi}) \cdot D_p^2}{4} \cdot f \cdot Ro_{ar};$$

mar := 216.4043
(28)

# Transmitância
> 
$$\tau := \exp(-Beta_{ar} \cdot Lambda_{ar}^{-alfa_{ar}} \cdot m_{ar});$$

τ := 0.8999
(29)

# Erro do sistema de rastreamento medio diário(radianos) :
> 
$$\theta_i := \left((\sigma E)^2 + (\sigma SR)^2 + (\sigma MR)^2 + (\sigma AR)^2 + (\sigma RE)^2 + (\sigma S)^2\right)^{0.5};$$

θi := 0.0083
(30)

# Calculo do diâmetro do receptor(m):
> 
$$D_r := \frac{f^2 \cdot \theta_i}{\cos(\varphi_r) \cdot (1 + \cos(\varphi_r))};$$

Dr := 0.1926
(31)

# Calculo da área de abertura do receptor(m2):
> 
$$A_r := \left(\frac{\text{evalf}(\text{Pi})}{4} \cdot D_r^2\right);$$

Ar := 0.0291
(32)

```

Figura D.1 - Programa concernente ao dimensionamento geométrico e térmico do sistema Dish-Stirling correspondente estabelecido sob o ponto de funcionamento (Parte 5)

```

# Calculo da concentração geométrica teórica:
=
> Cgt :=  $\frac{Aa}{Ar}$ ;
                                     Cgt := 970.7008                (33)
# Calculo da concentração geométrica de projeto:
=
> Cg := 0.8 · Cgt;
                                     Cg := 776.5606                (34)
# Calculo do diâmetro da cavidade do concentrador (m):
=
> Dcav :=  $\frac{4}{3} \cdot Dr$ ;
                                     Dcav := 0.2568                (35)
# Calculo da area da cavidade do concentrador (m2):
=
> Acav :=  $\frac{\text{evalf}(\text{Pi}) \cdot Dcav^2}{4}$ ;
                                     Acav := 0.0518                (36)
#Rendimento do concentrador:
=
> ηc := cos(θ) · ρ · FsT
                                     ηc := 0.5505                (37)
# Calculo da temperatura teórica na cavidade do receptor:
=
> Katt := ηc · Fd · Rref;
                                     Katt := 0.2340                (38)
# Calculo da temperatura do receptor(K):
=
> Tr :=  $\left( \frac{Id \cdot Cg \cdot \alpha_{abs}}{\sigma \cdot \epsilon} \right)^{\frac{1}{4}} \cdot Katt$ ;
                                     Tr := 605.1727                (39)
# Perdas por convecção forçada devido aos ventos:
=
# Angulo do receptor para o cálculo da convecção forçada devido aos ventos (radianos):
=
> ψ := 1.0472;
                                     ψ := 1.0472                (40)
# Calculo da função F em função da inclinação do receptor:
=
> F := 0.1634 + 0.7498 · sin(ψ) + 0.5026 · sin(2 · ψ) + 0.3278 · sin(3 · ψ);
                                     F := 1.2480                (41)
# Calculo das perdas por convecção forçada devido aos ventos:

```

Figura D.1 - Programa concernente ao dimensionamento geométrico e térmico do sistema Dish-Stirling correspondente estabelecido sob o ponto de funcionamento (Parte 6)

```

> hc_wind := F·V(1.104);
                                     hc_wind := 9.0219
# Determinação do número de Grashof:
# Dados auxiliares na determinação do número de Grashof:
# Aceleração da gravidade [m/s2]:
> g := 9.81;
                                     g := 9.8100
# Determinação do coeficiente β:
> β :=  $\frac{1}{\frac{(T_a + T_r)}{2}}$ ;
                                     β := 0.0022
# Viscosidade cinemática para a temperatura de 600(K):
> ν := 52.69·10-6;
                                     ν := 0.0001
# Condutividade térmica para a temperatura de 600(K):
> kar := 46.9·10-3;
                                     kar := 0.0469
# Determinação do número de Grashof:
> Gr :=  $\frac{g·β·(T_r - T_a)·D_r^3}{ν^2}$ ;
                                     Gr := 1.7017 107
# Determinação do coeficiente S:
> S := 1.12 - 0.982· $\left(\frac{D_r}{D_{cav}}\right)$ ;
                                     S := 0.3835
# Determinação do número de Nusset:
> Nus := 0.088·Gr1/3· $\left(\frac{T_r}{T_a}\right)^{0.18}$ ·cos(ψ)2.47· $\left(\frac{D_r}{D_{cav}}\right)^S$ ;
                                     Nus := 4.1512
# Determinação do coeficiente de convecção natural no receptor (W/m2*K):

```

Figura D.1 - Programa concernente ao dimensionamento geométrico e térmico do sistema Dish-Stirling correspondente estabelecido sob o ponto de funcionamento (Parte 7)

$$\begin{aligned}
 & > hc_{nat} := \frac{Nus \cdot k_{ar}}{D_r}; \\
 & \hspace{15em} hc_{nat} := 1.0110 \hspace{10em} (50) \\
 & \# \text{Determinação do coeficiente global de convecção no receptor (W/m}^2\text{K)}: \\
 & > hc := hc_{wind} + hc_{nat}, \\
 & \hspace{15em} hc := 10.0328 \hspace{10em} (51) \\
 & \# \text{Determinação do rendimento do receptor:} \\
 & > \eta_r := \left(\tau \cdot \alpha_{abs} - \left(\frac{hc \cdot (T_r - T_a) + \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_r^4 - T_a^4)}{\eta_c \cdot C_g \cdot I_d} \right) \right); \\
 & \hspace{15em} \eta_r := 0.7033 \hspace{10em} (52) \\
 & \# \text{Determinação do rendimento do motor Stirling:} \\
 & > \eta_s := \left(1 - \left(\frac{T_a}{T_r} \right) \right) \cdot K_s; \\
 & \hspace{15em} \eta_s := 0.2521 \hspace{10em} (53) \\
 & \# \text{Determinação do rendimento global do sistema Dish Stirling:} \\
 & > \eta_g := \eta_r \cdot \eta_s \cdot \eta_c \cdot \eta_{ge}; \\
 & \hspace{15em} \eta_g := 0.0879 \hspace{10em} (54) \\
 & \# \text{Determinação da potência disponível ao sistema Dish Stirling (kW):} \\
 & > P_{sd} := \frac{I_d \cdot A_a}{1000}; \\
 & \hspace{15em} P_{sd} := 16.1729 \hspace{10em} (55) \\
 & \# \text{Potência útil disponível ou potência elétrica gerada pelo sistema Dish Stirling (kW):} \\
 & > P_{sl} := \eta_g \cdot P_{sd}; \\
 & \hspace{15em} P_{sl} := 1.4209 \hspace{10em} (56) \\
 & \# \text{Energia elétrica anual gerada pelo sistema Dish Stirling (MWh):} \\
 & > E_{ag} := \frac{P_{sl} \cdot 365 \cdot 8}{1000}; \\
 & \hspace{15em} E_{ag} := 4.1491 \hspace{10em} (57)
 \end{aligned}$$

Figura D.1 - Programa concernente ao dimensionamento geométrico e térmico do sistema Dish-Stirling correspondente estabelecido sob o ponto de funcionamento (Parte 8)

Dimensionamento de sistema de conversão de energia solar Dish-Stirling

> restart :

Descrição das variáveis aplicadas ao programa:

Rendimentos:

η_g = Rendimento global ;
 # η_c = Rendimento do concentrador;
 # η_{ge} = Rendimento do gerador;
 # η_r = Rendimento do receptor;
 # η_s = Rendimento do motor stirling;

Potência:

P_{sd} = Potência solar disponível (KW);
 # P_{sl} = Potência solar líquida (KW);

Coefficientes de convecção:

h_{c_nat} = Coeficiente de convecção natural ($W/m^2 \cdot K$);
 # h_{c_wind} = Coeficiente de convecção forçada ($W/m^2 \cdot K$);
 # h_c = Coeficiente global de convecção ($W/m^2 \cdot K$);

Temperaturas:

T_{cav} = Temperatura da cavidade (K);
 # T_a = Temperatura ambiente (K);
 # T_R = Temperatura do receptor (K);

Irradiância solar:

I_d = Irradiância solar diária $\left(\frac{W}{m^2} \right)$;

Períodos:

T_s = Período anual de geração de energia elétrica do sistema Dish-Stirling ;
 # T_d = Período de irradiância solar diária local;

Energia elétrica gerada:

E = A energia elétrica anual gerada;

Constantes e fatores:

σ = Constante de Stefan – Boltzmann $\left(\frac{W}{m^2 \cdot K^4} \right)$

F_d = Fator de deterioração

F_s = Fator de sombreamento

R_{ref} = Fator de resfriamento

K_s = Constante Stirling

ε = Emissividade

$\tau_{\alpha abs}$ = Transmitância – Absortância

αabs = Absortância

τ = Fator de interceptação

ρ = Refletibilidade do concentrador solar

Figura D.2 - Programa concernente ao dimensionamento geométrico e térmico do sistema Dish-Stirling correspondente estabelecido sob o ponto de projeto (Parte 1)

```

# Fcs = Fator de capacidade solar

# Características geométricas do concentrador dish:
# Aa=Área de abertura do concentrador solar Dish (m2);
# φr=Ângulo da curvatura (rim angle)(radianos);
# Cg = Concentração geométrica;
# θi = Erro do sistema de rastreamento solar;
# Nlac= Número de lacunas do concentrador dish
# Llac= largura das lacunas do concentrador dish
# Hlac= altura das lacunas do concentrador dish

# Erros intrínsecos aos sistemas Dish-Stirling

# σE=Erro relativo à estrutura;
# σSR = Erro relativo ao sensor de rastreamento;
# σMR = Erro relativo aos motores de rastreamento;
# σAR= Erro relativo ao alinhamento do receptor;
# σRE = Erro relativo à reflexão do espelho;
# σS = Erro relativo à dimensão do Sol;

# Características geométricas do receptor:
# Acav =Área da cavidade do receptor (m2);
# Ar=Área do receptor (m2);
# Dr=Diâmetro do receptor (m2);

# Valores numéricos atribuídos a constantes e fatores:

# Fator de resfriamento:
> Rref := 0.50;
Rref:= 0.5000 (1)

# Fator de deterioração:
> Fd := 0.85;
Fd:= 0.8500 (2)

# Constante Stirling :
> Ks := 0.50;
Ks := 0.5000 (3)

# Constante de Stefan –Boltzmann:
> σ := 5.6697 · 10-8;
σ := 5.6697 10-8 (4)

# Ângulo da curvatura de 27°

```

Figura D.2 - Programa concernente ao dimensionamento geométrico e térmico do sistema Dish-Stirling correspondente estabelecido sob o ponto de projeto (Parte 2)

> $\varphi_r := 0.471239;$	$\varphi_r := 0.4712$	(5)
<u># Ângulo de sombreamento de 14°</u>		
> $\varphi_s := 0.244346;$	$\varphi_s := 0.2443$	(6)
<u># Absortância do absorvedor:</u>		
> $\alpha_{abs} := 0.8;$	$\alpha_{abs} := 0.8000$	(7)
<u># Emissividade:</u>		
> $\varepsilon := 0.14;$	$\varepsilon := 0.1400$	(8)
<u># Refletibilidade do concentrador solar:</u>		
> $\rho := 0.86;$	$\rho := 0.8600$	(9)
<u>Rendimento do gerador:</u>		
> $\eta_{ge} := 0.90;$	$\eta_{ge} := 0.9000$	(10)
<u># Erro relativo à estrutura:</u>		
> $\sigma_E := 0.007;$	$\sigma_E := 0.0070$	(11)
<u># Erro relativo ao sensor de rastreamento:</u>		
> $\sigma_{SR} := 0.002;$	$\sigma_{SR} := 0.0020$	(12)
<u># Erro relativo aos motores de rastreamento:</u>		
> $\sigma_{MR} := 0.002;$	$\sigma_{MR} := 0.0020$	(13)
<u># Erro relativo ao alinhamento do receptor:</u>		
> $\sigma_{AR} := 0.002;$	$\sigma_{AR} := 0.0020$	(14)
<u># Erro relativo à reflexão do espelho:</u>		
> $\sigma_{RE} := 0.0005;$	$\sigma_{RE} := 0.0005$	(15)

Figura D.2 - Programa concernente ao dimensionamento geométrico e térmico do sistema Dish-Stirling correspondente estabelecido sob o ponto de projeto (Parte 3)

```

# Erro relativo à dimensão do Sol:
>  $\sigma_S := 0.0028;$ 
 $\sigma_S := 0.0028$  (16)

# Coeficiente de dispersão:
>  $\lambda_{ar} := 0.6;$ 
 $\lambda_{ar} := 0.6000$  (17)

# Coeficiente de turbidez
>  $\beta_{ar} := 10^{-4};$ 
 $\beta_{ar} := \frac{1}{10000}$  (18)

# Coeficiente de concentração
>  $\alpha_{ar} := 3.1;$ 
 $\alpha_{ar} := 3.1000$  (19)

# Massa específica do ar
>  $\rho_{ar} := 1.225;$ 
 $\rho_{ar} := 1.2250$  (20)
#####
# Dados de entrada do sistema Dish Stirling:
# Diâmetro do concentrador solar Dish (m):
>  $D_p := 6;$ 
 $D_p := 6$  (21)

# Temperatura ambiente (K):
>  $T_a := 300;$ 
 $T_a := 300$  (22)

# Radiação solar  $\left(\frac{W}{m^2}\right)$ :
>  $I_d := 730;$ 
 $I_d := 730$  (23)

# Velocidade do vento(m/s):
>  $V := 6;$ 
 $V := 6$  (24)
#####
# Determinação de fator aplicados ao dimensionamento térmico:

```

Figura D.2 - Programa concernente ao dimensionamento geométrico e térmico do sistema Dish-Stirling correspondente estabelecido sob o ponto de projeto (Parte 4)

```

# Fator do sombreamento x fator de interceptação:
> 
$$F_{sT} := \frac{(\sin(\varphi_r))^2 - (\sin(\varphi_s))^2}{4 \cdot \left(\tan\left(\frac{\varphi_r}{2}\right)\right)^2};$$

FsT := 0.6401
(25)

# Determinação dos parâmetros geométricos:

# Determinação da área de abertura (m2):
> 
$$A_a := \left(\frac{\text{evalf}(\text{Pi})}{4} \cdot D_p^2\right);$$

Aa := 28.2743
(26)

# Calculo de ponto focal(m):
> 
$$f := \frac{D_p}{4 \cdot \tan\left(\frac{\varphi_r}{2}\right)};$$

f := 6.2479
(27)

# Massa de ar estabelecida entre o receptor e o concentrador
> 
$$m_{ar} := \frac{\text{evalf}(\text{Pi}) \cdot D_p^2}{4} \cdot f \cdot Ro_{ar};$$

mar := 216.4043
(28)

# Transmitância
> 
$$\tau := \exp(-Beta_{ar} \cdot Lambda_{ar}^{-\alpha_{ar}} \cdot m_{ar});$$

τ := 0.8999
(29)

# Erro do sistema de rastreamento medio diário(radianos) :
> 
$$\theta_i := \left( (\sigma_E)^2 + (\sigma_{SR})^2 + (\sigma_{MR})^2 + (\sigma_{AR})^2 + (\sigma_{RE})^2 + (\sigma_S)^2 \right)^{0.5};$$

θi := 0.0083
(30)

# Calculo do diâmetro do receptor(m):
> 
$$D_r := \frac{f^2 \cdot \theta_i}{\cos(\varphi_r) \cdot (1 + \cos(\varphi_r))};$$

Dr := 0.1926
(31)

# Calculo da área de abertura do receptor(m2):
> 
$$A_r := \left(\frac{\text{evalf}(\text{Pi})}{4} \cdot D_r^2\right);$$

Ar := 0.0291
(32)

```

Figura D.2 - Programa concernente ao dimensionamento geométrico e térmico do sistema Dish-Stirling correspondente estabelecido sob o ponto de projeto (Parte 5)

```

# Calculo da concentração geométrica teórica:
=
> Cgt :=  $\frac{Aa}{Ar}$ ;
                                     Cgt := 970.7008
                                     (33)
# Calculo da concentração geométrica de projeto:
=
> Cg := 0.8 · Cgt;
                                     Cg := 776.5606
                                     (34)
# Calculo do diâmetro da cavidade do concentrador (m):
=
> Dcav :=  $\frac{4}{3} \cdot Dr$ ;
                                     Dcav := 0.2568
                                     (35)
# Calculo da area da cavidade do concentrador (m2):
=
> Acav :=  $\frac{\text{evalf}(Pi) \cdot Dcav^2}{4}$ ;
                                     Acav := 0.0518
                                     (36)
#Rendimento do concentrador:
=
> ηc := cos(θ) · ρ · FsT
                                     ηc := 0.5505
                                     (37)
# Calculo da temperatura teórica na cavidade do receptor:
=
> Katt := ηc · Fd · Rref.
                                     Katt := 0.2340
                                     (38)
# Calculo da temperatura do receptor(K):
=
> Tr :=  $\left( \frac{Id \cdot Cg \cdot \alpha_{abs}}{\sigma \cdot \varepsilon} \right)^{\frac{1}{4}} \cdot Katt$ ;
                                     Tr := 643.2223
                                     (39)
# Perdas por convecção forçada devido aos ventos:
=
# Angulo do receptor para o cálculo da convecção forçada devido aos ventos (radianos):
=
> ψ := 1.0472;
                                     ψ := 1.0472
                                     (40)
# Calculo da função F em função da inclinação do receptor:
=
> F := 0.1634 + 0.7498 · sin(ψ) + 0.5026 · sin(2 · ψ) + 0.3278 · sin(3 · ψ);
                                     F := 1.2480
                                     (41)
# Calculo das perdas por convecção forçada devido aos ventos:

```

Figura D.2 - Programa concernente ao dimensionamento geométrico e térmico do sistema Dish-Stirling correspondente estabelecido sob o ponto de projeto (Parte 6)

```

> hc_wind := F·V(1.104);
                                     hc_wind := 9.0219
# Determinação do número de Grashof:
# Dados auxiliares na determinação do número de Grashof:
# Aceleração da gravidade [m/s2]:
> g := 9.81;
                                     g := 9.8100
# Determinação do coeficiente β:
> β :=  $\frac{1}{(T_a + T_r)}$ ;
                                     β := 0.0021
# Viscosidade cinemática para a temperatura de 650(K):
> ν := 60.21 · 10-6;
                                     ν := 0.0001
# Condutividade térmica para a temperatura de 650(K):
> kar := 49.7 · 10-3;
                                     kar := 0.0497
# Determinação do número de Grashof:
> Gr :=  $\frac{g \cdot \beta \cdot (T_r - T_a) \cdot Dr^3}{\nu^2}$ ;
                                     Gr := 1.4065 107
# Determinação do coeficiente S:
> S := 1.12 - 0.982 ·  $\left(\frac{Dr}{Dcav}\right)$ ;
                                     S := 0.3835
# Determinação do número de Nusset:
> Nus := 0.088 · Gr1/3 ·  $\left(\frac{T_r}{T_a}\right)^{0.18}$  · cos(ψ)2.47 ·  $\left(\frac{Dr}{Dcav}\right)^S$ ;
                                     Nus := 3.9388
# Determinação do coeficiente de convecção natural no receptor (W/m2·K):

```

Figura D.2 - Programa concernente ao dimensionamento geométrico e térmico do sistema Dish-Stirling correspondente estabelecido sob o ponto de projeto (Parte 7)

$$\begin{aligned} > hc_{nat} := \frac{Nus \cdot kar}{Dr}; \\ & hc_{nat} := 1.0165 \end{aligned} \quad (50)$$

Determinação do coeficiente global de convecção no receptor (W/m²K):

$$\begin{aligned} > hc := hc_{wind} + hc_{nat}; \\ & hc := 10.0384 \end{aligned} \quad (51)$$

Determinação do rendimento do receptor:

$$\begin{aligned} > \eta_r := \left(\tau \cdot \alpha_{abs} - \left(\frac{hc \cdot (Tr - Ta) + \varepsilon \cdot \sigma \cdot (Tr^4 - Ta^4)}{\eta_c \cdot C_g \cdot Id} \right) \right); \\ & \eta_r := 0.7048 \end{aligned} \quad (52)$$

Determinação do rendimento do motor Stirling :

$$\begin{aligned} > \eta_s := \left(1 - \left(\frac{Ta}{Tr} \right) \right) \cdot K_s; \\ & \eta_s := 0.2668 \end{aligned} \quad (53)$$

Determinação do rendimento global do sistema Dish Stirling:

$$\begin{aligned} > \eta_g := \eta_r \cdot \eta_s \cdot \eta_c \cdot \eta_{ge}; \\ & \eta_g := 0.0932 \end{aligned} \quad (54)$$

Determinação da potência disponível ao sistema Dish Stirling (kW) :

$$\begin{aligned} > P_{sd} := \frac{Id \cdot A_a}{1000}; \\ & P_{sd} := 20.6403 \end{aligned} \quad (55)$$

Potência útil disponível ou potência elétrica gerada pelo sistema Dish Stirling (kW):

$$\begin{aligned} > P_{sl} := \eta_g \cdot P_{sd}; \\ & P_{sl} := 1.9228 \end{aligned} \quad (56)$$

Energia elétrica anual gerada pelo sistema Dish Stirling (MWh):

$$\begin{aligned} > E_{ag} := \frac{P_{sl} \cdot 365 \cdot 24}{1000}; \\ & E_{ag} := 16.8435 \end{aligned} \quad (57)$$

$$\begin{aligned} > FCS := \frac{4.1491}{E_{ag}}; \\ & FCS := 0.2463 \end{aligned} \quad (58)$$

$$\begin{aligned} > FCS_t := FCS \cdot 0.8; \\ & FCS_t := 0.1971 \end{aligned} \quad (59)$$

$$\begin{aligned} > FCS_s := 0.166; \\ & FCS_s := 0.1660 \end{aligned} \quad (60)$$

$$\begin{aligned} > E_{agf} := E_{ag} \cdot FCS_s; \\ & E_{agf} := 2.7960 \end{aligned} \quad (61)$$

Figura D.2 - Programa concernente ao dimensionamento geométrico e térmico do sistema Dish-Stirling correspondente estabelecido sob o ponto de projeto (Parte 8)

APÊNDICE E

Projeto do rotor de turbinas eólicas horizontais aplicando perfis aerodinâmicos.

```

> restart :
*****
***
***** Declaração das constantes aplicadas ao programa *****
***
*****
***
# Massa específica do ar [Kg/m^3]:
> rho := 1.24;
                                     rho := 1.2400                (1)
# Viscosidade absoluta do ar [Pa*s]:
> mu := evalf(18.2*10^-6);
                                     mu := 0.0000                (2)
# Aceleração da gravidade "g" [ ]:
> g := 9.81;
                                     g := 9.8100                (3)
*****
***
***** Dados de entrada do programa *****
***
*****
# Velocidade do ar (corrente livre, vento) [m/s]:
> v := 6;
                                     v := 6                    (4)
# Diâmetro externo compreendido pela dimensão estabelecida entre as pontas da pá [m]:
> d := 6;
                                     d := 6                    (5)
# Diâmetro interno compreendido pela dimensão estabelecida entre as bases da pá [m]:
> db := 2;
                                     db := 2                    (6)
# Número de pás do rotor eólico - projeto [ ]:
> b := 40;
                                     b := 40                    (7)
# Número de pás do rotor eólico - real [ ]:

```

Figura E.1 - Programa concernente ao projeto eólico do sistema híbrido (Parte 1)

```

> br := 20;
                                     br := 20                                (8)
# Número de elementos de pá (BEM) [ ]:
> M := 10
                                     M := 10                                (9)
# Razão de velocidades na ponta da pá [ ]:
> lambda[p] := 1.04;
                                     λp := 1.0400                            (10)
# Largura das lacunas do concentrador dish(m)
> Llac := 0.275;
                                     Llac := 0.2750                            (11)
# Altura das lacunas do concentrador dish(m)
> Hlac := 2;
                                     Hlac := 2                                (12)
# Fator de estrangulamento:
> Fe := 0.9;
                                     Fe := 0.9000                            (13)
*****
***
***** Velocidade angular do rotor da turbina [rpm] *****
***
*****
# Velocidade angular do concentrador híbrido dish [rad/s]:
> Omega :=  $\frac{2 \cdot \text{lambda}[p] \cdot v}{d}$ ;
                                     Ω := 2.0800                            (14)
# Velocidade angular do concentrador híbrido dish[rpm]:
> n := round( $\frac{60 \cdot \Omega}{2 \cdot \text{evalf}(\text{Pi})}$ );
                                     n := 20                                (15)
*****
***
***** Dado de entrada do perfil aerodinâmico *****
***
*****
# Número de Reynolds [ ]:

```

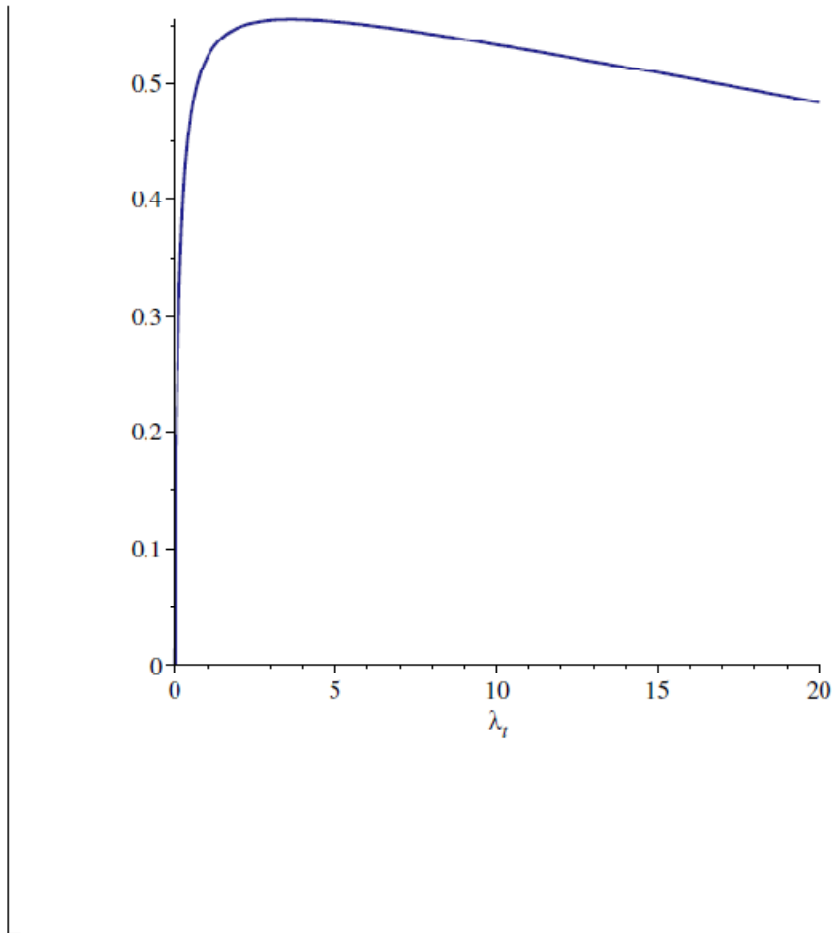
Figura E.1 - Programa concernente ao projeto eólico do sistema híbrido (Parte 2)

```

> Rey :=  $\frac{\rho \cdot v \cdot d}{\mu}$ ;
Rey := 2.4527 106 (16)
*****
*****
***** Dados de saída do perfil aerodinâmico *****
*****
# Coeficiente de arrasto [ ]:
> Cd := 0.00905
Cd := 0.0091 (17)
# Coeficiente de sustentação [ ]:
> Cl := 0.9873;
Cl := 0.9873 (18)
# Ângulo de ataque [ ° ]:
> α := 4.75;
α := 4.7500 (19)
# Relação coeficiente de sustentação/arrasto [ ]:
> Cld :=  $\frac{Cl}{Cd}$ ;
Cld := 109.0939 (20)
*****
*****
***** Projeto do rotor eólico *****
*****
# Coeficiente de potência máxima [ ]:
> plot  $\left( \text{evalf} \left( \left( \left( \frac{16}{27} \right) \cdot \lambda_t \cdot \left( \lambda_t + \frac{1.32 + \left( \frac{\lambda_t}{20} \right)^2}{b^{\frac{2}{3}}} \right)^{-1} \right) - \frac{0.57 \cdot (\lambda_t)^2}{Cld \cdot \left( \lambda_t + \frac{1}{2 \cdot b} \right)} \right), \lambda_t = 0 .. 20, \right.$ 
color = navy ;

```

Figura E.1 - Programa concernente ao projeto eólico do sistema híbrido (Parte 3)



```

*****
***
***** Cálculo do fator de indução axial a *****
***
*****
***
# Coeficiente de potência máxima [ ]:
> Cpmax := evalf  $\left[ \left( \left( \frac{16}{27} \right) \cdot \lambda_p \cdot \left( \lambda_p + \frac{1.32 + \left( \frac{\lambda_p - 8}{20} \right)^2}{b^{\frac{2}{3}}} \right)^{-1} \right) - \frac{0.57 \cdot (\lambda_p)^2}{\frac{Cl}{Cd} \cdot \left( \lambda_p + \frac{1}{2 \cdot b} \right)} \right];$ 
Cpmax:= 0.5245 (21)
# Fator de indução axial "a" [ ]:
> solve(Cpmax = 4 * a * (1 - a)^2, a);
0.2102, 0.4741, 1.3157 (22)

```

Figura E.1 - Programa concernente ao projeto eólico do sistema híbrido (Parte 4)

```

*****
***
***** Verificação do fator de indução axial a *****
***
*****
***
# Fator de indução axial "a" [ ]:
> a := 0.2102;
a := 0.2102 (23)
# Coeficiente de potência teórico [ ]:
> Cp := evalf(4·a·(1 - a)2);
Cp := 0.5245 (24)
# Velocidade axial corrigida no rotor[m/s]:
> vc := v·(1 - a);
vc := 4.7388 (25)

*****
***
***** Verificação da velocidade angular do rotor da turbina [rpm] *****
***
*****
***
# Altura de energia [m]:
> H :=  $\frac{vc^2}{2 \cdot g}$ ;
H := 1.1446 (26)
# Energia específica[J/kg]:
> Y := H·g;
Y := 11.2281 (27)
# Área projetada livre[m]:
> APL := br·Llac·Hlac;
APL := 11.0000 (28)
# Vazão real que atravessa o concentrador híbrido dish[m3/kg]:
> Q := vc·Fe·( APL);
Q := 46.9141 (29)
# diâmetro da base corrigido pela vazão[m3/kg]:
> db_corr := sqrt( $d^2 - \frac{4 \cdot Q}{vc \cdot evalf(Pi)}$ );

```

Figura E.1 - Programa concernente ao projeto eólico do sistema híbrido (Parte 5)

```

|
|                                     db_corr := 4.8368                               (30)
| # Razão de cubo corrigida pela vazão [m^3/kg]:
|
| > rc_corr :=  $\frac{db\_corr}{d}$ ;
|                                     rc_corr := 0.8061                               (31)
| # Valor de psi[ ]
|
| > psi :=  $\frac{2 \cdot Y}{\left(\frac{d}{2} \cdot \Omega\right)^2}$ ;
|                                      $\psi := 0.5767$                                (32)
| # Valor do eixo y do diagrama[ ]
|
| > psid := 10 \cdot (psi)^{0.5};
|                                     psid := 7.5942                               (33)
|
| # Determinando o nqa [ ]:
|
| > nqa :=  $\frac{n}{60} \cdot \frac{Q^{0.5}}{Y^{0.75}} \cdot 1000$ ;
|                                     nqa := 372.2206                               (34)
| # Coeficiente de diâmetro[ ]:
|
| > delta := 1.054 \cdot  $\frac{Y^{0.25}}{Q^{0.5}} \cdot d$ ;
|                                      $\delta := 1.6901$                                (35)
| # Coeficiente de ligeireza[ ]:
|
| > gamma1 := 2.108 \cdot  $\frac{Q^{0.5}}{Y^{0.75}} \cdot \frac{n}{60}$ ;
|                                      $\gamma1 := 0.7846$                                (36)
|
| *****
| ***
| ***** Cálculos preliminares *****
| ***
| *****
|
| # Posição radial adimensional (Ki)
|
| # Raio da pá [m]:
|
| > R :=  $\frac{d}{2}$ ;

```

Figura E.1 - Programa concernente ao projeto eólico do sistema híbrido (Parte 6)


```

do
    at2[i] :=  $\left( \frac{a \cdot (1 - a)}{(\lambda[M])^2} \right)$ ;
:od:
# Velocidades relativa W [m /s]:
> for i from 0 to M
do
    W[i] := sqrt( $(v \cdot (1 - a))^2 + (r[i] \cdot \Omega \cdot (1 + at[i]))^2$ );
:od:
# Ângulos de fluxo [ ° ]:
> for i from 0 to M
do
     $\Phi[i] := \left( \arctan \left( \left( \frac{(1 - a)}{\lambda[M] \cdot \left( \frac{r[i]}{R} \right) \cdot (1 + at[i])} \right) \right) \right) \cdot \left( \frac{180}{\text{evalf}(\text{Pi})} \right)$ ;
:od:
# Ângulos de montagem ou torção da pá [ ° ]:
> for i from 0 to M
do
     $\beta[i] := \Phi[i] - \alpha$ ; :od:
# Cordas nas seções da pá [ m ]
> for i from 0 to M
do
    C1[i]
:=  $\frac{8 \cdot \text{evalf}(\text{Pi}) \cdot at[i] \cdot (1 - a) \cdot \left( \frac{r[i]}{R} \right)^2 \cdot R \cdot v^2 \cdot \lambda[M]}{b \cdot (W[i])^2 \cdot \left( Cl \cdot \sin \left( \Phi[i] \cdot \left( \frac{\text{cvalf}(\text{Pi})}{180} \right) \right) + Cd \cdot \cos \left( \Phi[i] \cdot \left( \frac{\text{cvalf}(\text{Pi})}{180} \right) \right) \right)}$ ;
:od:
# Impressão dos resultados:
> for i from 0 to M
do
    date[i + 1] := [ i, r[i], at[i], at2[i], ki[i], lambda[i], W[i],  $\Phi[i]$ ,  $\beta[i]$ ,
    C1[i] ];
:od:
> date[0] := [ BEM, r, at, at1, mi, lambda, W,  $\Phi$ ,  $\beta$ , C1 ] :

```

Figura E.1 - Programa concernente ao projeto eólico do sistema híbrido (Parte 8)

```

> date := [date[z]$z=0 .. M + 1]:
> Resultado := array(date);

Resultado :=

```

BEM	r	at	atl	mi	λ	W	Φ	β	CI
[0]	1.0000	1.3814	1.3814	0.3333	0.3467	6.8551	43.7319	38.9819	0.2642
[1]	1.2000	0.9593	0.9593	0.4000	0.4160	6.8098	44.0977	39.3477	0.2660
[2]	1.4000	0.7048	0.7048	0.4667	0.4853	6.8630	43.6681	38.9181	0.2639
[3]	1.6000	0.5396	0.5396	0.5333	0.5547	6.9793	42.7643	38.0143	0.2594
[4]	1.8000	0.4264	0.4264	0.6000	0.6240	7.1397	41.5847	36.8347	0.2535
[5]	2.0000	0.3454	0.3454	0.6667	0.6933	7.3334	40.2551	35.5051	0.2467
[6]	2.2000	0.2854	0.2854	0.7333	0.7627	7.5535	38.8561	34.1061	0.2394
[7]	2.4000	0.2398	0.2398	0.8000	0.8320	7.7950	37.4396	32.6896	0.2318
[8]	2.6000	0.2044	0.2044	0.8667	0.9013	8.0546	36.0387	31.2887	0.2242
[9]	2.8000	0.1762	0.1762	0.9333	0.9707	8.3296	34.6745	29.9245	0.2167
[10]	3.0000	0.1535	0.1535	1.0000	1.0400	8.6177	33.3597	28.6097	0.2093

```

(39)

*****
***
***** Solidez do concentrador híbrid dish*****
***
*****
***

# Número de elementos de pá (BEM) [ ]:

> M := 5000;
M := 5000
(40)

# Incremento no diâmetro a cada elemento de pá [m]:

> di := evalf( (d - db) / M );
di := 0.0008
(41)

# Raio a cada elemento de pá [m]:

> for i from 0 to M
do
r[i] := evalf( (db + i·di) / 2 );

```

Figura E.1 - Programa concernente ao projeto eólico do sistema híbrido (Parte 9)

```

:od:
# Relação i [ m ]:
> for i from 0 to M
do

$$ki[i] := \left( \frac{r[i]}{R} \right);$$

:od:
# Razões de velocidade da ponta da pá [ ]:
> for i from 0 to M
do

$$\text{lambda}[i] := \frac{\Omega \cdot r[i]}{v};$$

:od:
# Fatores de indução tangencial at [ ]:
> for i from 0 to M
do

$$at[i] := \frac{a \cdot (1 - a)}{\lambda[M]^2 \cdot \left( \frac{r[i]}{R} \right)^2};$$

:od:
# Velocidades relativa W [m/s]:
> for i from 0 to M
do

$$W[i] := \text{sqrt} \left( (v \cdot (1 - a))^2 + ((r[i]) \cdot \Omega \cdot (1 + at[i]))^2 \right);$$

:od:
# Ângulos de fluxo [ ° ]:
> for i from 0 to M
do

$$\Phi[i] := \left( \arctan \left( \left( \frac{(1 - a)}{\lambda[M] \cdot \left( \frac{r[i]}{R} \right) \cdot (1 + at[i])} \right) \right) \right) \cdot \left( \frac{180}{\text{evalf}(\text{Pi})} \right);$$

:od:
# Ângulos de montagem ou torção da pá [ ° ]:
> for i from 0 to M
do

$$\beta[i] := \Phi[i] - \alpha; \text{:od:}$$


```

Figura E.1 - Programa concernente ao projeto eólico do sistema híbrido (Parte 10)

```

# Cordas nas seções da pá [ m ]
> for i from 0 to M
  do
      C1[i]
      := 
$$\frac{8 \cdot \text{evalf}(\text{Pi}) \cdot a t[i] \cdot (1 - a) \cdot \left(\frac{r[i]}{R}\right)^2 \cdot R \cdot v c^2 \cdot \lambda[M]}{b \cdot (W[i])^2 \cdot \left( C l \cdot \sin\left(\Phi[i] \cdot \left(\frac{\text{evalf}(\text{Pi})}{180}\right)\right) + C d \cdot \cos\left(\Phi[i] \cdot \left(\frac{\text{evalf}(\text{Pi})}{180}\right)\right) \right)}$$
;
  :od:
# Determinação da solidez do elemento de pá [ ]:
> for i from 0 to M
  do
      sigma[i] := 
$$\frac{b r \cdot C1[i] + (2 \cdot \text{evalf}(\text{Pi}) \cdot (r[i] - 1))}{2 \cdot \text{evalf}(\text{Pi}) \cdot r[i]}$$
; :od:
# Determinação da solidez da pá [ ]:
> sigma[-1] := 0:
> for i from 0 to M
  do
      sigma[i] := sigma[i-1] + sigma[i];
  :od:
> sigma[M] := 
$$\frac{\text{sigma}[M]}{M}$$
;

      sigma_5000 := 0.7227 (42)
>

```

Figura E.1 - Programa concernente ao projeto eólico do sistema híbrido (Parte 11)

APÊNDICE F

Moments - Moment Center (0 0 1) Moment Axis (0 0 1)			
	Moments (n-m)		
Zone	Pressure	Viscous	Total
wall-rotating_body	14.275726	-0.88507712	13.390649

Net	14.275726	-0.88507712	13.390649

Figura F.1 - Torque desenvolvido pelo concentrador híbrido dish

APÊNDICE G

Determinação do Torque, potências, grandeza adimensional e energia gerada concernente ao concentrador híbrido dish

```

> restart :
*****
***** Dados de entrada do programa *****
*****
# Velocidade do ar (corrente livre) (m/s):
> v := 6;
v := 6 (1)
# Diâmetro externo da turbina eólica - entre pontas da pá (m):
> d := 6;
d := 6 (2)
# Diâmetro interno da turbina eólica - base da pá ou cubo (m):
> db := 2;
db := 2 (3)
# Velocidade angular do rotor da turbina (rpm):
> n := 20;
n := 20 (4)
# Torque intrínseco ao elemento periódico (N m):
> TEP := 13.4;
TEP := 13.4000 (5)
# Número de elementos periódicos:
> Nel := 20;
Nel := 20 (6)
# Fator de capacidade eólico:
> Fce := 0.403;
Fce := 0.4030 (7)
# Fator de capacidade solar teórico:
> FCSt := 0.2459;
FCSt := 0.2459 (8)
# Fator de capacidade solar médio anual
> FCSm := 0.166;
FCSm := 0.1660 (9)
# Período diário disponível ao sistema de conversão de energia eólica:

```

Figura G.1 - Programa aplicado à determinação do torque, potências, grandezas adimensionais e energia anual concernente a conversão de energia eólica no concentrador híbrido dish (Parte 1)

```

> Td := 24 - (  $\frac{FCSm}{FCSr} \cdot 8$  );
                                     Td := 18.6000                                (10)
*****
***** Declaração das constantes aplicadas ao programa *****
*****
# Massa específica do ar (Kg/m^3):
> rho := 1.24;
                                     ρ := 1.2400                                (11)
# Rendimento do gerador:
> ηge := 0.90;
                                     ηge := 0.9000                                (12)
*****
***** Declaração das constantes aplicadas ao programa *****
*****
# Período anual disponível ao funcionamento do sistema de conversão de energia eólica(horas):
> Te := 365 · Td,
                                     Te := 6789.0000                                (13)
# Torque concernente ao concentrador híbrid dish (T) :
> T := TEP · Net,
                                     T := 268.0000                                (14)
# Velocidade angular do rotor da turbina (rad/s):
> Omega :=  $\frac{n \cdot 2 \cdot \text{evalf}(\text{Pi})}{60}$ ;
                                     Ω := 2.0950                                (15)
# Potência do rotor (kW):
> Potf :=  $\frac{T \cdot \text{Omega}}{1000}$ ;
                                     Potf := 0.5615                                (16)
# Determinação da potência disponível ao sistema Dish Stirling (kW) :
> Psd :=  $\frac{0.5 \cdot v^3 \cdot \rho \cdot \text{evalf}(\text{Pi}) \cdot \left( \frac{d^2 - db^2}{4} \right)}{1000}$ ;
                                     Psd := 3.3660                                (17)
# Coefficiente de potência do rotor real otimizado:

```

Figura G.1 - Programa aplicado à determinação do torque, potências, grandezas adimensionais e energia anual concernente a conversão de energia eólica no concentrador híbrido dish (Parte 2)

$$\begin{aligned}
 & > C_{pf} = \frac{Pot_f}{P_{sd}}; && C_{pf} = 0.1668 && (18) \\
 & \# \text{Potência útil disponível ou potência elétrica gerada pela conversão de energia eólica (kW):} \\
 & > P_{sl} := \eta_{ge} \cdot Pot_f; && P_{sl} := 0.5054 && (19) \\
 & \# \text{Energia elétrica anual gerada pela conversão de energia eólica no concentrador híbrido dish (MWh):} \\
 & > E_{ag} := \frac{P_{sl} \cdot T_e \cdot F_{ce}}{1000}; && E_{ag} := 1.3830 && (20)
 \end{aligned}$$

Figura G.1 - Programa aplicado à determinação do torque, potências, grandezas adimensionais e energia anual concernente a conversão de energia eólica no concentrador híbrido dish (Parte 3)