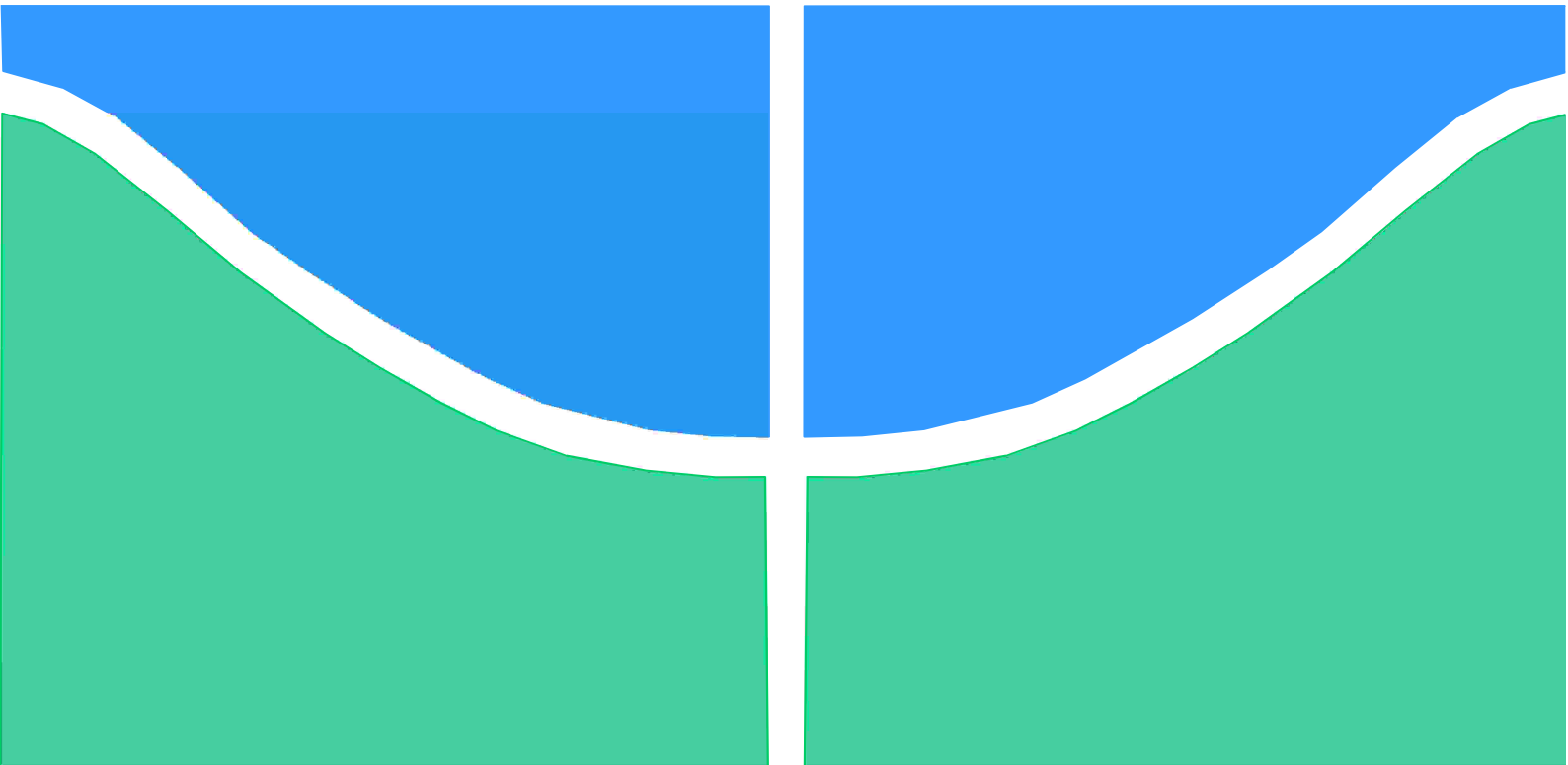




PROJETO DE GRADUAÇÃO

**EM BUSCA DA QUEBRA DO RECORDE
DE VELOCIDADE URBANA EM UMA
BICICLETA DUPLA (TANDEM)**

Por,
Henrique Benfica Leite

Brasília, 23 de Novembro de 2017

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
Faculdade de Tecnologia
Departamento de Engenharia Mecânica

PROJETO DE GRADUAÇÃO

**EM BUSCA DA QUEBRA DO RECORDE
DE VELOCIDADE URBANA EM UMA
BICICLETA DUPLA (TANDEM)**

Por,
Henrique Benfica Leite

Relatório submetido como requisito parcial para obtenção
do grau de Engenheiro Mecânico.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Luis Felipe de Aguilar Paulinyi
(ENM-UnB)(Orientador)

Prof. Tiago Guedes Russomano
(FEF-UnB)(Co-orientador)

Prof. Bráulio Gutierrez Pimenta
(ENM-UnB)(Examinador Interno)

Brasília-DF, 23 Novembro de 2017.

RESUMO

No presente trabalho desenvolveu-se uma rotina de cálculo utilizando o software MATLAB na tentativa de modelar o cenário em que dois atletas (Weimar Pettengill e Adauto Belli) em uma bicicleta tandem (dupla) buscam atingir uma máxima velocidade urbana, suficiente para a quebra do recorde mundial, em um percurso pré-definido. A esta rotina foi implementado um código de algoritmo genético visando obter o fornecimento ideal de potência pelos atletas ao longo da descida.

O estudo foi desenvolvido a partir das análises de energia que envolvem o problema, como energia devido ao arrasto, energia cinética, energia potencial, energia dissipada devido ao atrito. Considerou-se dois atletas amadores, com vários anos de treinamento, o que permite considerá-los como atletas de primeira classe. Para o fornecimento de energia foi feita a hipótese de que toda a energia disponível no músculo, energia de fonte anaeróbica, seria consumida sem que houvesse reposição da mesma.

Como resultado desse estudo, confirmou-se a grande influência da energia de arrasto e potencial no ciclismo. Além disso, notou-se, a partir de um estudo comparativo, o quão sensível a análise é para a mudança da área frontal dos ciclistas, o que coloca este parâmetro como essencial no estudo do ciclismo e como objeto de otimização para o desenvolvimento no esporte. A partir do resultado da otimização, em condições ideais, aplicando-se as potências especificadas como resultado do algoritmo genético, é possível atingir cerca de $123,55 km/h$. Nota-se, ainda, a necessidade, de estudos mais aprofundados na área da fisiologia humana, a fim de um melhor entendimento do consumo energético e fornecimento de potência dos ciclistas.

Palavras-chave: Matlab, Recorde Mundial, Guinness, Bicicleta, Aerodinâmica, Fisiologia Humana, Otimização, Algoritmo Genético

ABSTRACT

In the present work, a calculation routine was developed using the MATLAB software in the attempt to model the scenario where two athletes (Weimar Pettengill e Adauto Belli) in a tandem bicycle look forward to reach the maximum possible urban speed, enough to break the world record, in a specific course. A Genetic Algorithm was implemented in this routine in order to obtain the ideal power supply by the athletes along the descent.

The study was developed from the energy analyzes that involve the problem, such as energy due to drag, kinetic energy, potential energy, energy dissipated due to friction. Two amateur athletes were considered, with several years of training, which allows them to be considered as first class athletes. For the energy supply, it was considered that all available energy in the muscle, anaerobic energy, would be consumed without being replaced.

As a result of this study, the great influence of drag and potential energy on cycling was confirmed. In addition, it was noted, from a comparative study, how sensitive the analysis is to the changes of the frontal area of the cyclists, which places this parameter as essential in the study of cycling and as an optimization object for the development in the sport. From the optimization results, under ideal condition applying the specified powers as a result of the genetic algorithm, it is possible to reach about $123,55\text{km/h}$. It is also worth noting the need for more in-depth studies in the field of human physiology in order to better understand the energy consumption and power supply of cyclists.

Keywords: Matlab, World Record, Guinness, Bicycle, Aerodynamics, Human Physiology, Optimization, Genetic Algorithm

Sumário

Glossário	xiii
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 MOTIVAÇÃO	1
1.2 O PROJETO "RECORDE DE VELOCIDADE URBANA"	1
1.3 OBJETIVOS	3
1.4 ORGANIZAÇÃO DO RELATÓRIO	4
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1 AERODINÂMICA	5
2.2 FISILOGIA DO EXERCÍCIO	12
2.3 MÉTODOS DE OTIMIZAÇÃO	14
2.3.1 MÉTODO DE GRADIENTE	16
2.3.2 MÉTODO DE SUPERFÍCIE DE RESPOSTA	16
2.3.3 ALGORÍTMOS GENÉTICOS	17
2.3.4 RECOZIMENTO SIMULADO	18
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	19
3.1 AERODINÂMICA NO CICLISMO	19
3.2 FISILOGIA NO CICLISMO	24
3.3 ALGORÍTMO GENÉTICO NO MATLAB	27
4 METODOLOGIA	33
4.1 ESTRUTURA DO CÓDIGO	33
4.2 MODELAMENTO DO PROBLEMA	38
4.3 AERODINÂMICA	38

4.4	FORÇA PESO E ALTITUDE	41
4.5	EFICIÊNCIA DA TRANSMISSÃO	42
4.6	VELOCIDADE	43
4.6.1	ENERGIA DE ROTAÇÃO DA RODA	43
4.6.2	ENERGIA CINÉTICA	44
4.6.3	ENERGIA DOS CICLISTAS	45
4.6.4	ENERGIA POTENCIAL	48
4.6.5	ENERGIA DE ARRASTO	48
4.6.6	BALANÇO DE ENERGIA	49
4.6.7	ENERGIA MECÂNICA	49
4.6.8	ROTAÇÃO DO PEDAL	50
4.7	ALGORÍTMO GENÉTICO	50
4.8	VALORES DOS PARÂMETROS	50
5	ANÁLISE E RESULTADOS	52
5.1	CALIBRAÇÃO DO CÓDIGO	52
5.2	POTÊNCIA	55
5.3	VELOCIDADE	56
5.4	FORÇA DE ARRASTO	57
5.5	ENERGIAS	58
5.6	ALGORÍTMO GENÉTICO	59
5.7	ANÁLISE DE SENSIBILIDADE	61
6	CONCLUSÃO	62
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	64

7	ANEXOS	67
7.1	PROGRAMA PRINCIPAL	67
7.2	SUBROTINA TRAJETÓRIA	68
7.3	ARQUIVO DE LEITURA DA ALTITUDE	75

Lista de Figuras

1.1	Foto da tentativa de Quebra do Recorde. Fonte: arquivo pessoal do Weimar. . .	3
2.1	Força aerodinâmica resultante e Momento sobre um corpo. Fonte:[1], p. 20 . . .	5
2.2	A divisão do escoamento em duas regiões, viscosa (camada limite) e invíscida (fora da camada limite). Fonte:[1], p. 63	6
2.3	Exemplo de escoamento onde os efeitos viscosos dominam. Fonte:[1], p. 64	7
2.4	Escoamento invíscido. Fonte:[1], p. 69	8
2.5	Escoamento real, com atrito. A espessura da camada limite foi ampliada para melhor visualização. Fonte:[1], p. 69	9
2.6	Perfil de Velocidade dentro da Camada Limite. Fonte:[1], p. 70	9
2.7	Perfil de Velocidade dentro da Camada Limite. Fonte:[1], p. 71	10
2.8	Crescimento da espessura da camada limite. Fonte:[1], p. 73	11
2.9	Escoamento laminar e turbulento da fumaça de um cigarro. Fonte:[1], p. 74 . . .	11
2.10	Concentração sanguínea de lactato em indivíduos treinados e destreinados em diferentes esforços físicos. Fonte:[22], p. 163	14
3.1	Escoamento em torno de um corpo. Fonte: [23], p.185	19
3.2	Pressão Dinâmica sob um ciclista na posição de Time Trial. Fonte:[2]	21
3.3	Bicicleta Easy Racer. Fonte: < http://www.easyracers.com >, acesso em: 22 Nov. 2017.	22
3.4	Coeficiente de Pressão para Ciclistas em "Vácuo" na posição de Time Trial - BLOC-KEN, Bert, Cycling Aerodynamics.	23
3.5	Coeficiente de Arrasto de dois cilindros circulares dispostos um atrás do outro. Fonte: [23], p.199.	24
3.6	Potência gerada em função da rotação dos pedais. Fonte: [20], p.683.	26
3.7	Potência instantânea para 120rpm e 170rpm. Fonte: [20], p.683.	26
3.8	População Inicial gerada pelo MATLAB. Fonte: [13]. Acesso em: 20 Set. 2017 .	28

3.9	Tipos de filhos gerados no algoritmo genético no MATLAB. Fonte: [13]. Acesso em: 20 Set. 2017	29
3.10	Representação dos filhos da população inicial. Fonte: [13]. Acesso em: 20 Set. 2017	30
3.11	Evolução da população no GA - Iteração 60. Fonte: [13]. Acesso em: 20 Set. 2017	30
3.12	Evolução da população no GA - Iteração 80. Fonte: [13]. Acesso em: 20 Set. 2017	31
3.13	Evolução da população no GA - Iteração 95. Fonte: [13]. Acesso em: 20 Set. 2017	31
3.14	Evolução da população no GA - Iteração 100. Fonte: [13]. Acesso em: 20 Set. 2017	32
4.1	Diagrama de Corpo Livre Bicicleta	38
4.2	Coeficiente de arrasto x Número de Reynolds. Fonte: [23], p.174 (Curva feita por Dave Wilson em Hoerner 1965 e outras fontes)	39
4.3	Seleção do limite dos eixos	40
4.4	Pontos sobre a curva e geração de dados da curva	40
4.5	Esquema do Modelamento da Altitude	42
4.6	Teste Wingate realizado no Laboratório de Fisiologia da Faculdade de Educação Física da Universidade de Brasília	46
4.7	Velocidade x Posição, Fonte: Strava	47
4.8	Potência x Tempo (curva utilizada NASA SP3006,1964). Fonte: [23], p. 44 . . .	47
5.1	Perfil de Altitude Matlab	52
5.2	Perfil de Altitude Strava	52
5.3	Velocidade em função da Posição - Dados do Strava x Código	53
5.4	Velocidade em função da Posição - Dados do Strava x Código com alterações no coeficiente de arrasto	54
5.5	Coeficiente de Arrasto em função do número de Reynolds	55
5.6	Resultado do Teste Wingate realizado na FEF	56
5.7	Velocidade x Posição	57
5.8	Velocidade x Posição, Fonte: Strava	57

5.9	Arrasto x Posição	58
5.10	Energia x Posição	59
5.11	Regressão linear dos resultados obtidos pelo GA nos 5 testes realizados	61

Lista de Tabelas

4.1	Dados de Massa	51
4.2	Dados Aerodinâmicos	51
4.3	Dados Mecânicos	51
4.4	Dados Cinemáticos	51
5.1	Resultado da Otimização por meio do GA	60
5.2	Velocidades máximas para cada um dos testes do GA	60
5.3	Análise de Sensibilidade da Área Frontal	61
7.1	Tabela de Altitude	75

Lista de Símbolos

Símbolos Latinos

m	Massa.
r_{roda}	Raio da Roda.
d_{roda}	Diâmetro da Roda.
e_{roda}	Espessura da Roda.
A	Área Frontal dos Ciclistas.
c_d	Coefficiente de Arrasto.
Re	Número de Reynolds.
v	Velocidade escalar.
t	Tempo.
s	Posição.
H	Potência.
q_{∞}	Pressão Dinâmica.
$F_{arrasto}$	Força de Arrasto.
P	Força Peso.

N	Força Normal.
$F_{tração}$	Força de Tração.
F_{at}	Força de Atrito.
I	Momento de Inércia.
K	Energia Cinética.
U	Energia Potencial.
g	Gravidade.
$E_{arrasto}$	Energia de Arrasto.
$E_{ciclista}$	Energia dos Ciclistas.
B	Balanco de Energia.
N_{coroa}	Número de Dentes da Coroa.
$N_{catraca}$	Número de Dentes da Catraca.
C_{rr}	Coeficiente de resistência ao rolamento, atrito.
L	Comprimento característico.

Símbolos Gregos

ρ_{ar}	Massa específica do ar.
η	Eficiência do engrenamento.
ω	Velocidade angular.
Δ	Intervalo.
μ	Viscosidade dinâmica.
τ	Tensão de cisalhamento.

GLOSSÁRIO

OMS	Organização Mundial de Saúde
UNB	Universidade de Brasília
FEF	Faculdade de Educação Física
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas
ATP	Trifosfato de Adenosina
PCr	Fosfato de Creatina

1 INTRODUÇÃO

1.1 MOTIVAÇÃO

A conscientização dos motoristas de que as bicicletas podem ser tão rápidas quanto um carro é de extrema importância para que exista uma convivência pacífica entre ciclistas e motoristas nas pistas dos grandes centros urbanos. Segundo a Organização Mundial de Saúde (OMS), em 2013, foram registrados no mundo cerca de 1,25 milhões de acidentes de trânsito resultando em morte, dentre os quais, 4% envolvendo ciclistas. No Brasil, no mesmo ano, segundo levantamento do Ministério da Saúde, foram registradas 1.348 mortes e, no ano de 2014, esse valor subiu para 1.357. Apenas em 2017, em Brasília, já foram registradas mais de 9 mortes envolvendo ciclistas em acidentes de trânsito [9], sendo a última com um voluntário da ONG Rodas da Paz, Raul Aragão (23 anos) no dia 22/10/2017. Neste contexto o atleta Weimar Pettengill criou então o projeto "Recorde de Velocidade Urbana" que busca muito além da quebra do recorde essa conscientização dos motoristas.

Sabendo da importância do sucesso desse projeto e do uso de ferramentas de otimização na Engenharia, desenvolveu-se este estudo para que os conhecimentos de tais ferramentas possam ser aplicados e estudados visando maximizar o desempenho do atleta, alcançando-se, assim, a quebra do recorde e a possível conscientização da sociedade, em geral.

1.2 O PROJETO "RECORDE DE VELOCIDADE URBANA"

O atleta e ciclista amador, Weimar Pettengill, após ser atropelado mais de uma vez e sofrer centenas de "quase acidentes" resolveu estabelecer o recorde mundial de velocidade urbana para mostrar aos motoristas que uma parcela dos usuários de bicicleta - atletas profissionais e amadores - não pode utilizar as ciclovias devido às altas velocidades que atingem em seus treinos e, portanto, é necessário que ciclistas e motoristas compartilhem a malha rodoviária das cidades. Além disso, ele resolveu estabelecer o recorde em uma bicicleta conhecida como Tandem (bicicleta dupla) e chamou um companheiro de treino, Adauto Belli, que além de ser ciclista como o Weimar, possui mais uma característica, é deficiente visual. Nas palavras de Weimar, o que ele quer dizer com o projeto é: "As bicicletas podem ser rápidas, muito rápidas!" e "Queremos mostrar que lugar de atleta é na rua. A bicicleta de um atleta tem velocidade

compatível com a rua. Queremos que o motorista entenda que o ciclista não está competindo com ele, então é só deixar a gente passar.”

A bicicleta foi preparada com uma relação similar a utilizada normalmente nas bicicletas de competição em estrada, com a diferença de que a coroa é de 61 dentes, sendo que o usual é de 52 dentes. O percurso percorrido pelos atletas é pré-definido e se localiza em Brasília, capital do país e é conhecido como descida da Ponte JK ou então, para os ciclistas, 8%. Durante o trajeto um carro elétrico, disponibilizado pela BMW, é responsável por embalar os ciclistas visando, assim, reduzir o arrasto sobre eles. O objetivo de velocidade é atingir cerca de 140km/h .

A primeira tentativa já foi realizada e o recorde foi estabelecido com sucesso, onde eles atingiram $109,1\text{km/h}$, mas os ciclistas não ficaram completamente satisfeitos com o resultado por saberem que são capazes de mais caso as condições sejam favoráveis. Um dos maiores problemas foi que a relação 61x11 utilizada não foi capaz de suportar a rotação necessária nos pedais para tal velocidade, em que ao atingir 160 rpm eles não conseguiram mais fornecer potência útil para a bicicleta. Além disso, eles conseguiram gerar cerca de apenas 1100W de potência e Weimar acredita que serão capazes de gerar cerca de 2000W de potência nas condições ideais. Sabendo de tal feito e do desejo de Weimar e Adaauto em atingir uma velocidade ainda maior, o professor Luis Felipe de Aguiar Paulinyi, da Universidade de Brasília (UnB) e departamento da Engenharia Mecânica, procurou Weimar para que pudesse estudar uma forma de otimizar os parâmetros necessários para se atingir a velocidade final de cerca de 140km/h [16]. É exatamente nesse cenário que se encontra o presente estudo, buscando otimizar a descida para que a velocidade final idealizada por Weimar seja atingida.



Figura 1.1: Foto da tentativa de Quebra do Recorde. Fonte: arquivo pessoal do Weimar.

1.3 OBJETIVOS

O objetivo do presente trabalho é desenvolver uma rotina de cálculos que modele a descida dos dois ciclistas em um percurso pré-definido. Para tal é necessário que se conheça o comportamento de vários parâmetros estudados na Engenharia como, por exemplo, aerodinâmica, potência, eficiência mecânica, dissipação de energia etc. Além disso, é de grande importância relacionar esses parâmetros a conhecimentos da área da fisiologia humana, sendo os principais parâmetros em questão neste estudo o consumo energético e a geração de potência dos ciclistas.

Os itens que devem ser abordados para a conclusão desse projeto estão dispostos a seguir:

- Calibração da rotina desenvolvida a partir da comparação com dados obtidos por meio de dispositivo GPS durante a descida do recorde.
- Revisão bibliográfica dos efeitos aerodinâmicos no problema, do método de otimização de algoritmo genético, assim como dos parâmetros fisiológicos no processo.
- Implementação de código de algoritmo genético à rotina para obtenção do cenário ideal

de fornecimento de potência dos ciclistas ao longo da descida visando atingir a velocidade máxima.

- Esboço da estrutura do código desenvolvido para que o estudo possa ser reproduzido e dado continuidade.

1.4 ORGANIZAÇÃO DO RELATÓRIO

O presente relatório foi dividido da seguinte forma:

- **Introdução:** Motivação do desenvolvimento deste estudo a partir do projeto de estabelecer o recorde de velocidade urbana, assim como os objetivos esperados.
- **Revisão Bibliográfica:** Revisão acerca dos parâmetros mais relevantes para o projeto.
- **Fundamentação Teórica:** Serão percorridos conceitos fundamentais, aplicados ao ciclismo, para o melhor entendimento do trabalho
- **Metodologia:** Será discutida a metodologia, o código desenvolvido e problemas durante o projeto.
- **Análise e Resultados:** Serão mostrados e discutidos os resultados obtidos.
- **Conclusões:** Conclusões finais sobre o projeto.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 AERODINÂMICA

No estudo da aerodinâmica é de extrema importância conhecer as forças e os momentos atuantes sobre o corpo em questão. Eles ocorrem, principalmente, devido a duas fontes básicas: a distribuição de pressão e da tensão de cisalhamento sobre a superfície do corpo [1]. Tanto a pressão, quanto a tensão de cisalhamento possuem dimensão de força por unidade de área, em que a pressão atua na direção normal e a tensão de cisalhamento tangencialmente à superfície do corpo.

Ao se integrar ambos efeitos sobre toda a superfície do corpo, obtém-se uma força resultante R e um momento M no corpo, como pode-se observar na Fig 2.1, em que V_∞ é a velocidade do escoamento bem distante do corpo.

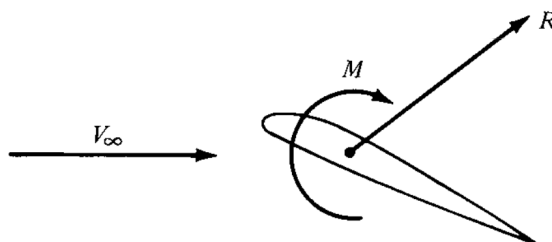


Figura 2.1: Força aerodinâmica resultante e Momento sobre um corpo. Fonte:[1], p. 20

A força aerodinâmica resultante pode ser decomposta em duas componentes, força de arrasto D , paralela a V_∞ e de sustentação L , perpendicular a V_∞ .

Outro conceito bastante importante no estudo da aerodinâmica é o de pressão dinâmica, que possui unidade de pressão e é definida como:

$$q_\infty = \frac{1}{2} \rho_\infty V_\infty^2 \quad (2.1)$$

em que no S.I, ρ é a densidade do ar dada em kg/m^3 , V_∞ é a velocidade do ar em m/s .

Além disso, na aerodinâmica, é bastante importante que se conheça qual o tipo de escoamento em estudo. Assim, define-se dois tipos principais: escoamento contínuo e o escoamento

livre. O escoamento contínuo é aquele em que as moléculas do fluido colidem com a superfície do corpo com grande frequência e, portanto, o corpo não consegue distinguir os choques individualmente, enxergando o meio como sendo contínuo. O oposto dessa definição é exatamente o escoamento livre, em que os choques das moléculas do fluido com o corpo analisado são pouco frequentes, o que faz com que o escoamento seja visto como livre.

A maior parte dos escoamentos nas aplicações práticas da aerodinâmica envolvem um meio contínuo. Neste estudo não é diferente, toda a análise será feita considerando-se o meio como contínuo.

Pode-se também definir um escoamento como sendo invíscido ou viscoso. Todos escoamentos reais, apresentam o fenômeno de transporte, ou seja, transportam calor, massa, devido ao atrito, a viscosidade do fluido. Esse tipo de escoamento é conhecido como escoamento viscoso. Em contrapartida, um escoamento que não envolve atrito, condução térmica ou difusão é dito invíscido. Apesar desse escoamento não existir naturalmente na natureza, existem vários escoamentos na aerodinâmica em que a influência do fenômeno de transporte é pequena e, portanto, pode-se modelar o escoamento como invíscido.

Teoricamente, o escoamento invíscido é atingido quando o número de Reynolds tende ao infinito, porém, na prática, muitos escoamentos com Reynolds bastante altos podem ser assumidos como invíscido. Para esses estudos, a influência dos fenômenos de transporte se restringem a uma camada bastante fina ao redor do corpo chamada de Camada Limite. Fora dessa região o escoamento é essencialmente invíscido. A Fig 2.2 mostra a região bem fina da camada limite com escoamento viscoso e a região fora dela com escoamento invíscido.

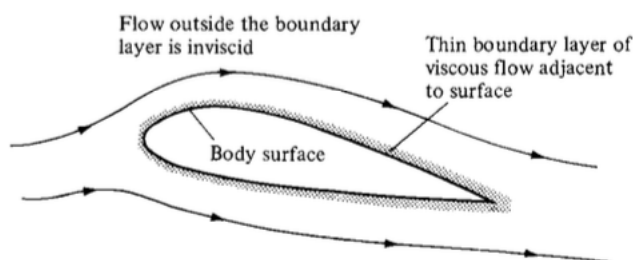


Figura 2.2: A divisão do escoamento em duas regiões, viscosa (camada limite) e invíscida (fora da camada limite). Fonte:[1], p. 63

Para escoamentos em que os efeitos viscosos dominam há o descolamento da camada limite

do corpo formando uma onda altamente energética a partir do ponto de descolamento, como pode ser observado na Fig 2.3.

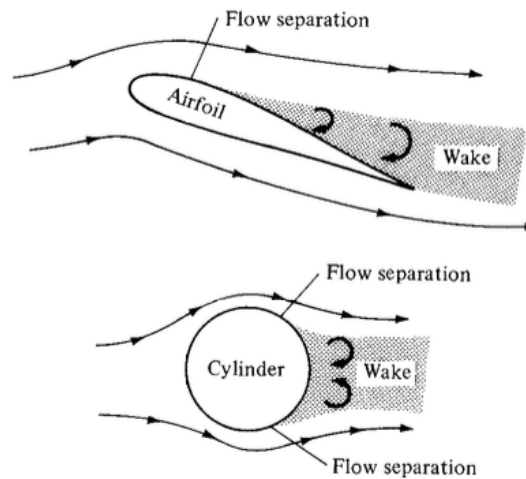


Figura 2.3: Exemplo de escoamento onde os efeitos viscosos dominam. Fonte:[1], p. 64

Um escoamento também pode ser classificado como sendo compressível ou incompressível. Essencialmente, escoamento incompressível é aquele em que a densidade ρ é constante. Em contrapartida, aquele em que a densidade ρ varia é denominado compressível. Novamente, um escoamento verdadeiramente incompressível não ocorre na natureza, porém há uma série de problemas aerodinâmicos que podem ser modelados considerando o escoamento incompressível sem que haja perda de precisão como, por exemplo, o escoamento de líquidos homogêneos. Em geral, quando o fluido é um líquido, onde a compressibilidade (quantidade que a substância pode ser comprimida ao se aplicar uma pressão) é baixa a densidade pode ser considerada constante e o escoamento é dito incompressível. Em contrapartida, para fluidos gasosos, a compressibilidade é alta e, portanto, os escoamentos com fluidos gasosos são em geral compressíveis. Porém, usualmente, no estudo da aerodinâmica, utiliza-se a consideração de escoamento incompressível para escoamentos com $(M < 0,3)$, em que M é o número de Mach e é dado pela razão $M = V/a$ onde a é a velocidade de som e V a velocidade do escoamento livre. Para escoamentos com $M > 0,3$ não se pode fazer mais essa consideração e deve-se tratar o escoamento como compressível.

Analisando um pouco mais a fundo os escoamentos viscosos é possível fazer uma breve introdução sobre a camada limite. Inicialmente é importante lembrar que a tensão de cisalhamento (τ) devido ao atrito existe em qualquer ponto em um escoamento onde há um gradiente de velocidade nas linhas de fluxo. Na aerodinâmica, essa tensão tem um efeito significativo sobre

o escoamento apenas quando o gradiente de velocidade é expressivo.

Considerando, por exemplo, um escoamento sobre o corpo ilustrado na Fig 2.2, a região bem distante do corpo não apresenta gradiente de pressão significativo e os efeitos viscosos, devido ao atrito, não desempenham papel algum. Em contrapartida, na fina camada do escoamento adjacente à superfície, o gradiente de velocidade é grande e o atrito e seus efeitos viscosos já são importantes no comportamento dessa região. Essa ideia foi primeiramente proposta por Ludwig Prandtl em 1904 e seu conceito sobre a camada limite possibilitou grande avanço nas análises aerodinâmicas [1]. A partir dessa definição, passou-se a considerar os escoamentos longe do corpo como sendo invíscidos e o escoamento na fina região imediatamente adjacente ao corpo, ou seja, dentro da camada limite, como sendo viscoso, onde os efeitos dissipativos estão presentes. Para a maioria dos problemas de interesse a camada limite é muito fina comparada a extensão do resto do escoamento porém, o seu efeito é bastante significativo. Ela é a fonte do arrasto devido ao atrito em um corpo aerodinâmico.

Além disso, a separação da camada limite, como representada na Fig 2.3, muda drasticamente a distribuição de pressão em torno da superfície do corpo resultando em um grande aumento do arrasto conhecido como arrasto de pressão. Isso mostra o quanto a camada limite é importante no estudo da aerodinâmica, apesar de sua dimensão ser pouco expressiva.

Uma outra característica da camada limite que é bastante importante ser ressaltada é o tamanho do gradiente de velocidade dentro da camada limite. Isso ocorre devido a condição de não escorregamento. Para exemplificar, consideremos a Fig 2.4 e a Fig 2.5 abaixo. Por definição, no ponto b mostrado na Fig 2.4, a velocidade do escoamento possui um valor finito, que não sofre influência do atrito. Devido ao atrito a fina camada infinitesimal de moléculas de ar imediatamente adjacente à superfície do corpo se prende à superfície, porém com velocidade relativa nula em relação a mesma. Essa é a condição de escorregamento e a causa para os grandes gradientes de velocidade dentro da camada limite.

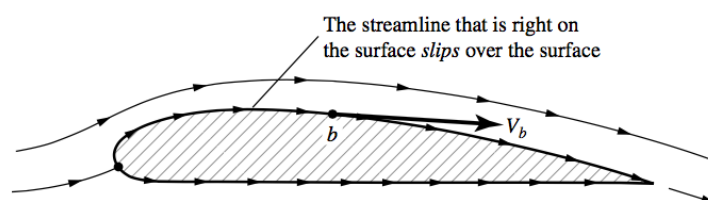


Figura 2.4: Escoamento invíscido. Fonte:[1], p. 69

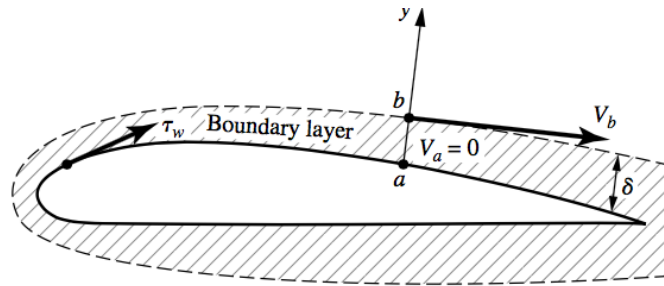


Figura 2.5: Escoamento real, com atrito. A espessura da camada limite foi ampliada para melhor visualização. Fonte:[1], p. 69

Resumidamente, analisando a Fig 2.5, pode-se dizer que pelo fato de a velocidade sair de um valor nulo $V_a = 0$ (ponto a) para um valor significativo V_b (ponto b) em uma distância tão pequena (espessura da camada limite), o gradiente de velocidade é grande. Dessa forma, pode-se concluir que a camada limite é a região os efeitos viscosos dominam. A Fig 2.6 ilustra o perfil de velocidade dentro da região da camada limite.

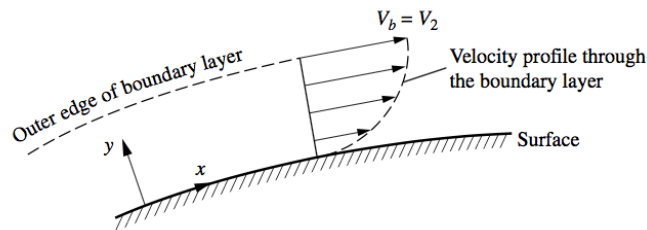


Figura 2.6: Perfil de Velocidade dentro da Camada Limite. Fonte:[1], p. 70

Nota-se que a camada limite apresenta diversas características bem interessantes. Uma outra característica é a de que a pressão através da camada limite, em uma direção perpendicular a superfície, é constante. Ou seja, a pressão nos pontos a e b na Fig 2.5 são iguais. Uma consequência desse fato é o motivo de que a distribuição de pressão na superfície calculada para um escoamento invíscido gera bons resultados para a análise de pressão em situações reais.

Por definição, o perfil de velocidade dá a variação de velocidade na camada limite como sendo uma função de y . Em geral, esse perfil, para posições em diferentes pontos de x são diferentes. De forma semelhante, o perfil de temperatura pela camada limite é mostrado na Fig 2.7. Analisando a temperatura, uma espécie de condição de não escorregamento também se aplica, em que a temperatura na parede T_w é a mesma que a temperatura na superfície. A temperatura T_b no ponto externo da camada limite é a mesma do gás na superfície calculada

a partir da análise de um escoamento invíscido. A temperatura dentro da camada limite é governada por uma combinação de mecanismos de condução térmica e dissipação devido ao atrito.

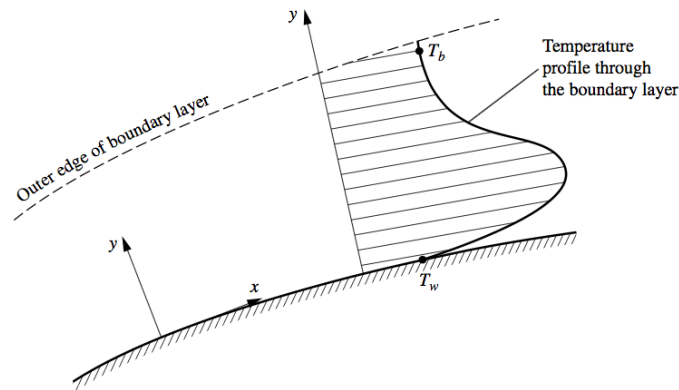


Figura 2.7: Perfil de Velocidade dentro da Camada Limite. Fonte:[1], p. 71

Uma das importâncias do gradiente de velocidade $(dV/dy)_{y=0}$ na camada limite é a de governar a tensão cisalhante na parede do corpo. Desta forma, pode-se definir a tensão na parede de acordo com a equação 2.2 abaixo

$$\tau_w = \mu \left(\frac{dV}{dy} \right)_{y=0} \quad (2.2)$$

em que, μ é a viscosidade do fluido, que possui dimensão de massa/(comprimento)(tempo).

Por fim, um escoamento viscoso pode ainda ser definido como laminar ou turbulento.

- Escoamento laminar: em que as linhas do fluxo são suaves e regulares e os elementos do fluido se movimentam suavemente ao longo delas.
- Escoamento turbulento: em que as linhas do fluxo se quebram e os elementos do fluido se movimentam randomica e irregularmente.

O parâmetro que influencia bastante nas propriedades da camada limite é o número de Reynolds, que governa a natureza dos escoamentos viscosos em geral. O número de Reynolds local distante de uma distância x da ponta, como se observa na Fig 2.8 abaixo é definido como:

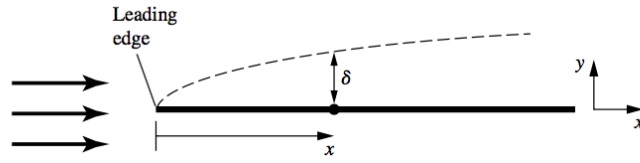


Figura 2.8: Crescimento da espessura da camada limite. Fonte:[1], p. 73

$$Re_x = \frac{\rho_\infty V_\infty x}{\mu_\infty} \quad (2.3)$$

em que o subscrito ∞ é usado para denotar condição de escoamento livre e δ é a espessura da camada limite.

Os escoamentos laminar e turbulento podem ser exemplificados pela fumaça que sai da ponta de um cigarro, em que primeiro se observa uma região laminar, suave, e então, uma transição para uma região irregular, turbulenta, como observado na Fig 2.9. As diferenças entre esses dois tipos de escoamentos é bastante grande e eles impactam bastante na aerodinâmica.

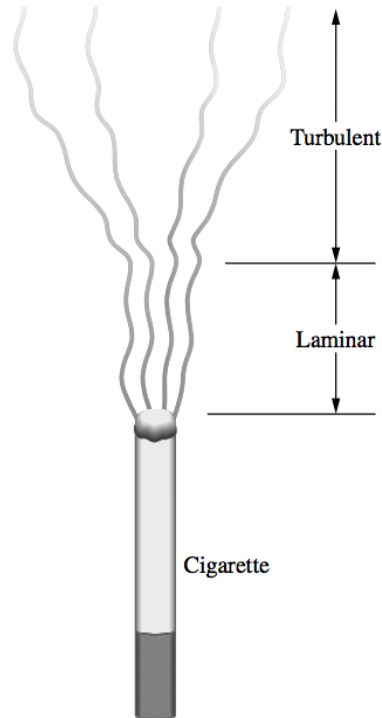


Figura 2.9: Escoamento laminar e turbulento da fumaça de um cigarro. Fonte:[1], p. 74

Em geral, o escoamento turbulento é muito mais enérgico que o escoamento laminar, por-

tanto, apresenta gradiente de velocidade maior, maior espessura da camada limite, maior tensão de cisalhamento na parede, maior gradiente de temperatura na parede etc.

2.2 FISILOGIA DO EXERCÍCIO

No corpo humano a presença de energia só se manifesta quando ocorre alguma mudança, se relacionando à realização de trabalho biológico, que por sua vez, necessita da potência gerada pela transferência direta da energia química. Além disso, o trabalho biológico também é descrito pela primeira lei da termodinâmica em que, neste caso, estabelece que o corpo não produz, não consome, nem utiliza energia; pelo contrário, ela será modificada de uma forma para outra à medida que o sistema fisiológico sofre uma transformação contínua [22]. Além da primeira lei, percebe-se, também, os princípios da segunda lei da termodinâmica em que os macronutrientes¹, presentes no corpo possuem considerável energia potencial que se degrada espontaneamente para a energia cinética do movimento com menor capacidade de realizar trabalho, aumentando, assim, a entropia do sistema.

A energia contida nos macronutrientes não é transferida diretamente para as células para a realização de trabalho, ela é conduzida por meio de um composto nucleotídico rico em energia chamado trifosfato de adenosina (ATP). Desta forma, o ciclo de energia no corpo ocorre basicamente em duas etapas: a energia potencial do alimento é armazenada na forma de energia química dentro das ligações do ATP e em seguida extraída do ATP e transferida para realizar o trabalho biológico. A quebra rápida de uma molécula de ATP resulta em energia praticamente instantânea ao organismo anaerobicamente, ou seja, sem a presença de oxigênio. Além do ATP outra grande fonte de energia rápida é proveniente do fosfato de creatina (PCr). Este tipo de energia ocorre em exercícios de curta duração como uma corrida de 100m, levantamento de peso ou um *sprint* de chegada no ciclismo. A ressíntese de ATP no corpo é contínua, com as gorduras e o glicogênio² sendo as principais fontes para tal processo, porém a quantidade de ATP disponível em determinado instante é limitada.

Outra forma de geração de energia anaeróbica é por meio da degradação da glicose por meio de uma série de reações de fermentação conhecida como glicólise. Essas reações ocorrem no meio

¹Macronutrientes são os nutrientes necessários ao organismo em grandes quantidades. Constituem a maior parte da nossa dieta e são responsáveis por fornecer energia a componentes fundamentais para o crescimento e manutenção do corpo

²Polissacarídeo, ou carboidrato, que é a principal fonte energética das células animais

aquoso das células, fora das mitocôndrias³. Nos seres humanos a glicólise é crucial durante as atividades físicas que exigem um esforço máximo com duração de até 90 segundos [22], tempo este que se encaixa no estudo em questão.

O início do metabolismo energético anaeróbico é anunciado pelo acúmulo de lactato na corrente sanguínea. Essa é, portanto, uma forma de determinar o limiar anaeróbico de um atleta, a partir da concentração de lactato no sangue. A produção de lactato durante o repouso ou atividade física moderada ocorre continuamente, porém qualquer lactato formado desta forma é logo oxidado pelas fibras musculares vizinhas. Consequentemente, o lactato não se acumula, pois o seu ritmo de produção é igual ao de remoção.

O lactato é uma fonte valiosa de energia química que se acumula como resultado de um exercício intenso, uma vez que depois que ele é formado no músculo ele rapidamente se difunde no corpo permitindo que a glicólise continue a fornecer energia anaeróbica para a ressíntese de ATP. Porém, essa via para energia extra é temporária, já que os níveis sanguíneos e musculares de lactato aumentam e a regeneração de ATP não acompanha o mesmo ritmo. Desta forma, a acidez intracelular aumenta bastante, o que medeia a fadiga muscular, por meio da inativação de várias enzimas na transferência de energia e pela deterioração das propriedades contráteis do músculo [22]. A Fig 2.10 abaixo mostra a concentração sanguínea de lactato para indivíduos treinados e destreinados para diferentes níveis de exercício, representado pelo percentual do consumo máximo de oxigênio VO_{2max} . Percebe-se que os indivíduos treinados, conseguem atingir uma maior concentração de lactato em situações anaeróbicas que os não treinados, ou seja, produzem mais energia nessa situação, como é de se esperar.

³Organelas celulares responsáveis pela respiração celular, processo de fabricação de ATP

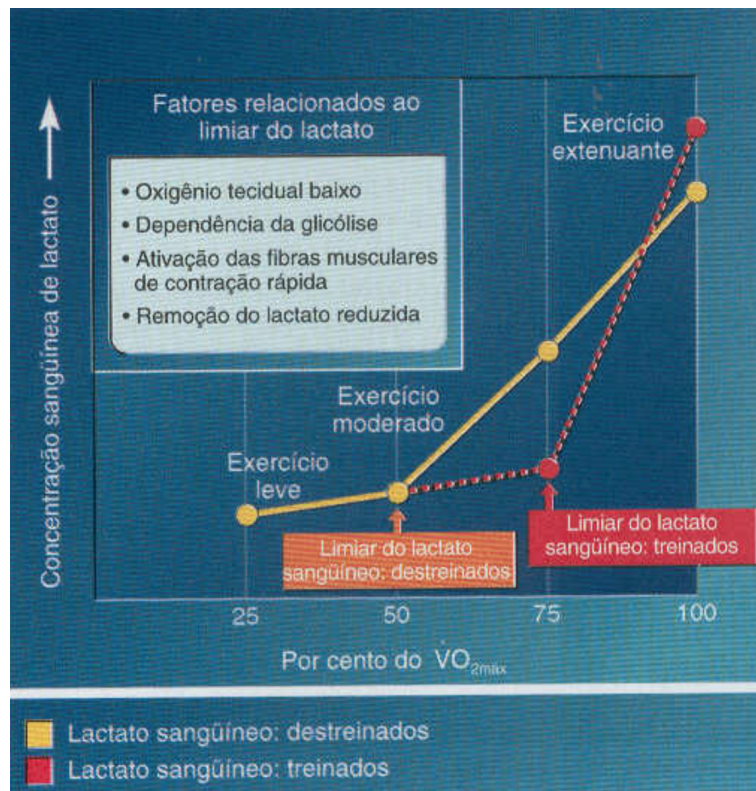


Figura 2.10: Concentração sanguínea de lactato em indivíduos treinados e destreinados em diferentes esforços físicos. Fonte:[22], p. 163

É extremamente importante que se conheça como ocorre o consumo de energia do atleta. Para isso existem diversos testes que podem ser realizados. No caso do ciclismo, comumente realiza-se testes como *Wingate* e Espirometria (aberta ou fechada). Esses testes serão feitos com atletas amadores para que os estudos neste trabalho tenham uma melhor fundamentação prática e explicados detalhadamente na seção 4.6.3. Com base nos resultados será possível um melhor entendimento do consumo de energia permitindo, assim, que ele também possa ser foco de otimização visando um melhor desempenho do atleta no esporte.

2.3 MÉTODOS DE OTIMIZAÇÃO

Otimização é o ato de obter o melhor ou os melhores resultados sob determinadas circunstâncias. Na Engenharia, seja no projeto, na construção, na manutenção, os engenheiros devem tomar, em diversos estágios do projeto, decisões. O objetivo final de todas essas decisões é de minimizar o esforço requerido para tal benefício ou então maximizar o mesmo. Como todo objetivo que se deseja pode ser modelado matematicamente como uma função com certas variáveis,

pode-se definir otimização como o processo para se obter as condições necessárias visando o valor máximo ou mínimo de uma função objetivo [19]. Em seu senso mais comum, ela pode ser aplicada para resolver qualquer problema de Engenharia.

Os métodos de otimização podem ser traçados desde os tempos de Newton, Lagrange e Cauchy. A contribuição de Newton e Leibniz para o cálculo matemático permitiu que a otimização pelo método de cálculo diferencial fosse possível. Os fundamentos para os cálculos de variações, foi possível com estudos de Bernoulli, Euler, Lagrange e Weirstrass. Lagrange desenvolveu métodos de otimização para problemas restritos, que envolvem a adição de multiplicadores desconhecidos. Por fim, Cauchy, aplicou todos esses conhecimentos para resolver um problema não restrito de otimização, mas mesmo com o esforço de todos esses matemáticos o desenvolvimento dos métodos só foi possível no meio do século XX, com o surgimento dos computadores.

Atualmente, tem-se utilizado os métodos modernos, ou não tradicionais, de otimização para a solução de problemas bastante complexos na Engenharia. Dentre esses métodos, pode-se citar como os mais conhecidos: algoritmos genéticos, recozimento simulado, otimização de enxame de partículas, otimização baseada na rede neural, otimização de colônia de formigas e otimização difusa, além dos tradicionais como métodos de gradiente e métodos de superfície de resposta [19].

Nas seções a seguir os principais métodos modernos serão detalhados, ressaltando suas principais características. É importante notar que cada um dos métodos possui vantagens e desvantagens, dependendo das características do que se quer otimizar. Em busca de melhores resultados, pode-se fazer uma combinação deles para que suas vantagens individuais sejam aproveitadas. Antes de explicar cada um deles é importante que algumas definições sejam feitas para um melhor entendimento.

Um método de otimização pode ser chamado de *Determinístico* ou *Estocástico (Aleatório)*. O método determinístico é aquele em que, conhecendo-se seu ponto de partida, é possível prever todos os seus passos, ou seja, sempre leva a uma mesma resposta partindo-se de um mesmo ponto inicial. O método estocástico ou aleatório é aquele que em duas execuções sucessivas não executa a mesma sequência de operações, uma vez que várias escolhas são feitas com base em números gerados randomicamente no momento da execução do código, ou seja, a partir de um mesmo ponto inicial, cada execução do código segue um caminho diferente e leva, possivelmente,

a uma resposta diferente.

Deve-se também caracterizar, em *contínuas* ou *discretas*, os tipos de variáveis que estão envolvidas no problema. Variáveis contínuas são aquelas que podem assumir qualquer valor dentro do intervalo das restrições, como por exemplo a dimensão de uma roda de bicicleta, que pode assumir qualquer valor de comprimento. Porém, as variáveis discretas sofrem saltos como, por exemplo, a potência gerada pelo ciclista. Os tipos de variáveis que descrevem o problema indicam quais métodos trazem resultados satisfatórios ou não. Por exemplo, problemas envolvendo variáveis contínuas, bem comportadas, são bem resolvidos com métodos tradicionais como o método do gradiente e da superfície de resposta; problemas com muitas variáveis discretas pode causar grandes variações nos valores da função objetivo e, por isso, apresentam melhores soluções utilizando métodos estocásticos, como recozimento simulado e algoritmos genéticos [18].

2.3.1 MÉTODO DE GRADIENTE

Geralmente utilizado para resolver problemas com variáveis contínuas bem comportadas. Esse método analisa a sensibilidade de cada uma das variáveis do problema e constrói aproximações locais para tal. Tais aproximações são expressas na forma de polinômios que modelam a função objetivo numa região próxima ao ponto em estudo. O objetivo principal deste método é encontrar o ponto em que a sensibilidade seja zero, condição necessária para um ótimo local.

2.3.2 MÉTODO DE SUPERFÍCIE DE RESPOSTA

Em modelos cuja solução exata seja bastante pesada computacionalmente, utiliza-se este método, a fim de se obter uma região de pontos ótimos, ou seja, uma aproximação global. Este método é bastante interessante no início de um projeto, em que ainda não se sabe muito sobre o mesmo. Assim, ele permite avaliar quais variáveis são realmente relevantes, verificando o efeito que elas exercem sobre a superfície de resposta. Caso este efeito seja desprezível a variável não precisa ser considerada e, assim, reduz-se o custo computacional.

2.3.3 ALGORÍTMOS GENÉTICOS

Muitos problemas de otimização são caracterizados por uma mistura de variáveis contínuas e descontínuas, além de um espaço de design descontínuo. Tais características favorecem o uso deste método uma vez que ele não utiliza qualquer informação de derivadas apresentando, portanto, boas chances de não ficar preso em ótimos locais. Geralmente, o método resulta em um ótimo global com grandes probabilidades.

O método dos algoritmos genéticos se baseia no princípio da seleção natural e evolução das espécies proposto por Charles Darwin. Tal princípio estabelece que os indivíduos mais fortes, mais bem adaptados sobrevivem e perpetuam as espécies enquanto os mais fracos são extintos. Assim como na reprodução biológica, o método realiza a reprodução entre indivíduos de uma população inicial, em que cada indivíduo compreende uma combinação de variáveis que gera uma possível solução para o problema, e o conjunto de variáveis que o compõe é considerado seu genoma. Analogamente ao que ocorre na natureza, o método realiza operações genéticas como reprodução, cruzamento e mutação criando uma nova geração, que é analisada baseada na função objetivo. Quando a busca é pelo máximo da função objetivo, por exemplo, quanto maior for o valor obtido para cada indivíduo, mais apto ele será e, portanto, perpetuará na espécie.

O algoritmo genético se diferencia dos métodos tradicionais por diversos aspectos, sendo alguns deles:

- Utiliza uma família de pontos para começar o processo ao invés de um único ponto, reduzindo a chance de ficar preso em um ótimo local;
- Usa apenas os valores da função objetivo, sem informações de derivadas;
- As variáveis de projeto são cadeias de variáveis binárias que correspondem aos cromossomos na biologia, permitindo que o método seja aplicável para resolver problemas de programação discretos;
- A função objetivo se comporta como a função *fitness*;
- Em novas gerações, um novo conjunto de soluções é produzido a partir de seleções randômicas que é então comparado com a função objetivo *fitness* para encontrar uma nova geração mais apta.

2.3.4 RECOZIMENTO SIMULADO

O método de recozimento simulado funciona analogamente ao processo de recozimento de metais em que o metal fundido apresenta átomos que se movem livremente. Ao se reduzir a temperatura do metal esses movimentos vão sendo restringidos e os átomos se organizam de forma a formar cristais com a menor energia interna possível. Esse processo depende essencialmente da taxa de resfriamento do metal em que, caso seja muito alta, atinge-se um estado policristalino, muito mais energético que o cristalino, o que não é desejado, uma vez que, na engenharia, resfriamentos rápidos podem introduzir defeitos no interior dos materiais [19].

Assim, o algoritmo começa o processo com uma temperatura fictícia bastante alta, que será reduzida de acordo com passos que o programador tenha definido. A cada passo de tempo e temperatura, calcula-se a função objetivo, no caso o estado de energia, para um dado número de pontos na vizinhança da solução inicial. Caso a função objetivo calculada apresente menor estado de energia essa é tomada como nova solução e o programa passa a funcionar com base nela.

Além disso, no método, é permitida a transição para estados de maior energia segundo uma certa probabilidade e evitando que o mesmo fique preso na região de um mínimo local. Essa probabilidade diminui com o passar das iterações, por estar ligado a temperatura do sistema físico original. A tendência de ficar preso a um mínimo local ocorre em situações em que o algoritmo abaixa muito rapidamente a temperatura ou que seleciona apenas estados de menor energia.

Tais algoritmos são simples de serem implementados, muito robustos e consistem em uma ferramenta geral para a solução de problemas, mas exige inúmeras execuções da rotina uma vez que é um método aleatório.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 AERODINÂMICA NO CICLISMO

No ciclismo, a resistência causada pelo vento é a maior componente de arrasto e é causada basicamente por duas forças: uma normal à superfície do corpo que a sente, no caso o corpo do ciclista, sentida como pressão do vento e outra tangencial à superfície, representada pelo atrito viscoso com a superfície dos corpos ("*skin friction*") e dissipada na forma de calor imediato no ar. No caso de um objeto, como o corpo do ciclista e a bicicleta, o efeito da pressão é muito maior do que o atrito com a superfície dos corpos, permitindo que muitas vezes se faça a simplificação apenas para a força que domina, que aparece, inicialmente, como energia cinética, que por sua vez gera vórtices a jusante dos ciclistas, ocorrendo, portanto, a dissipação viscosa em forma de calor no ar. Porém uma parte considerável do arrasto que afeta os ciclistas, é o atrito viscoso contra a superfície do corpo. A Fig 3.1 a seguir ilustra essa situação, em que em (b) tem-se um grande arrasto de pressão e separação da camada limite, e em (c) que mostra o atrito viscoso e a recuperação de pressão em um corpo aerodinâmico evitando-se, assim, a separação.

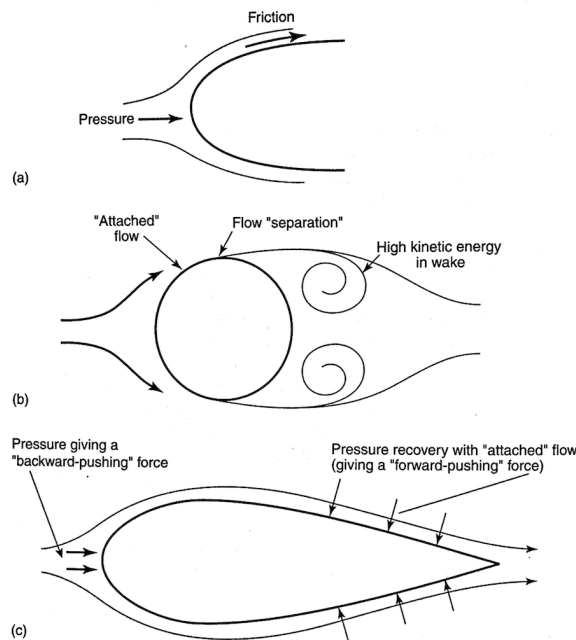


Figura 3.1: Escoamento em torno de um corpo. Fonte: [23], p.185

Em geral, pode-se dividir o escoamento na camada limite de três formas:

1. Laminar, em que as camadas do fluido escorregam suavemente umas sobre as outras,

geralmente na região a montante nos corpos.

2. Turbulenta, em que a camada limite é mais enérgica e composta por pequenos e intensos vórtices confinados que aumentam significativamente o atrito de superfície e corresponde, normalmente, a uma região mais a jusante.
3. Separada, em que a camada limite está completamente separada e se visualiza grandes vórtices.

O arrasto é responsável por cerca de 90% de toda a resistência, quando os ciclistas pedalam a uma velocidade de corrida, cerca de 54km/h . Desses 90%, cerca de 60% é devido ao corpo do ciclista. Caso se queira uma bicicleta com baixo arrasto é desejável que a camada limite seja inteiramente laminar, contudo camadas limites laminares são extremamente sensíveis e apresentam uma grande tendência à separação, produzindo grande arrasto de pressão uma vez que a separação previne a maior parte da recuperação da pressão no bordo de fuga do corpo. Essa recuperação gera no corpo uma força de impulsão que, caso não houvesse arrasto, balancearia com a força na frente do corpo que o empurra contrariamente ao movimento, caracterizando a situação de arrasto nulo.

Para corpos que se movem a altas velocidades no ar deseja-se, principalmente, que sejam construídos de tal forma a reduzir o arrasto de pressão. Para isso, busca-se geometrias que maximizem a possibilidade de manter o escoamento em contato com o corpo ao invés de se separar em jatos locais e vórtices e que minimizem o atrito viscoso. Portanto, é de grande importância que se teste modelos em um túnel de vento, porém em ciclistas é ainda mais importante que se compreenda a interação do ar ao redor do ciclista, com suas pernas em movimento e com o chão estacionário. Isso torna a validade de testes em túnel de vento não tão precisas quanto em outros tipos de veículos, mas nem por isso, menos importantes.

Sabe-se que a força de arrasto é a força na direção do escoamento, ou da pressão dinâmica, máxima pressão que pode ser exercida por um escoamento que force um corpo ao repouso. Para velocidades baixas, (abaixo de 45m/s ou 160km/h), a pressão dinâmica, representada pela letra q , pode ser aproximada pela equação 2.1 e, no ciclismo, é ilustrada como se vê na Fig 3.2 a seguir, que mostra a diferença de pressão a montante e a jusante do ciclista, em que se nota, uma grande diferença, que resulta em um grande arrasto do ciclista. Além disso, para escoamentos incompressíveis, a pressão dinâmica, pode ser definida como a diferença entre a pressão total

p_0 e a pressão estática p_1 . A partir da equação de Bernoulli 3.1 e considerando um escoamento incompressível, pode-se definir a pressão dinâmica de acordo com a equação 3.3

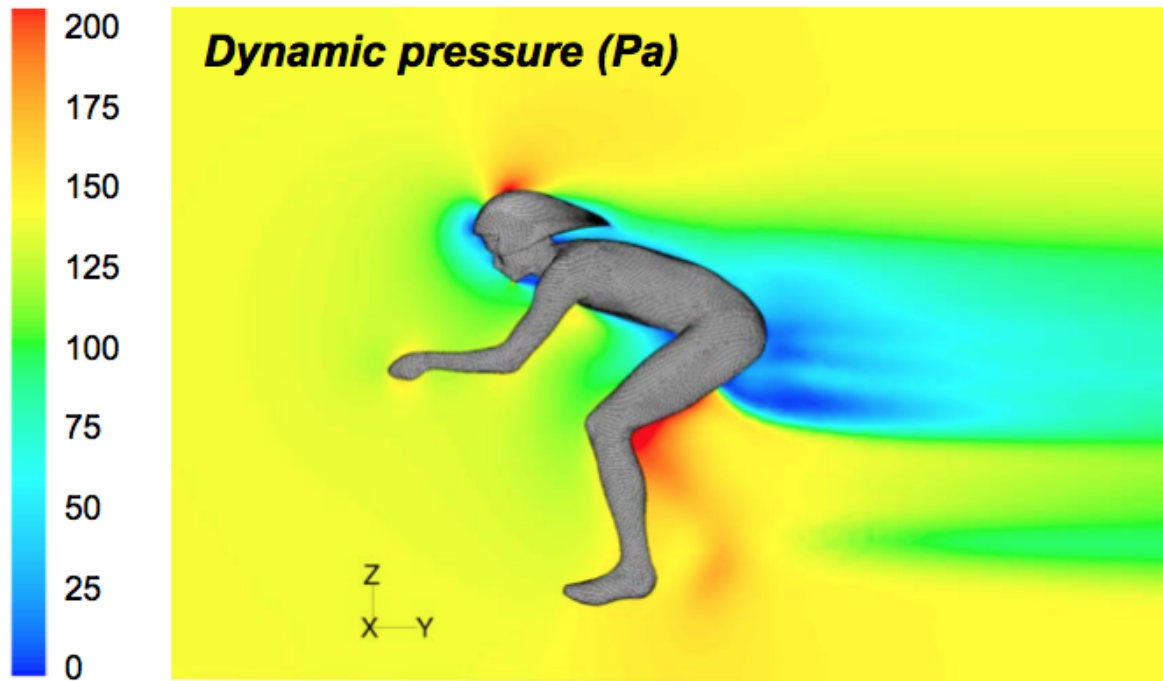


Figura 3.2: Pressão Dinâmica sob um ciclista na posição de Time Trial. Fonte:[2]

$$p_1 + \frac{1}{2}\rho.V_1^2 = p_2 + \frac{1}{2}\rho.V_2^2 \quad (3.1)$$

em que, ao longo de uma linha de escoamento, a equação 3.1 pode ser reescrita como:

$$p_1 + \frac{1}{2}\rho.V_1^2 = const \quad (3.2)$$

e, por fim, pode-se definir a pressão dinâmica como sendo:

$$q = \frac{1}{2}\rho V^2 = p_0 - p_1 \quad (3.3)$$

Assim, pode-se calcular a força de arrasto como:

$$F_{arrasto} = C_D.A.q \quad (3.4)$$

em que c_d é o coeficiente de arrasto, A é a área frontal do corpo. O coeficiente de arrasto pode ser definido de duas formas, a depender do corpo a ser analisado. A equação 3.4 é a que utiliza a forma mais usual do coeficiente de arrasto, porém, se o corpo for delgado ou simplificado, utiliza-se a área de superfície do corpo ao invés da área frontal.

Pode-se utilizar duas alternativas visando reduzir o arrasto em uma bicicleta e ciclista: reduzir a área frontal do ciclista e da bicicleta ou reduzir o coeficiente de arrasto que o conjunto possui. Antes tentava-se uma das duas alternativas, porém, recentemente tem-se tentado realizar as duas alternativas simultaneamente. A área frontal das bicicletas convencionais com o ciclista pode ser reduzida apenas mudando a posição de pedalar. Algumas formas típicas, inclusive com quebras de recorde são pronada, em que a face está voltada para baixo e a cabeça fica à frente dos pés, supinada, pés antes da cabeça, face voltada para cima e corpo horizontal e, por fim, a posição reclinada. Comparativamente, uma bicicleta reclinada que teve sucesso, conhecida como Easy Racer, como se pode observar na Fig 3.3, apresenta coeficiente de arrasto de 0,77, uma área frontal de $0,35m^2$ e $c_d.A$ de $0,27m^2$, contra os 0,88, $0,36m^2$ e $0,32m^2$, respectivamente, de uma bicicleta de corrida [23].



Figura 3.3: Bicicleta Easy Racer. Fonte: <<http://www.easyracers.com>>, acesso em: 22 Nov. 2017.

A análise aerodinâmica em bicicletas pode ser feita tão complexa quanto se queira, porém uma análise mais refinada será feita em uma oportunidade futura. Por exemplo, no caso de uma bicicleta tandem o ciclista na segunda posição tem um arrasto inferior ao primeiro, mas,

por simplificação, considerou-se o mesmo caso para ambos ciclistas neste estudo. Esse efeito de redução arrasto no segundo ciclista pode ser visto em um estudo similar feito na Eindhoven University of Technology [4], para dois ciclistas em duas bicicletas distanciados de apenas $0,01m$, como ilustra a Fig 3.4, que mostra os coeficientes de pressão a partir de uma simulação RANS.

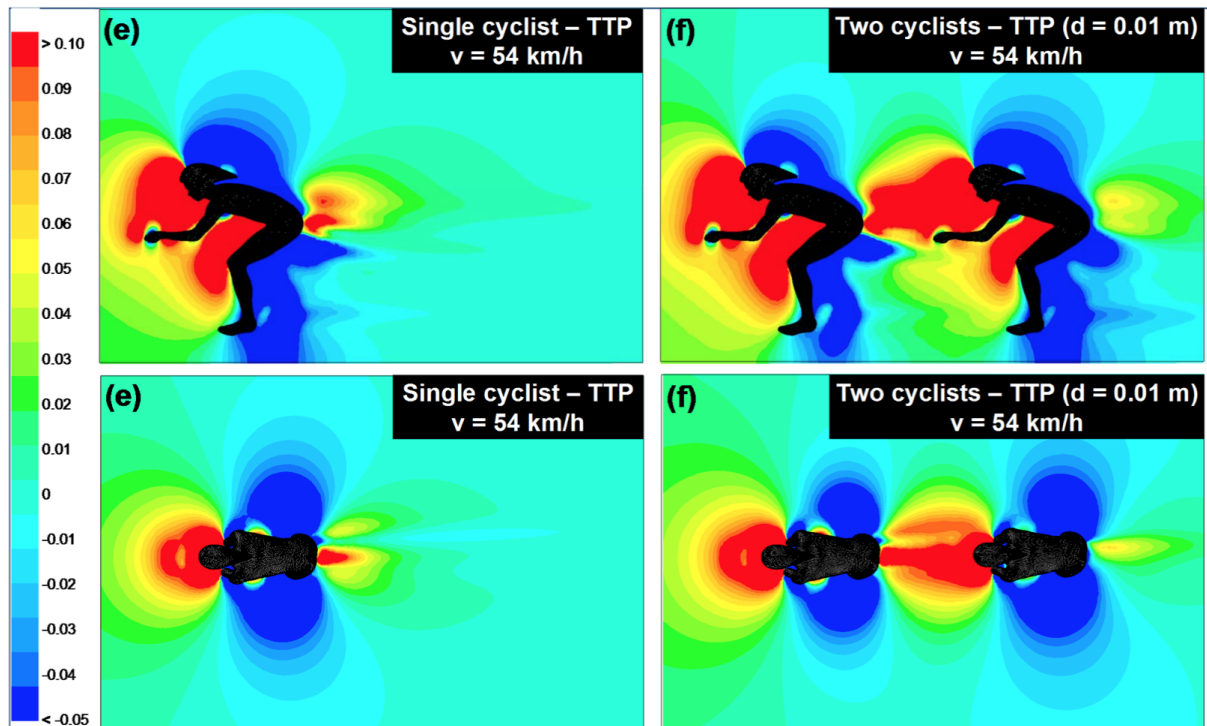


Figura 3.4: Coeficiente de Pressão para Ciclistas em "Vácuo" na posição de Time Trial - BLOCCEN, Bert, Cycling Aerodynamics.

Sobre o segundo ciclista, em posição tandem, incorre pouco arrasto adicional além do que resulta do que vai a frente. Além disso, a presença dele induz uma região de alta pressão atrás do ciclista que lidera, reduzindo-se, assim, o arrasto sobre o primeiro atleta. Desta forma, a formação em posição tandem é vantajosa para ambos. Essa ideia é a mesma aplicada a um grupo maior de ciclistas, em formação de pelotão, em que o objetivo de se pedalar junto é reduzir o arrasto sobre cada um dos ciclistas. É interessante que para distâncias bem próximas (cerca de 2 diâmetros do cilindro circular) entre os ciclistas, o arrasto sobre o primeiro é de cerca de 15% menor do que se ele estivesse sozinho e sobre o segundo é praticamente nulo. Para distâncias um pouco maiores (cerca de 4 diâmetros), o primeiro ciclista perde esse benefício e o arrasto sobre o segundo é de cerca de 25% do valor solo [23]. A Fig 3.5 ilustra esse fenômeno.

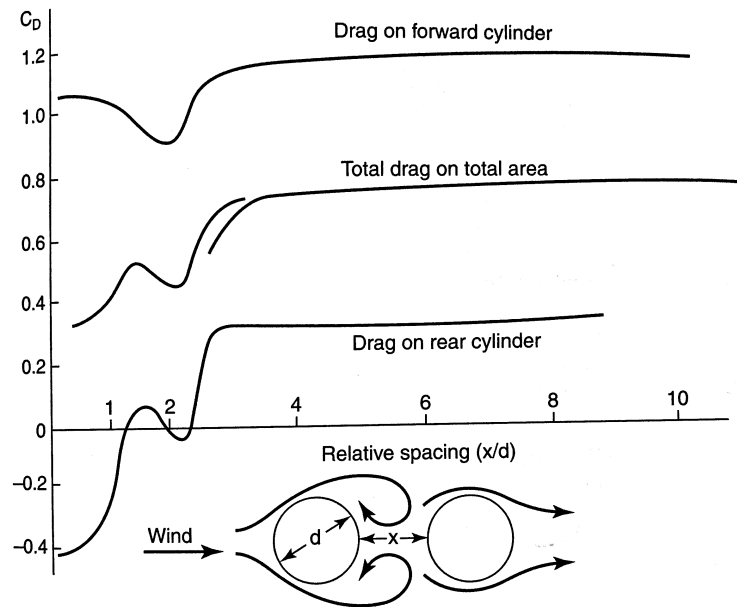


Figura 3.5: Coeficiente de Arrasto de dois cilindros circulares dispostos um atrás do outro. Fonte: [23], p.199.

3.2 FISILOGIA NO CICLISMO

O fornecimento de potência pelo atleta depende fontes de energia anaeróbicas e aeróbicas. A energia aeróbica é "ilimitada" em termos de capacidade, porém limitada em taxa, ao passo que a energia anaeróbica é limitada em capacidade, mas permite taxas muito maiores. Um dos modelos de fornecimento de potência é baseado na potência crítica, em que $CP \leq u(t) \leq u_{max}$ em que, CP é potência crítica que o atleta consegue sustentar por meio da energia aeróbica e u_{max} é a máxima potência que o atleta consegue produzir com energia anaeróbica [15].

Fisiologicamente, a potência crítica é importante exatamente para definir o limite entre os diferentes níveis do exercício físico. Abaixo do CP, no domínio considerado como intensidade pesada, o metabolismo muscular apresenta valores estacionários de concentração de PCr, pH, lactato e consumo de oxigênio. Em contrapartida, acima do CP, para intensidade considerada grave, o comportamento dessas variáveis deixa de ser estacionário e, apesar de o fornecimento de energia externa permanecer constante, a eficiência muscular é perdida, devido a menor oxigenação, concentração de PCr e acúmulo de lactato no sangue.

O conhecimento do CP de um atleta é bastante importante para que se possa calcular o melhor tempo possível em uma determinada distância e para considerar, táticas, posições e

ritmos a serem implantados à fim de otimizar a performance do atleta [14] . Uma curiosidade sobre a potência é de que, em uma bicicleta tandem, cada um dos atletas fornecendo cerca de 750W consegue-se atingir uma velocidade de cerca de $100km/h$ e para que um ciclista sozinho atingisse essa velocidade seria preciso gerar cerca de 6 vezes essa potência, o que é impossível para um ser humano [8].

Para que se tenha uma ideia da ordem de grandeza da potência no esporte, ciclistas de perseguição registraram potência variando de 331 a 449W com cadências na faixa de 103 a 125rpm [8]. Ciclistas profissionais conseguem manter uma potência de mais de 300W por um período de uma hora. Eddy Merckx, por exemplo, um dos maiores ciclistas da história do esporte, registrou o fornecimento da maior potência durante 1 hora, 440W.

Ao se tratar da cadência desenvolvida pelo ciclista ao pedalar, ou seja, o número de rotações por minuto, a experiência é um fator importante, uma vez que ciclistas experientes tendem a andar em uma cadência média acima de 90rpm, enquanto ciclistas de passeio preferem taxas inferiores [8]. Os ciclistas geralmente giram em cerca de 90 rpm quando ultrapassam os 200W de potência [8]. A força que um músculo pode exercer é inversamente relacionada com a velocidade do encurtamento, tempo que o músculo leva para contrair e relaxar novamente. Essa relação fica mais nítida na tentativa de se imprimir cadências altas.

Não existe um estudo que comprove uma cadência ideal, porém alguns estudos nesta área apontam uma faixa ideal de cadência entre 90 a 105rpm. De acordo com [8], essa faixa minimiza as forças periféricas e, portanto, a fadiga dos músculos periféricos em comparação a outras rotações como 40, 50 e 120rpm. Em contrapartida, outros estudos apontam que uma cadência ótima é da ordem de 120rpm, como apresentado em [20] e se pode observar na Fig 3.6, em que a potência é máxima para cadências desta ordem.

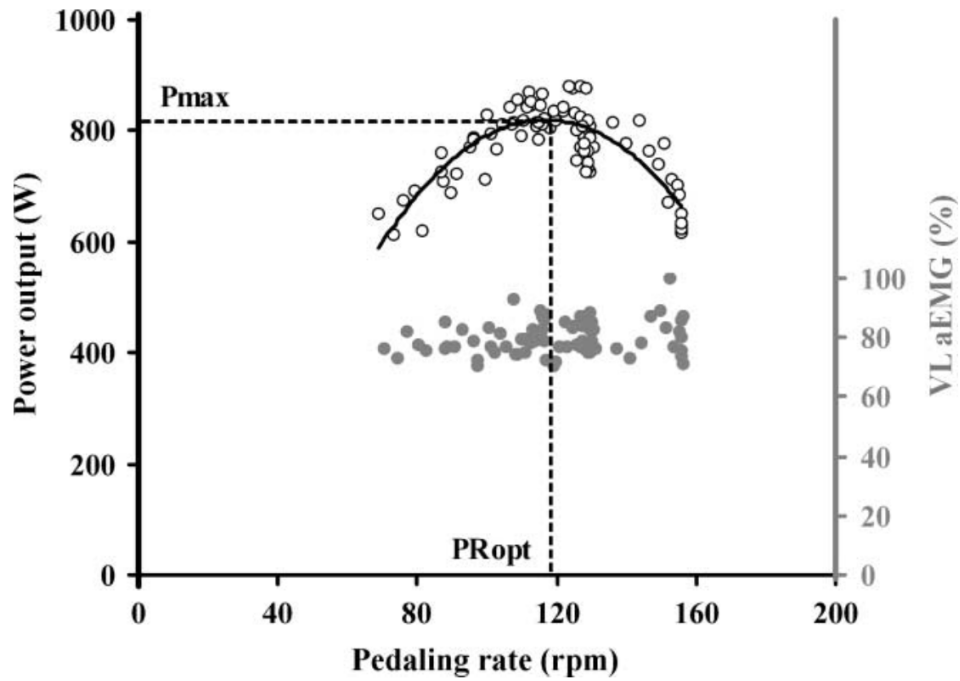


Figura 3.6: Potência gerada em função da rotação dos pedais. Fonte: [20], p.683.

Ao mesmo tempo, analisando-se a Fig 3.6, nota-se que o acréscimo da cadência acarreta em um decréscimo da potência gerada. Esse fato ocorre por vários motivos como, por exemplo, a incapacidade do músculo de aplicar força na posição ideal durante a rotação do pedal. Na Fig 3.7 pode-se notar a diferença entre as potências instantâneas para cadências de 123rpm e 170rpm.

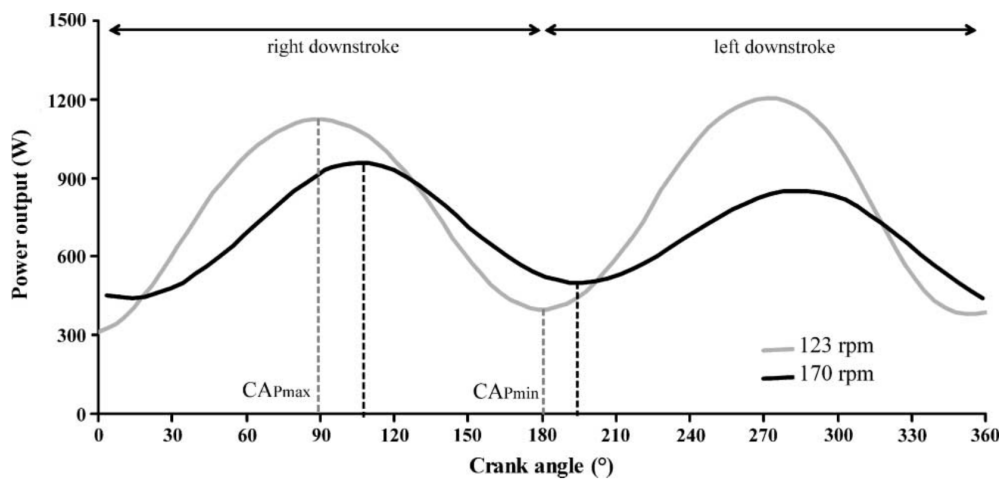


Figura 3.7: Potência instantânea para 120rpm e 170rpm. Fonte: [20], p.683.

3.3 ALGORÍTMO GENÉTICO NO MATLAB

Para a otimização deste estudo, implementou-se um código de algoritmo genético (GA) do programa MATLAB à rotina de cálculos desenvolvida. Ao final da execução do código, espera-se obter valores de potência ideais para que se atinja a máxima velocidade possível no percurso.

O algoritmo genético no MATLAB funciona da seguinte maneira:

- O algoritmo começa criando uma população inicial de forma randômica.
- O algoritmo então cria uma sequência de novas populações. A cada passo, o algoritmo utiliza os indivíduos na geração atual para criar a próxima. Para criar a próxima geração, o algoritmo segue uma sequência de etapas, que são:
 - Cria um ranking com cada membro da população atual calculando seu valor de aptidão. Esses valores são chamados de aptidão bruta.
 - Ranqueia os valores brutos de aptidão para convertê-los em uma gama de valores mais útil. Esses valores são chamados de valores de expectativa.
 - Seleciona membros, ou seja, os pais, baseado em suas expectativas.
 - Seleciona alguns indivíduos como elite com menor aptidão da população atual. Esses indivíduos são, então, passados para a próxima geração.
 - Produz crianças a partir dos pais. Tais crianças são produzidas por meio de mutação, fazendo mudanças randômicas em um único pai, ou por *crossover*, combinando as entradas vetoriais de um par de pais.
 - Substitui a população atual pelas crianças para formar uma nova geração.
- O algoritmo finaliza quando um critério de parada é atingido.

Na Fig 3.8 pode-se observar uma população inicial criada randômicamente pelo programa MATLAB.

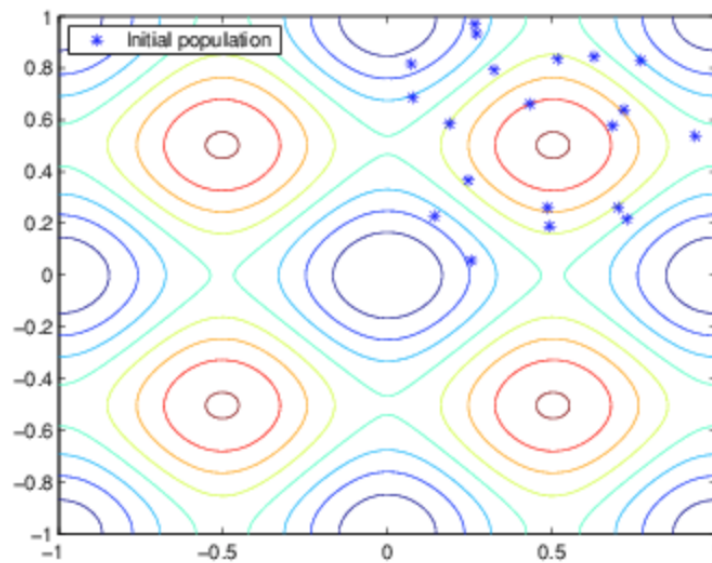


Figura 3.8: População Inicial gerada pelo MATLAB. Fonte: [13]. Acesso em: 20 Set. 2017

O algoritmo genético, a cada etapa, usa a população da geração atual para criar os filhos que farão parte da geração seguinte. O algoritmo seleciona um grupo de pais da população atual, que contribuem com seus genes para seus filhos. Usualmente, o programa seleciona os indivíduos mais aptos como os pais e cria três tipos de filhos para a próxima geração descritos a seguir e ilustrados na Fig 3.9:

- Filhos de elite: indivíduos mais aptos que sobreviverão para a próxima geração.
- Filhos de *crossover*: indivíduos a partir da combinação dos vetores de um par de pais.
- Filhos de mutação: indivíduos criados a partir de mudanças randômicas, ou mutações, de um único pai.

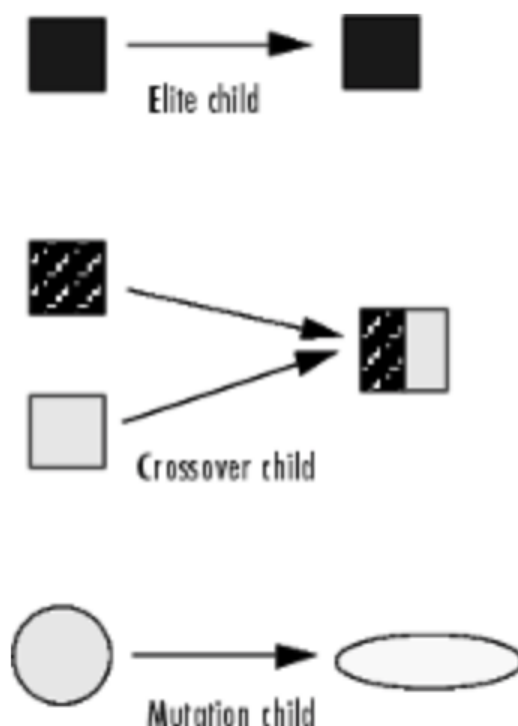


Figura 3.9: Tipos de filhos gerados no algoritmo genético no MATLAB. Fonte: [13]. Acesso em: 20 Set. 2017

É interessante que se saiba a importância da mutação e do *crossover* no algoritmo genético. A mutação aumenta a diversidade de uma população e a probabilidade de o algoritmo gerar indivíduos mais aptos. O *crossover* permite que o algoritmo extraia os melhores genes de diferentes indivíduos e os recombine em crianças potencialmente superiores. A Fig 3.10 mostra os filhos da população inicial, ou seja, a segunda geração, e destaca os três diferentes tipos.

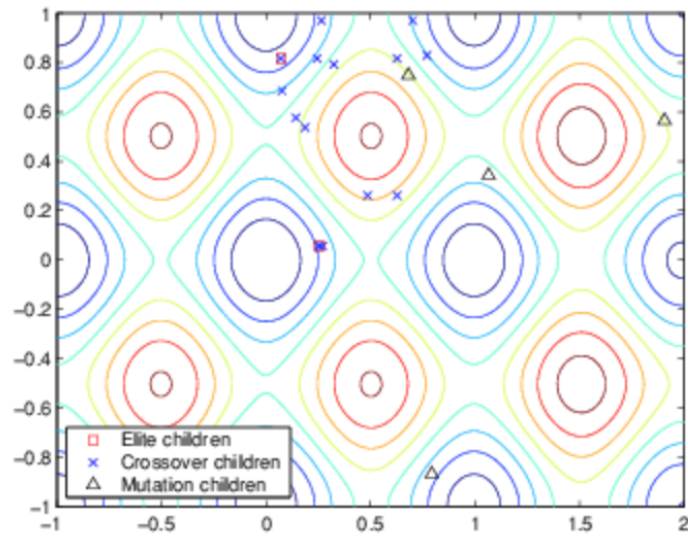


Figura 3.10: Representação dos filhos da população inicial. Fonte: [13]. Acesso em: 20 Set. 2017

Nota-se nas figuras a seguir como o algoritmo genético avança ao longo das gerações, em busca de um ponto mínimo global. As Figuras 3.11, 3.12, 3.13 e 3.14 mostra a população da iteração 60, 80, 95 e 100, respectivamente.

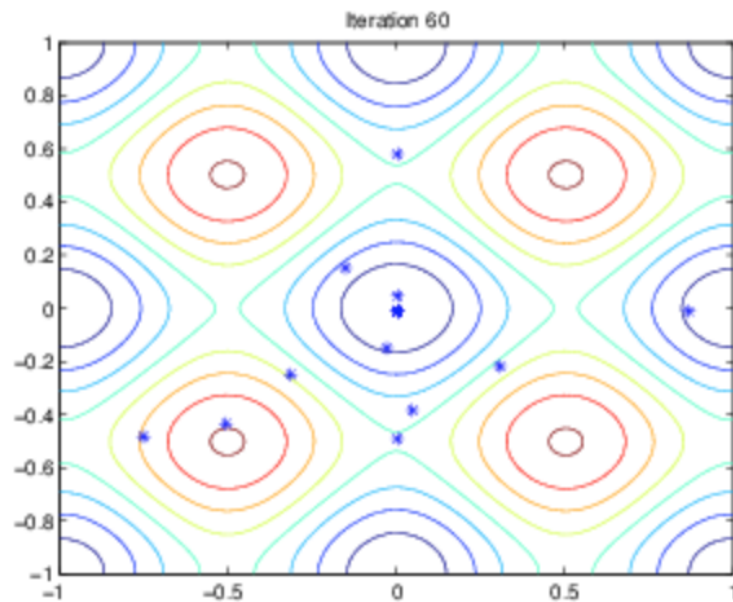


Figura 3.11: Evolução da população no GA - Iteração 60. Fonte: [13]. Acesso em: 20 Set. 2017

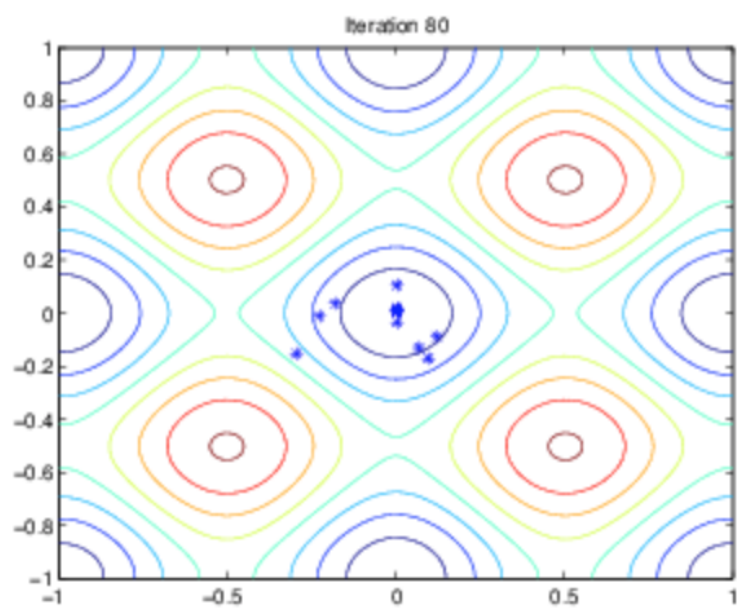


Figura 3.12: Evolução da população no GA - Iteração 80. Fonte: [13]. Acesso em: 20 Set. 2017

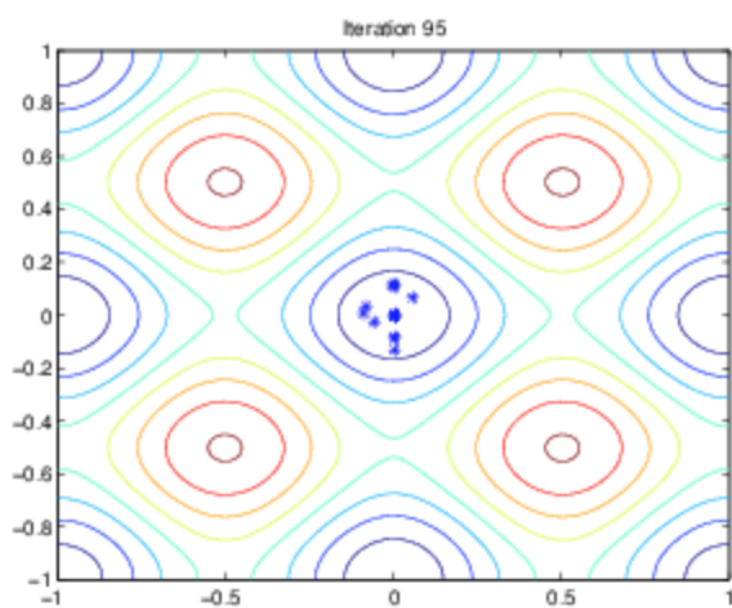


Figura 3.13: Evolução da população no GA - Iteração 95. Fonte: [13]. Acesso em: 20 Set. 2017

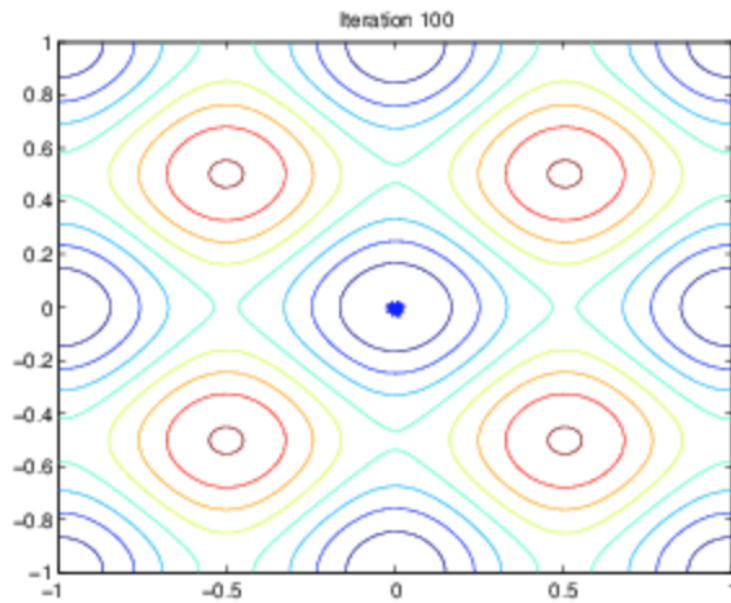


Figura 3.14: Evolução da população no GA - Iteração 100. Fonte: [13]. Acesso em: 20 Set. 2017

Por fim, o GA deve possuir um ponto de parada. Do contrário, ele ficaria rodando o código infinitamente. Dessa forma, é possível adotar alguns parâmetros de parada, ou então, deixar os parâmetros padrões do código. Alguns dos parâmetros são:

- Número de gerações: parada ao atingir número de gerações especificado.
- Tempo limite: parada ao atingir o tempo limite especificado em segundos.
- Valor limite de aptidão: parada quando o valor da função objetivo na população atual é menor ou igual ao valor limite de aptidão.
- Tolerância da função: parada quando a mudança média do valor da função objetivo ao longo das gerações é menor do que a tolerância pré-estabelecida.

4 METODOLOGIA

Como mencionado anteriormente, o objetivo deste estudo é desenvolver uma rotina de cálculo capaz de integrar a trajetória percorrida por dois ciclistas atletas e os parâmetros que descrevem tal problema e que influenciam no rendimento deles, tais como aerodinâmica, consumo energético, transmissão de potência etc. Além disso, implementou-se nesta rotina um código de algoritmo genético da própria ferramenta MATLAB, retornando valores de potência adequados a cada trecho do percurso para que a velocidade final seja a máxima possível.

4.1 ESTRUTURA DO CÓDIGO

A seguir será detalhada a estrutura do código desenvolvido com algumas breves explicações para melhor entendimento dos interessados. Primeiramente, é importante notar que o programa foi subdividido em duas rotinas, uma principal e uma subrotina.

- Programa principal que chama a sub-rotina trajetória e possui uma chave *switch* para executar a análise de interesse.
- Sub-rotina trajetória que executa a integração numérica.

ROTINA PRINCIPAL

A rotina principal foi desenvolvida basicamente para executar a sub-rotina trajetória. Ela foi desenvolvida de tal forma que fosse possível a análise dos resultados de três formas diferentes, porém com o mesmo objetivo final, a velocidade final máxima atingida. Desta forma, o programa foi escrito da maneira a seguir:

```
1
2 %% Main code which runs 3 different analysis.
3 option = 2 %For GA analysis
4     switch option %switch key to select the option to run
5     case 1
6         p = [P1 P2 P3 P4 P5 P6 P7 P8 P9 P10] %Input Power of the cyclists ...
              (specified by the coder)
```

```

7         final_vel = trajectory(p)
8     case 2
9         FitFcn = @trajectory;    %Runs Genetic Algorithm Code
10        nvars = 10;
11        LB = [0 0 0 0 0 0 0 0 0 0]; %Lower Boundary
12        UB = [1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000]; %Upper ...
           Boundary
13        [p, fval, exitflag, output] = ga(FitFcn,nvars,[],[],[],[],LB,UB);
14    case 3
15        p= 0    %Executes the case with the parameters from strava data
16        final_vel = trajectory(p)
17 end

```

O caso 1 executa a sub-rotina trajetória ao alimentar o código a partir de um input de dez potências. Tais potências são dadas de forma conveniente, como por exemplo, as potências obtidas como resultado do algoritmo genético, com o objetivo de se obter a máxima velocidade final.

O caso 2 executa a rotina que envolve o código de algoritmo genético. Aqui é interessante falar um pouco sobre como este código funciona. Como mencionado anteriormente na seção 2.3, o algoritmo genético é um método para desenvolver problemas de otimização com ou sem restrição com base em um processo de seleção natural que imita a evolução biológica. O algoritmo modifica repetidamente uma população de soluções individuais. A cada etapa, o algoritmo seleciona aleatoriamente indivíduos da população atual (no caso a análise é de como deve ser o fornecimento de potência dos ciclistas ao longo da descida), e os utiliza para produzir as crianças para a próxima geração. Ao longo de gerações sucessivas a população "evolui" para uma solução ótima, ideal, que é exatamente o foco deste estudo.

No código desenvolvido, a função objetivo é a função da trajetória, que é exatamente a sub-rotina desenvolvida. Desta forma, ela é a função fitness, ou seja, aquela que se busca otimizar. A seguir, deve-se especificar o número de variáveis envolvidas, no caso, foram dez. Este número é exatamente em quantos trechos a descida foi separada, a fim de otimizar o fornecimento de potência em cada um dos trechos em questão. Além disso, é importante especificar as condições de contorno do problema, que no caso são os valores LB ("*Lower Boundary*") e máximos UB ("*Upper Boundary*") considerados para a potência. Executa-se então a função algoritmo gené-

tico, que é dada por g_a , como se pode observar no código do programa principal apresentado acima.

Por fim, ainda sobre o caso 2, é importante explicar um pouco de como funciona a função g_a no software MATLAB. Primeiramente, é importante notar que ela lida diferentemente restrições e limites lineares das restrições não lineares. Isso, porque todas restrições e limites lineares são satisfeitos em toda otimização ao passo que a g_a pode não satisfazer todas as restrições não lineares em todas as gerações. Também é importante notar que a função é padronizada para realizar mutações e crossover, que geram apenas pontos viáveis, para produzir novos indivíduos a cada geração.

O caso 3, executa a sub-rotina com base nos valores de potência e velocidade obtidos pelo aplicativo Strava⁴. Esse caso é interessante para que seja possível fazer uma comparação do resultado obtido pelos dados importados do Strava com os resultados obtidos da rotina de cálculo desenvolvida para o programa. A partir dessa comparação pode-se observar o quão calibrada é a rotina de cálculo desenvolvida e assim executar o caso 2, para que o programa retorne um cenário ideal de aplicação de potência ao longo da descida dos atletas para que eles atinjam a velocidade máxima final.

SUBROTINA TRAJETÓRIA

A subrotina trajetória desenvolvida nada mais é do que um código que executa uma função trajetória que funciona a partir de um *loop* até que se atinja uma posição final especificada, retornando uma velocidade máxima atingida. Dentro desse código existem outras funções que serão explicadas mais a frente. O código completo da subrotina trajetória pode ser encontrado em 7.1 e a seguir será descrita apenas a estrutura básica desenvolvida.

```
1 function [v_final] = trajectory(p)
2
3 %%INPUT DE DADOS
4 %Input dos valores dos parametros utilizados;
5     %Parametros de massa;
6     %Parametros aerodinamicos;
```

⁴Strava é um aplicativo bastante difundido entre praticantes de esportes para registrar dados das atividades físicas realizadas

```

7      %Parametros mecanicos;
8      etha_transmissao = 0.9;          % transmission efficiency
9      e_roda = 0.04;                  % wheel thickness [m]
10     d_roda = 0.7366;                % wheel diameter [m]
11     %Parametros cinematicos;
12     %Leitura de arquivos.txt para altitude do terreno, coeficiente de arrasto em ...
        funcao do numero de Reynolds, potencia em funcao da posicao (dados do ...
        Strava), velocidade em funcao da posicao (dados do Strava), fornecimento ...
        de potencia do atleta
13     %Leitura para dados de arrasto;
14     CD = readtable('drag.txt');      %Drag coefficient versus Reynolds, ...
        figure 5.8 - Elliptical Strut.
15     CD_re=CD(:,1);
16     CD_cd=CD(:,2);
17     %Leitura de dados de potencia gerados pelo strava;
18     %Leitura de dados de velocidade gerados pelo Strava;
19     %Leitura curva fornecimento de potencia
20     %%FIM DO INPUT DE DADOS
21     _____
22     %%INICIO DA SOLUCAO
23     %%Inicializacao das variaveis da trajetoria
24     t = 0;                          %tempo inicial
25     s = 0;                          %posicao inicial
26     v = v_init;                     %velocidade inicial
27     i = 1;
28     %%Calculo das velocidades angular e em rpm da roda e do pedal
29     %%Calculo das energias iniciais
30     %Energia Rotacional;
31     %Energia Cinetica;
32     %Energia Total;
33     %Energia Potencial
34     %%Inicializando os vetores para gerar graficos
35     %Exemplo:
36     v_g(1) = v_init*3.6;
37     s_g(1) = s;
38     E_mec_g(1) = 0.0;
39     %%Iniciando o Loop
40     %O loop roda os calculos dentro dele ate que se atinja o ponto de parada. No ...

```

```

    caso, definido como a distancia final.
41 while s < distance
42     %Calculo do Reynolds:
43     Re = reynolds(rho,v,L,mu); %Calculo realizado chamando uma funcao a qual ...
        %dei o nome de reynolds e dou como valores de entrada rho,v,L,mu.
44     %Chamada das subrotinas de Energia (Este ponto que varia de acordo com a ...
        %opcao no programa principal - caso 1, 2 ou 3)
45     if p == 0
46         E_athlete = Power_input(s,E_res,del_t,p,PW_d,PW_pw);
47     else
48         E_athlete = Power_input(s,E_res,del_t,p);
49         %Calculo da energia que o atleta ainda possui
50         E_diss = E_exp(E_athlete,del_t, H_P_time,H_P);
51         E_res = E_res - E_diss;
52         E_diss_g(i) = E_diss;
53     end
54     %Calculo da energia potencial
55     %Calculo das rotinas de dissipacao de energia (arrasto e mecanica)
56     %Calculo do Balanco de energia
57     %Calculo da velocidade para o proximo passo do loop:
58     v = (E_tot/(0.5*m+I_w/(pi*d_roda)^2))^(0.5);
59     %Cria-se uma lista semelhante a inicializacao de vetores para gerar ...
        %uma matriz que sera utilizada para geracao de graficos
60     %Exemplo:
61     v_g(i) = v*3.6;
62     s_g(i) = s;
63 end
64 %%FIM DO LOOP
65
66 %Calculos finais: velocidade final, tempo final, distancia final, rotacao ...
    %do pedal final
67 %Geracao das curvas que se julgar interessantes de serem analisadas.
68 end

```

4.2 MODELAMENTO DO PROBLEMA

O modelamento do problema foi feito de acordo com a análise física da Fig 4.1 e a seguir será discutido um pouco sobre cada um dos parâmetros considerados.

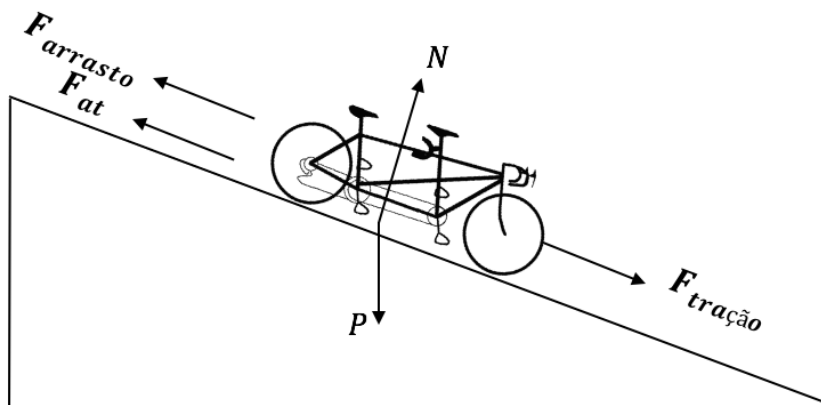


Figura 4.1: Diagrama de Corpo Livre Bicicleta

Os principais pontos a serem observados, em que é possível realizar um estudo de otimização mais aprofundado serão percorridos aqui com maior destaque, sendo eles a aerodinâmica, geração de potência e consumo de energia dos ciclistas.

4.3 AERODINÂMICA

Para a análise do coeficiente de arrasto utilizou-se a curva para uma estrutura elíptica representada na Fig 4.2. Analisando a curva, nota-se que a transição do escoamento laminar para turbulento ocorre quando há uma queda abrupta na curva, no caso, quando ocorre um aumento da velocidade e do número de Reynolds, este atingindo a ordem de 8×10^5 . É importante ressaltar que o posicionamento dos ciclistas foi fixado para a análise, uma vez que o ato de pedalar gera oscilações no coeficiente de arrasto. A análise que descreve mecanismos de fluxos oscilantes é feita pelo número de Strouhal que está relacionado com o número de Reynolds, porém, tais oscilações não foram consideradas neste estudo.

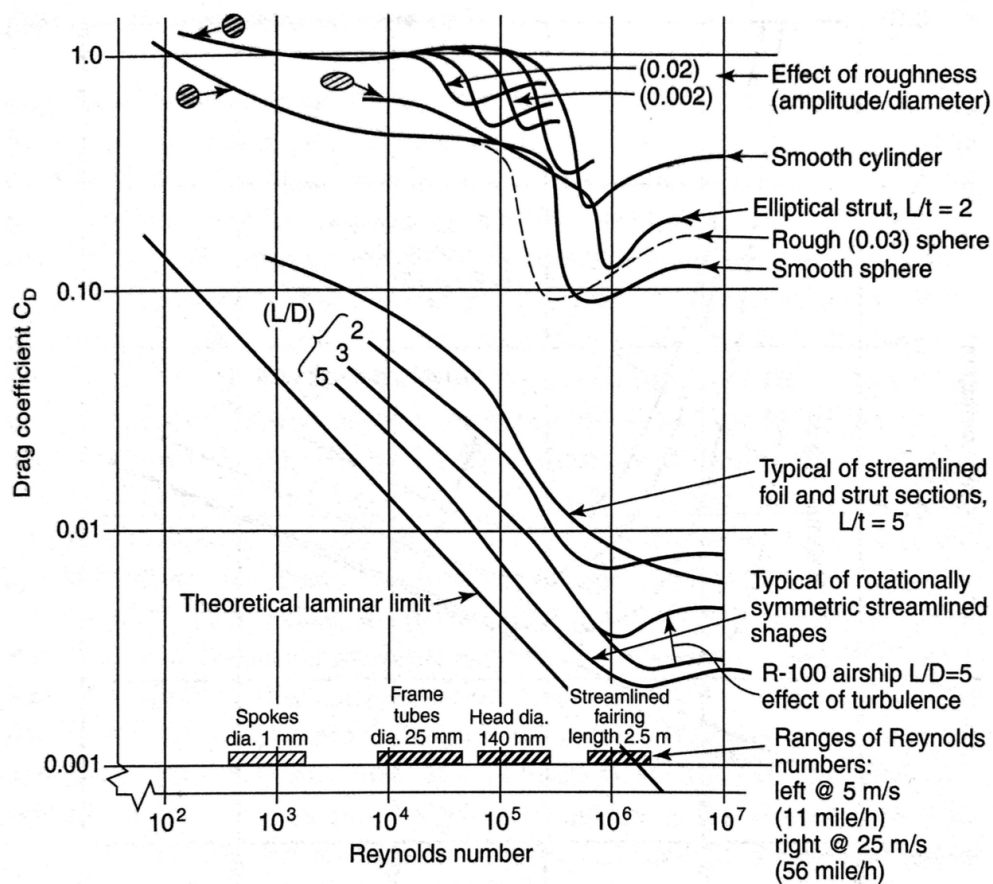


Figura 4.2: Coeficiente de arrasto x Número de Reynolds. Fonte: [23], p.174 (Curva feita por Dave Wilson em Hoerner 1965 e outras fontes)

Para a obtenção e utilização dos dados da curva, utilizou-se de um programa chamado Plot Digitizer, em que você importa a imagem de interesse, cria pontos sobre a curva, especifica os limites de cada um dos eixos e, assim, o programa retorna uma tabela com os dados da curva. A seguir, nas Fig 4.3 e 4.4 pode-se observar o funcionamento do programa:

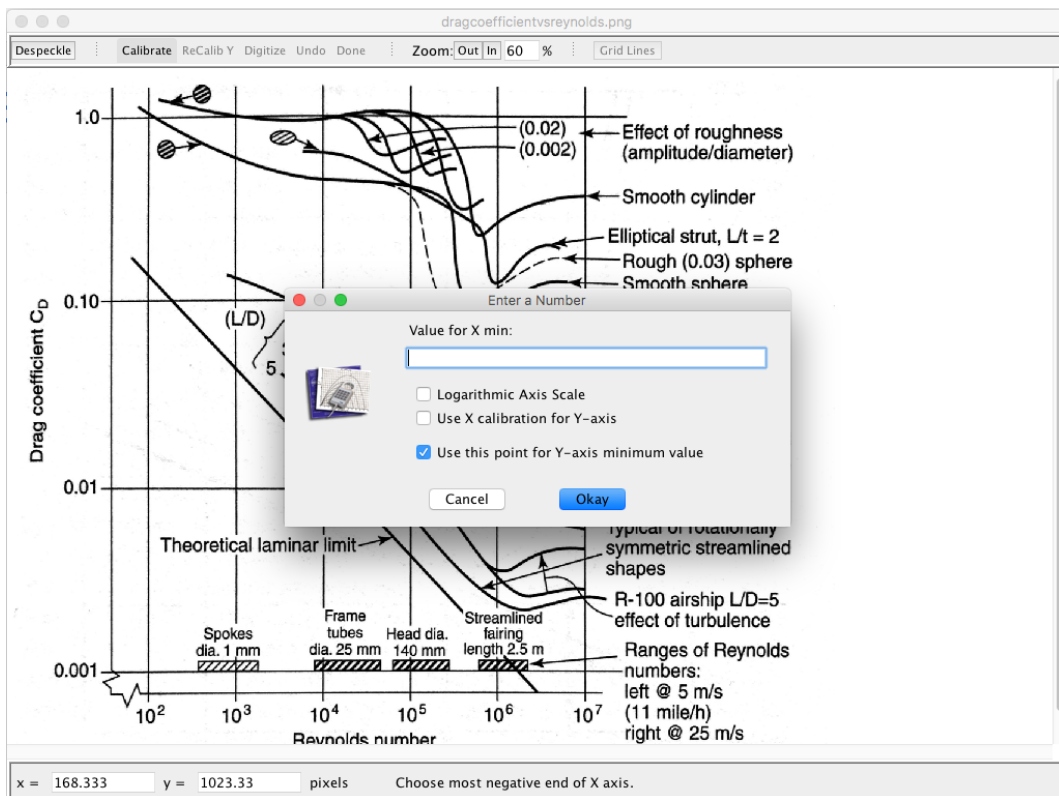


Figura 4.3: Seleção do limite dos eixos

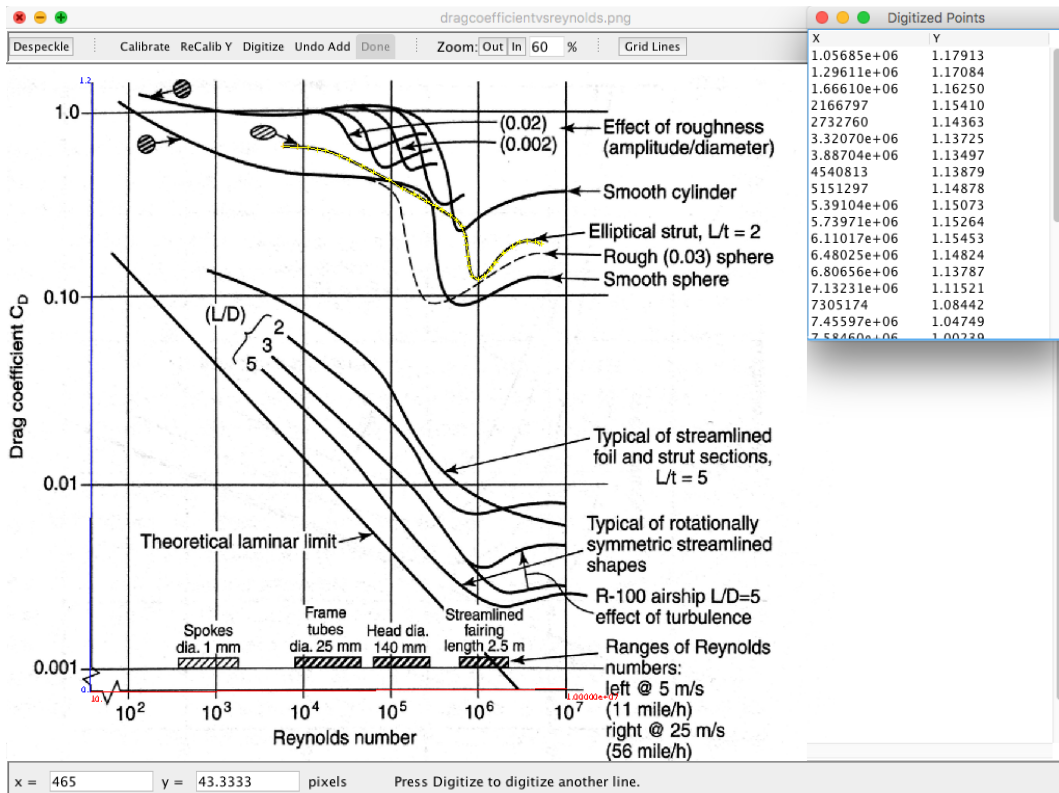


Figura 4.4: Pontos sobre a curva e geração de dados da curva

A cada loop do programa calcula-se um novo número de Reynolds em função da velocidade dos ciclistas e, a partir desse novo valor, determina-se o coeficiente de arrasto para os sucessivos cálculos (força de arrasto e energia dissipada pelo arrasto), fazendo-se uma interpolação com os valores obtidos a partir da curva da Fig 4.2.

4.4 FORÇA PESO E ALTITUDE

Um dos fatores mais significativos no ciclismo é a massa do ciclista e, também, da bicicleta e dos acessórios. Isso é um fato, uma vez que em percursos inclinados, ditos "de montanha", a resistência devido à inclinação se torna o fator principal, sobrepondo-se até mesmo ao arrasto, caso seja uma subida. Além disso, a velocidade do ciclista em uma subida é inferior ao que se teria no plano, reduzindo-se, assim, drasticamente a magnitude do arrasto. Porém, em uma descida, o arrasto é intensificado, uma vez que a velocidade é ainda mais alta.

A resistência devido a inclinação do terreno é baseada no vetor da força peso P (produto da massa pela aceleração da gravidade) do conjunto ciclista e bicicleta. A inclinação é definida tanto pelo ângulo quanto pela razão ao acréscimo ou decréscimo de altitude por unidade de distância percorrida. Usualmente, a inclinação é dada por um gradiente de inclinação dado em porcentagem e, grosseiramente, para cada unidade de porcentagem no gradiente tem-se um acréscimo de meio grau no ângulo de inclinação em relação a horizontal. Para o cálculo, o importante é a componente paralela a superfície da pista, ou seja, $m.g.\sin(\alpha)$, em que α é o ângulo de inclinação.

Neste estudo, a determinação da altitude foi feita a partir dos dados colhidos pelo GoogleEarth, em que foi criada uma tabela com a altitude em função da posição. Desta forma, desenvolveu-se o programa para que ele pudesse determinar a altitude precisa em que os ciclistas se encontrariam a partir de uma comparação com os dados transcritos na tabela de altitude, que se encontra em 7.3.

Simplificadamente o conceito utilizado foi de função de primeiro grau e equação da reta. Desta forma, sabendo que a equação de uma reta é da forma $y = a.x + b$, criou-se uma função em função da posição do ciclista no eixo x e y, que representasse cada uma das variáveis da equação, sendo "x", dado pela posição dos ciclistas no instante, pode-se determinar a altitude. A Fig 4.5 a seguir ilustra a metodologia utilizada e a equação 4.3 a altitude na posição em determinado

instante.

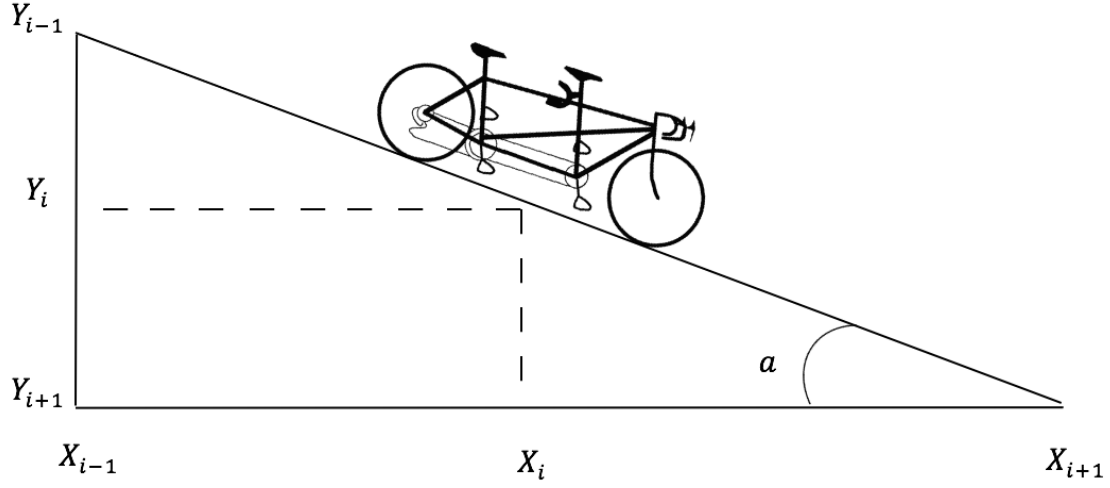


Figura 4.5: Esquema do Modelamento da Altitude

Desta forma, tem-se as seguintes relações:

$$a = \frac{Y_{(i)} - Y_{(i-1)}}{X_{(i)} - X_{(i-1)}} \quad (4.1)$$

$$b = Y_{(i-1)} - \frac{Y_{(i)} - Y_{(i-1)}}{(X_{(i)} - X_{(i-1)}) \cdot X_{(i-1)}} \quad (4.2)$$

resultando, na equação da reta:

$$h_{(i)} = a \cdot x_{(i)} + b \quad (4.3)$$

Vale mencionar aqui que essa metodologia foi utilizada para todos parâmetros analisados e interpolados a partir da leitura de dados de uma tabela.

4.5 EFICIÊNCIA DA TRANSMISSÃO

A transmissão da bicicleta possui duas principais funções: transmitir a potência gerada pelo ciclista favorecendo a velocidade e, em alguns intervalos de velocidade, fazê-la de tal forma

que ou o ciclista esteja transmitindo máxima potência ou uma menor potência com máximo conforto. Porém, de acordo com [23], assim como em todo mecanismo, há uma certa eficiência no processo que varia em função de diversos fatores como, por exemplo:

- A eficiência diminui a medida que o tamanho da coroa da catraca diminui;
- A eficiência diminui a medida que o torque transferido, ou tensão na corrente, diminui;

Infelizmente a eficiência das transmissões por corrente em bicicletas não é tida como um valor preciso, pois envolve a subtração de dois grandes parâmetros calculados de forma imperfeita, potência de entrada ("input") e de saída ("output"), para encontrar uma quantidade bastante pequena. Assim, para o projeto, considerou-se uma eficiência conservadora, de cerca de 90%.

4.6 VELOCIDADE

O projeto todo se resume em atingir a máxima velocidade e para calculá-la criou-se uma rotina baseada nas energias envolvidas durante toda a descida, tanto as energias produzidas, quanto as energias consumidas e dissipadas de alguma forma. Fez-se um balanço dessas energias e, a partir da conservação da energia mecânica do sistema, foi possível determinar a velocidade em cada instante considerado. Sabe-se que essa análise pode ser feita apenas para sistemas que utilizam unicamente forças conservativas, porém, para um modelamento inicial, tal consideração foi feita, mesmo que no caso estudado existam forças de atrito e arrasto que são não conservativas. A seguir cada uma das energias consideradas será explicada e detalhado como seu cálculo foi realizado.

4.6.1 ENERGIA DE ROTAÇÃO DA RODA

A roda em qualquer veículo é extremamente importante, uma vez que é ela quem vai permitir com que a movimentação do mesmo aconteça, que vai estabelecer o contato com o chão, absorver parte das imperfeições etc. Por isso, ainda hoje, é bastante estudada para que melhores ou novos materiais sejam utilizados, buscando o melhor desenho aerodinâmico, maior resistência dentre outras várias características que se deseja de uma roda de qualidade.

No ciclismo, os estudos das rodas também são bastante intensos, uma vez que elas devem ser bastante leves, rígidas, mas ao mesmo tempo capazes de absorver irregularidades do terreno,

além de possuírem boas características aerodinâmicas. Sabendo que as rodas são importantes fontes de energia de rotação, decidiu-se por calcular o momento de inércia das rodas utilizadas, assim como suas velocidades angulares à fim de determinar a energia delas a cada instante. Assim, seguiu-se a seguinte rotina de cálculo apresentada nas equações 4.4, 4.5 e 4.6 a seguir adotando a simplificação para o modelo de massa concentrada, desconsiderando a massa da catraca, sem grandes perdas para a análise.

- Cálculo do Momento de Inércia (para um aro):

$$I = m_{roda} \cdot r_{roda}^2 \quad (4.4)$$

- Cálculo da Velocidade Angular em determinado instante:

$$\omega_{(i)} = \frac{v_{(i)}}{r_{roda}} \quad (4.5)$$

Em posse desses resultados, pode-se finalmente calcular a Energia Cinética de Rotação de cada roda:

$$K_{rotacao(i)} = \frac{I \cdot \omega_{(i)}^2}{2} \quad (4.6)$$

Vale lembrar que esse resultado deve ser multiplicado por 2 pelo fato de serem duas rodas.

4.6.2 ENERGIA CINÉTICA

A energia cinética está relacionada ao movimento de um corpo, independentemente de qual seja ele. Desta forma, deve-se também levar em consideração seu cálculo, uma vez que, no caso do ciclismo, ela é uma das energias predominantes no sistema ciclista-bicicleta. O seu cálculo é bastante direto, bastando que se tenha a massa do conjunto ciclista-bicicleta e a velocidade a cada instante. Desta forma, a energia cinética foi calculada como mostrado na equação 4.7:

$$K_{(i)} = \frac{m_{total} \cdot v_{(i)}^2}{2} \quad (4.7)$$

Uma vez calculada a energia cinética do conjunto, deve-se adicionar a energia cinética de

rotação de cada roda calculada para que se tenha uma energia cinética total. Ou seja, somando-se as equações 4.6 e 4.7, obtém-se a equação 4.8:

$$K_{total(i)} = 2.K_{rotacao(i)} + K_{(i)} \quad (4.8)$$

É importante notar que a energia devida à rotação das rodas é bastante pequena se comparada a do conjunto ciclista-bicicleta, fato este que corrobora com a ideia de se utilizar o modelo de massa concentrada para o cálculo do momento de inércia da roda, desconsiderando a massa da catraca.

4.6.3 ENERGIA DOS CICLISTAS

A energia que os ciclistas conseguem produzir está diretamente relacionada à potência gerada por eles. Visando uma base mais sólida para o estudo realizou-se um teste conhecido como "Teste Wingate". Esse teste é o padrão que se utiliza para medir potência de atletas amadores e profissionais ao utilizarem uma potência anaeróbica, que é a potência instantânea e que não necessita de oxigênio nas células do corpo. O protocolo típico para o teste consiste na utilização de um ergômetro precisamente freado por uma banda de fricção à peso. O ciclista deve permanecer sentado durante todo o teste, pedalando a $60rpm$ sem resistência. Subitamente aplica-se uma resistência de 8,5% a massa do ciclista e ele deve pedalar com máxima força e rotação possível durante 30 segundos.

O aparelho onde o teste foi feito no Laboratório de Fisiologia da Faculdade de Educação Física (FEF), da Universidade de Brasília, é capaz de realizar medições de potência, velocidade, rotação a cada segundo do teste. Além desse registro a cada segundo, o aparelho registra três números determinantes: a velocidade média (baseada no total de rotações da roda do ergômetro durante todo o teste), as velocidades máximas e mínimas. A partir dessas informações e da carga aplicada o dispositivo calcula as potências média, máxima e mínima. Finalmente, calcula-se também o índice de fadiga, em porcentagem, a partir da queda entre as potências máxima e mínima registradas. A Fig 4.6 a seguir mostra o aparelho utilizado e a realização do teste Wingate.



Figura 4.6: Teste Wingate realizado no Laboratório de Fisiologia da Faculdade de Educação Física da Universidade de Brasília

O teste Wingate é bastante importante para que se conheça os limiares entre as fontes de energia por vias rápidas, anaeróbica, e por vias mais lentas, aeróbica. Assim, de forma grosseira, pode-se dizer que a potência máxima corresponde às reservas imediatas de energia do ciclista enquanto a potência mínima se aproxima à potência máxima por vias glicolíticas, aeróbicas. Porém, esse é apenas um dos possíveis testes a serem feitos e para compreender melhor esse ponto de transição, assim como o consumo energético do ciclista. Portanto, é interessante que seja feito um outro teste, conhecido como Espirometria, aberta ou fechada, em que se mede a capacidade máxima de oxigênio do ciclista ($VO_{2máx}$) e a concentração de lactato no sangue do atleta.

Neste estudo foi considerado que os atletas utilizam apenas energia de reserva anaeróbica, uma vez que o tempo de esforço é curto o suficiente para tal consideração ser válida. A análise de potência foi feita de duas formas: uma a partir de dados obtidos do Strava, Fig 4.7 e outra a partir de dados de uma curva de geração de potência para atletas ditos de "primeira classe",

Fig 4.8. A análise com os dados obtidos pelo Strava é importante para verificar a calibração a partir do resultado do código comparado com os dados obtidos pelo Strava. Já a curva dos atletas de primeira classe foi usada a partir de uma interpolação, assim como foi feito para a altitude, para determinar a energia gasta pelo atleta a partir do tempo que ele permaneceu em determinada potência.

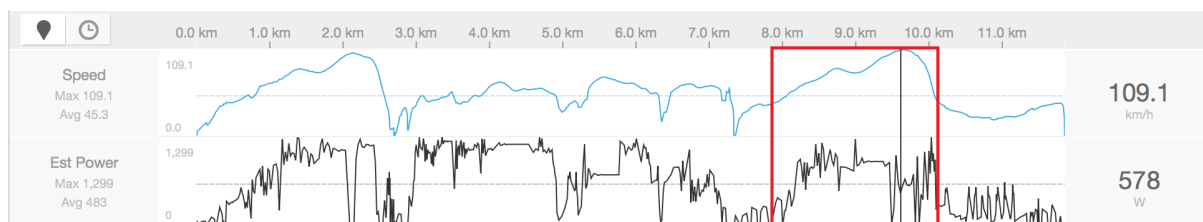


Figura 4.7: Velocidade x Posição, Fonte: Strava

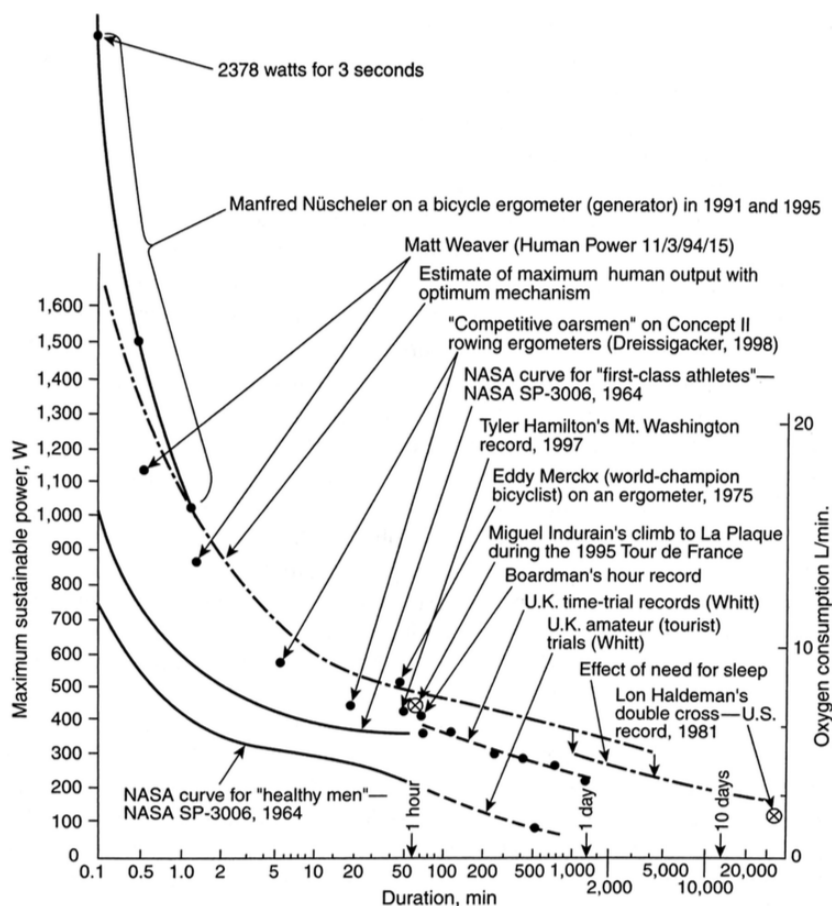


Figura 4.8: Potência x Tempo (curva utilizada NASA SP3006,1964). Fonte: [23], p. 44

4.6.4 ENERGIA POTENCIAL

A energia potencial está associada com a configuração (arranjo) de um sistema de objetos que exercem forças entre si [12]. Essa é uma definição bastante formal e genérica. No estudo, o interesse é principalmente na energia potencial gravitacional, que está associada com o estado de separação entre dois objetos que se atraem através da força gravitacional, no caso, o conjunto ciclistas-bicicleta e a Terra. Sendo assim, daqui em diante, ao se falar energia potencial entenda como sendo a gravitacional.

No caso em estudo, os ciclistas estão em um percurso em que grande parte da sua extensão é em declive e, portanto, a energia potencial armazenada vai sendo gradualmente transformada em energia cinética. Essa análise foi feita para cada intervalo de tempo bastante pequeno. O cálculo da energia potencial foi feito da seguinte forma, como mostra a equação 4.9:

$$U_{(i)} = m_{total} \cdot g \cdot (h_{(i+1)} - h_{(i)}) \quad (4.9)$$

4.6.5 ENERGIA DE ARRASTO

Como já foi discutido na seção 3.1 o movimento dos ciclistas possui uma resistência, que é a força de arrasto, que aponta na mesma direção em que ocorre o escoamento. Devido a essa força, tem-se uma energia associada a ela, a energia de arrasto. Sua determinação é bastante direta uma vez que a força de arrasto já foi determinada bastando apenas que se saiba a posição no instante da medida e no instante logo em seguida, que também é possível de ser calculada. Desta forma, seguiu-se a seguinte rotina de cálculo apresentada pela equação 5.4:

$$E_{arrasto(i)} = F_{arrasto(i)} \cdot (s_{(i+1)} - s_{(i)}) \quad (4.10)$$

em que, a posição no instante seguinte é dada pela equação 4.11:

$$s_{(i+1)} = v_{(i)} \cdot (t_{(i+1)} - t_{(i)}) + s_{(i)} \quad (4.11)$$

4.6.6 BALANÇO DE ENERGIA

A partir das energias dos ciclistas, potencial e arrasto calculadas anteriormente é possível realizar um balanço das energias que são favoráveis ao movimento dos ciclistas e das que são desfavoráveis a ele. Analisando, temos que o balanço de energia pode ser expresso pela equação 4.12:

$$B = E_{ciclista(i)} + U_{(i)} - E_{arrasto(i)} - E_{mecanico(i)} \quad (4.12)$$

em que a perda mecânica considerada foi apenas devido ao atrito, que usualmente apresenta um coeficiente de atrito entre 0,0022 e 0,005, para bicicletas. Utilizou-se o coeficiente mais conservativo, ou seja, o maior deles, no caso, $C_{rr} = 0,005$.

4.6.7 ENERGIA MECÂNICA

O conceito utilizado no projeto foi o do princípio de conservação da energia mecânica. Inicialmente, é importante entender o que é a energia mecânica de um sistema, que nada mais é que a soma da energia potencial U e da energia cinética K dos objetos que compõem o sistema.

O princípio de conservação da energia mecânica enuncia que em um sistema isolado onde apenas forças conservativas causam variações de energia, a energia cinética e a energia potencial podem variar, mas a sua soma, a energia mecânica, não pode variar [12]. Assim, o princípio é equacionado da seguinte forma:

$$\Delta E_{mec} = \Delta K + \Delta U = 0 \quad (4.13)$$

Desta forma, a partir dos resultados obtidos das análises anteriores, utilizando o princípio apresentado acima e considerando que toda energia se encontra na forma cinética pode-se finalmente determinar a velocidade dos ciclistas ao fim do instante considerado como mostra a equação 4.14 a seguir:

$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot K_{total,2}}{m_{total}}} \quad (4.14)$$

em que $K_{total,2}$ é a energia cinética total do sistema ao fim do intervalo de tempo analisado.

4.6.8 ROTAÇÃO DO PEDAL

Por fim, a rotação no ciclismo é fundamental para a manutenção do movimento dos ciclistas. Um dos maiores problemas na primeira tentativa da quebra do recorde foi a perda de rotação dos ciclistas a cerca de $160rpm$. Desta forma, implementou-se no código uma perda de eficiência na geração de potência para cadências superiores a $120rpm$, para que o cenário obtido fosse mais próximo do real. Assim, a rotação foi determinada a partir da equação 4.15 e o decréscimo na eficiência de acordo com a equação 4.16.

$$\omega_{rpm} = \frac{60.\omega}{\frac{N_{coroa}}{N_{catraca}}.2.\pi} \quad (4.15)$$

$$E_{atleta} = \frac{E_{atleta}.120}{\omega_{rpm}} \quad (4.16)$$

4.7 ALGORÍTMO GENÉTICO

Neste estudo, foram utilizados os critérios padrões de parada do GA no MATLAB, que podem ser encontrados em [13]. Além disso, a análise foi feita para dez variáveis, uma vez que a descida foi dividida em 10 trechos de cerca de 200m cada, e para cada um dos trechos o algoritmo deve retornar uma potência ideal a ser gerada pelos ciclistas.

É necessário que se especifique as condições de contorno da variável em questão, no caso a potência. Desta forma, considerou-se uma potência mínima, *lower boundary (LB)* como sendo $400W$ e uma potência máxima, *upper boundary (UB)* como sendo $1000W$.

4.8 VALORES DOS PARÂMETROS

A seguir a tabela 4.1 contém todos os dados de massa utilizados no problema. É importante ressaltar que as massas utilizadas são as informadas pelos atletas.

Tabela 4.1: Dados de Massa

Dados de Massa [kg]				
m_{weimar}	m_{adauto}	m_{roupas}	$m_{bicicleta}$	m_{roda}
75	65	1.4	12	0.8

Em seguida, a tabela 4.2 apresenta os dados utilizados para os parâmetros aerodinâmicos em que o coeficiente de arrasto é apenas o valor inicial e a massa específica do ar média em Brasília. Ao longo do código, o coeficiente de arrasto foi determinado a partir do número de Reynolds.

Tabela 4.2: Dados Aerodinâmicos

Dados Aerodinâmicos				
ρ_{ar}	μ_{ar}	L	A	C_D
1,205	0,000018	0,6	0,3	0,2

A tabela 4.3 apresenta os dados mecânicos dos componentes que foram utilizados na primeira tentativa. Os componentes são: rodas modelo Zipp 404 e uma relação de 61x11. A eficiência da transmissão foi adotada como 0,9 para que se utilize um valor conservador, como explicado na seção 4.5.

Tabela 4.3: Dados Mecânicos

Dados Mecânicos					
η	e_{roda}	d_{roda}	N_{coroa}	$N_{catraca}$	C_{rr}
0,9	0,04	0,7366	61	11	0,005

Considerou-se que o percurso foi iniciado com uma velocidade de $43,89 km/h$, dado retirado do Strava. Além disso, adotou-se um modelo energético dos ciclistas, similar a uma caixa d'água, onde a energia total disponível é apenas consumida e que não há uma reposição da mesma, o que é uma boa aproximação para exercícios de curta duração, ou seja, a energia final dos ciclistas, ou energia reserva E_{res} , deve ser 100% consumida. A tabela 4.4 mostra os valores considerados.

Tabela 4.4: Dados Cinemáticos

Dados Cinemáticos							
v	U	t_0	s_0	s_{final}	Δt	g	E_{res}
43,89	0	0	0	1822	0.1	9,8	1,0

5 ANÁLISE E RESULTADOS

5.1 CALIBRAÇÃO DO CÓDIGO

Para uma boa análise deste estudo é importante que o programa esteja bem calibrado. O bom funcionamento da integração da trajetória, que resulta em um perfil de altitude igual ao da descida em questão é essencial. Para isso, traçou-se o perfil de altitude no MATLAB para analisar se o resultado era satisfatório ou não. Para isso, comparou-se tal perfil Fig 5.1 com o obtido pelo Strava, Fig 5.2, e nota-se que ambas as curvas apresentam o mesmo padrão, comprovando o fato de que a análise da altitude está correta.

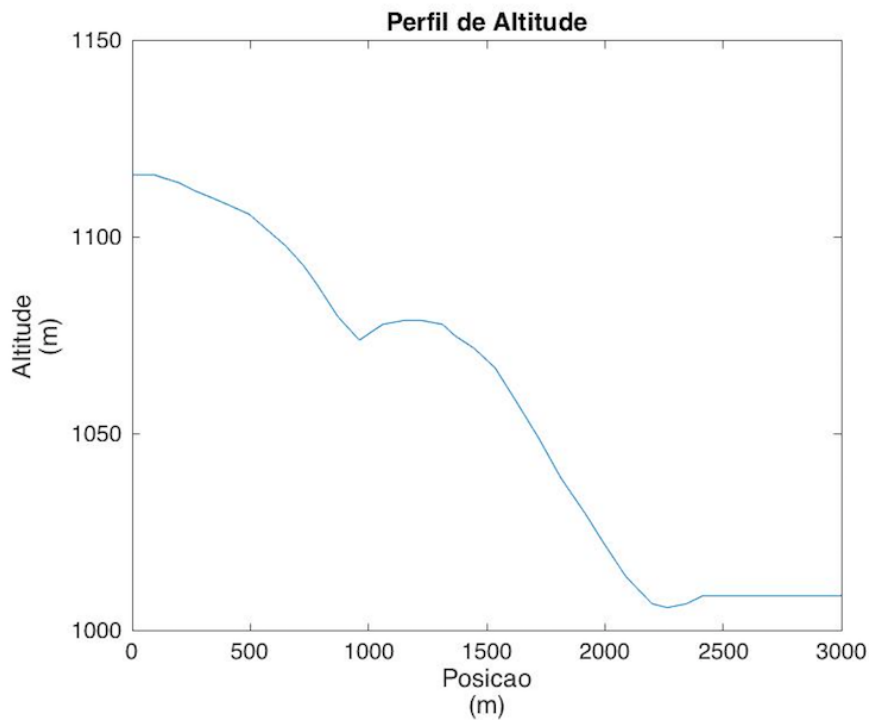


Figura 5.1: Perfil de Altitude Matlab

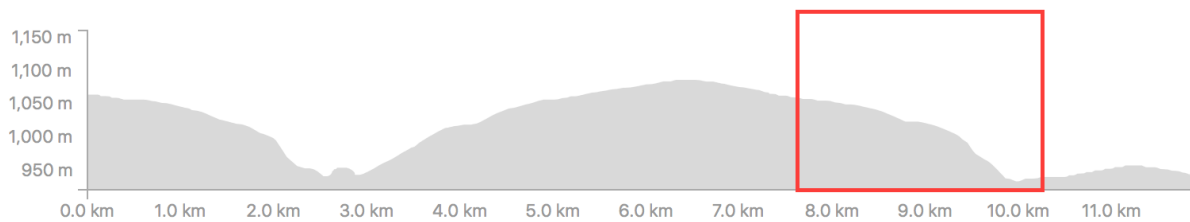


Figura 5.2: Perfil de Altitude Strava

Além da curva de altitude é importante determinar os resultados finais de interesse e

compará-los aos obtidos pelo Strava. Para isso, executa-se a rotina principal do código com a opção 3 da chave seletora *switch*. A partir dessa análise, obtém-se o seguinte resultado para a velocidade dos atletas em função da posição, apresentados na Fig 5.3.

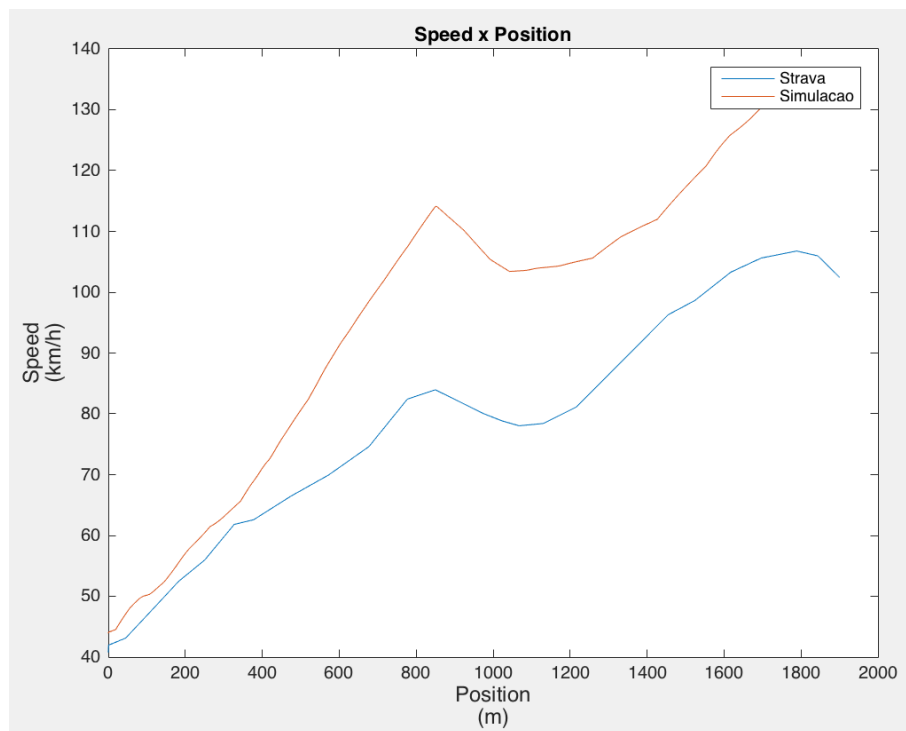


Figura 5.3: Velocidade em função da Posição - Dados do Strava x Código

A partir da Fig 5.3 nota-se que o resultado obtido pela simulação estava bastante superior ao real, obtido pelo Strava. Pelo fato de o arrasto corresponder a maior parte das forças sobre os ciclistas, principalmente em altas velocidades, analisou-se primeiramente a coerência dos fatores aerodinâmicos. Havia-se considerado o conjunto ciclista-bicicleta como sendo um corpo elipsóide, cujos dados experimentais utilizados foram da curva para corpos elípticos da Fig 4.2. Porém, de acordo com [7], um elipsóide tem o efeito de redução do coeficiente de arrasto em virtude da mudança da camada limite de laminar para turbulenta. Acredita-se que o mesmo não ocorra para a bicicleta, dada a grande quantidade de dispositivos que a compõe, seja a roda girando, escoamento passando pelos raios e a própria geometria, que certamente fazem com que o escoamento seja turbulento. Assim, alterou-se os dados dos coeficientes de arrasto e obteve-se o seguinte resultado apresentado na Fig 5.4.

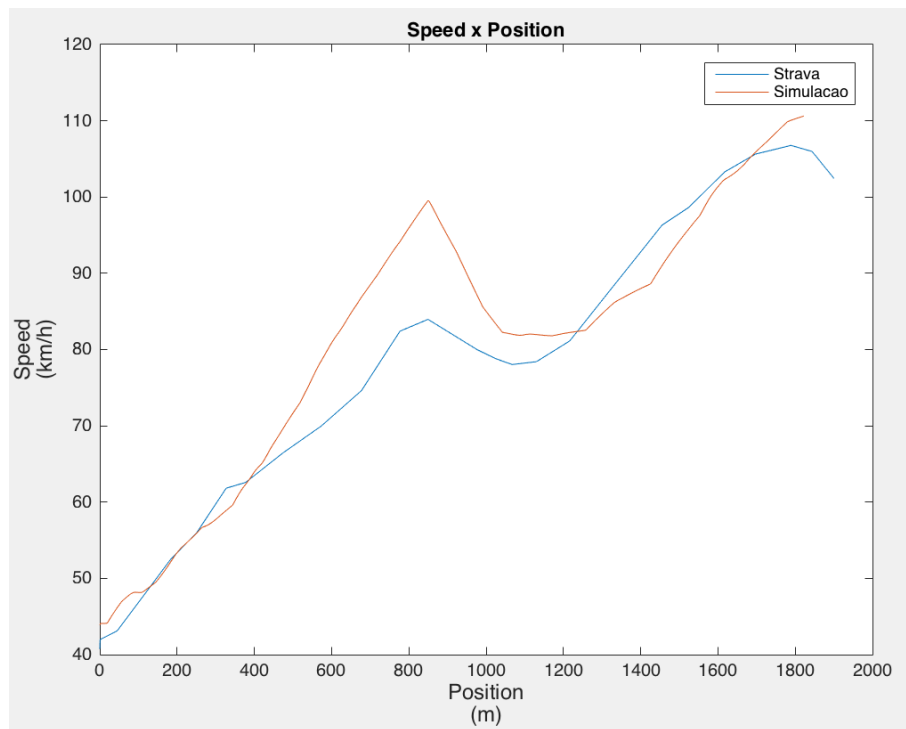


Figura 5.4: Velocidade em função da Posição - Dados do Strava x Código com alterações no coeficiente de arrasto

Nota-se que a curva do coeficiente de arrasto em função do Reynolds, Fig 5.5 continua com o mesmo padrão da elipsoide, porém mais suave e com valores para o coeficiente de arrasto superiores. O trecho em que há uma queda do C_D é o ponto em que há transição do escoamento laminar para turbulento. Em geral, os estudos acerca do ciclismo envolvem análises de velocidade até cerca de $70km/h$. A partir dessa velocidade, não se sabe ao certo o comportamento de alguns parâmetros, sendo um deles o coeficiente de arrasto.

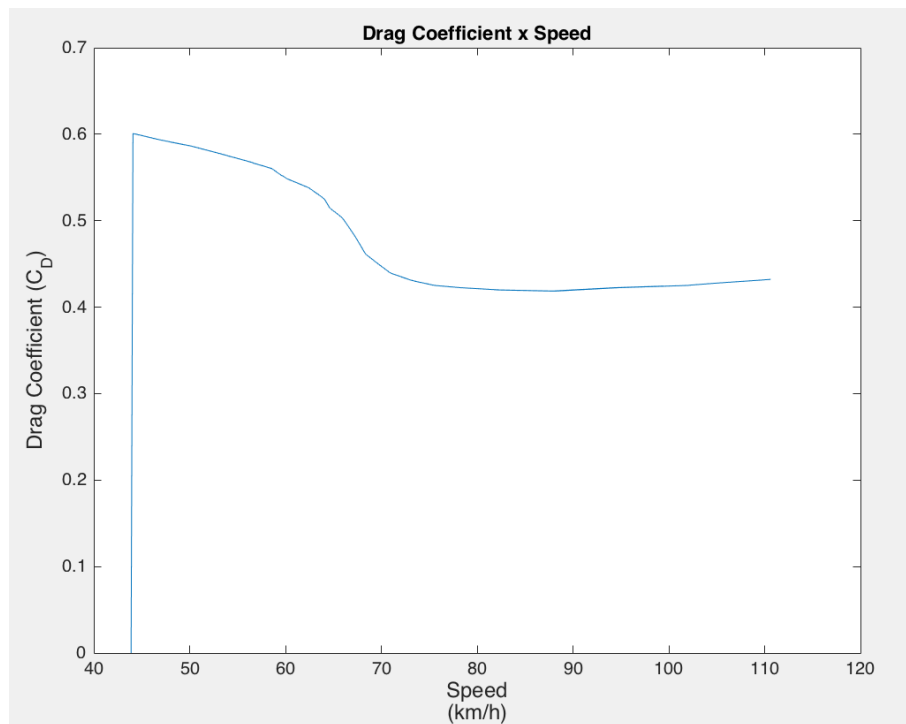


Figura 5.5: Coeficiente de Arrasto em função do número de Reynolds

A partir da análise da Fig 5.4 nota-se que o código gera resultados bastante próximos aos obtidos pelo Strava, validando, assim, a calibração do mesmo. Além disso, o valor da velocidade final alcançada pelo código foi de $110,62\text{km/h}$ e a registrada pelo GPS foi de $109,1\text{km/h}$, ou seja, o código apresenta um erro de $1,39\%$.

5.2 POTÊNCIA

Como foi mencionado em 4.6.3, realizou-se um teste Wingate com um atleta amador e o resultado obtido está representado na Fig 5.6. A potência máxima registrada foi de 1148W e a mínima de 519W , ao longo dos 30 segundos do teste. Esse resultado mostra que a máxima potência que o atleta pode gerar permanecendo no limiar aeróbico, consumindo fontes energéticas a uma taxa pequena são os 519W . A partir desse valor, até a potência máxima registrada 1148W , o atleta está trabalhando no regime anaeróbico, consumindo fontes energéticas instantâneas, a uma taxa bastante alta e que em algum momento se esgota.

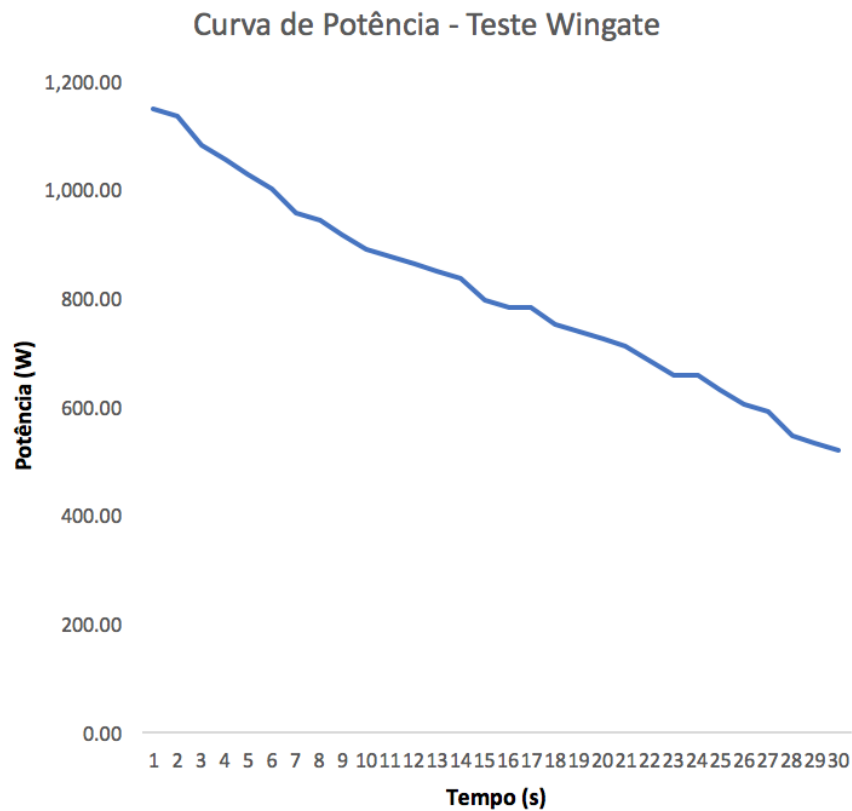


Figura 5.6: Resultado do Teste Wingate realizado na FEF

5.3 VELOCIDADE

Traçou-se também o perfil de velocidade, uma vez que o objetivo do projeto é a velocidade máxima. A curva gerada com o programa, Fig 5.7, foi comparada com a registrada pelo Garmin utilizando o aplicativo Strava, Fig 4.7. Na primeira tentativa da quebra do recorde foram feitas três descidas, em que a terceira registrou a máxima velocidade e, portanto, esta que será analisada e se encontra entre os pontos $8km$ e $10km$, aproximadamente. Nota-se que os perfis comportam-se da mesma forma, mostrando que o equacionamento realizado está coerente.

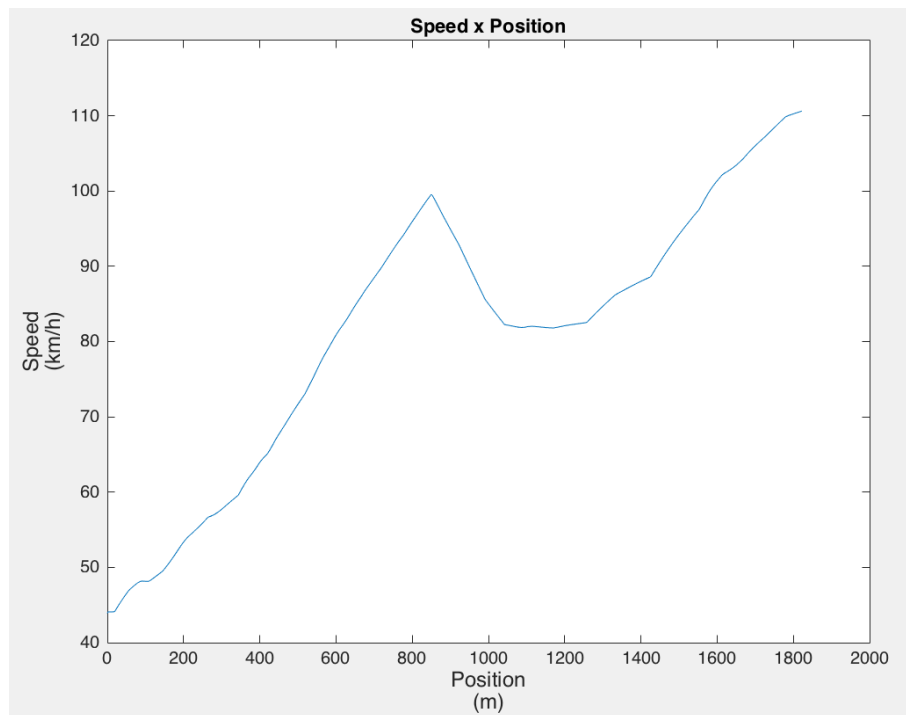


Figura 5.7: Velocidade x Posição

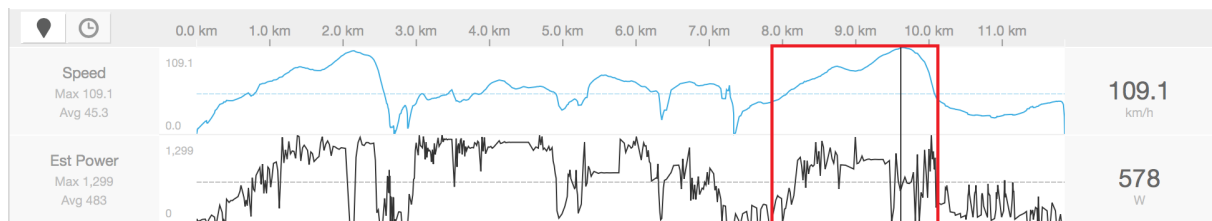


Figura 5.8: Velocidade x Posição, Fonte: Strava

5.4 FORÇA DE ARRASTO

Como mencionado em 3.1 o arrasto tem grande influência sobre o desempenho dos ciclistas. Para analisar a evolução da energia de arrasto em função da velocidade, traçou-se a curva da Fig 5.9. Nota-se o quão dependente a força de arrasto é da velocidade. Nos trechos em que os ciclistas estão em descida, a força de arrasto cresce significativamente. No pequeno trecho de subida ao longo do percurso, nota-se uma redução também significativa do arrasto. Ao final do percurso, o arrasto atinge seu valor máximo, uma vez que a velocidade também é a máxima.

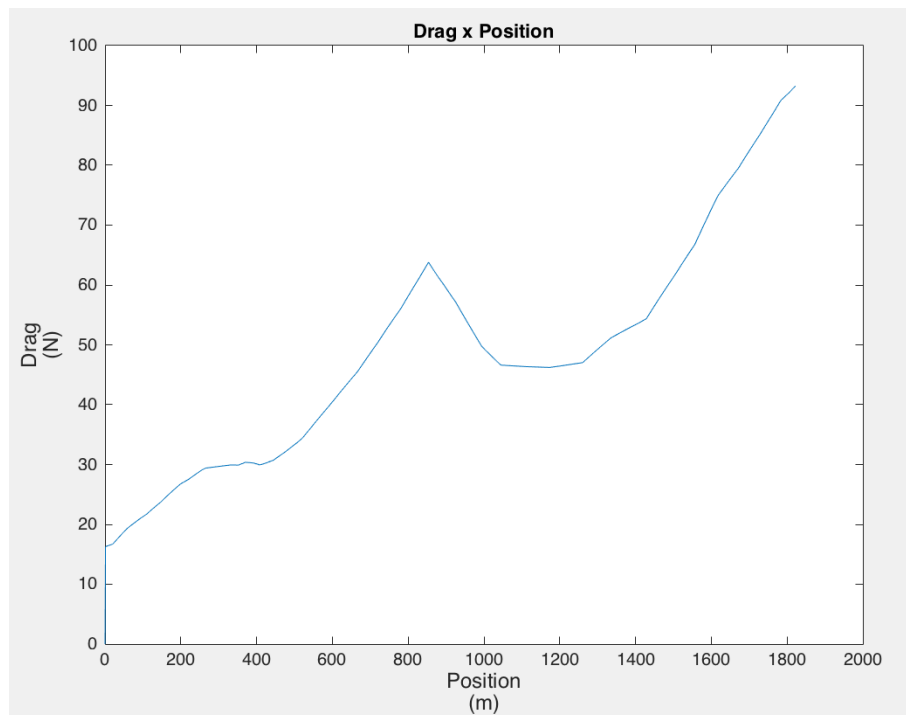


Figura 5.9: Arrasto x Posição

5.5 ENERGIAS

Visando analisar o comportamento e a parcela de cada uma das energias no estudo desenvolvido, traçou-se as curvas apresentadas na Fig 5.10.

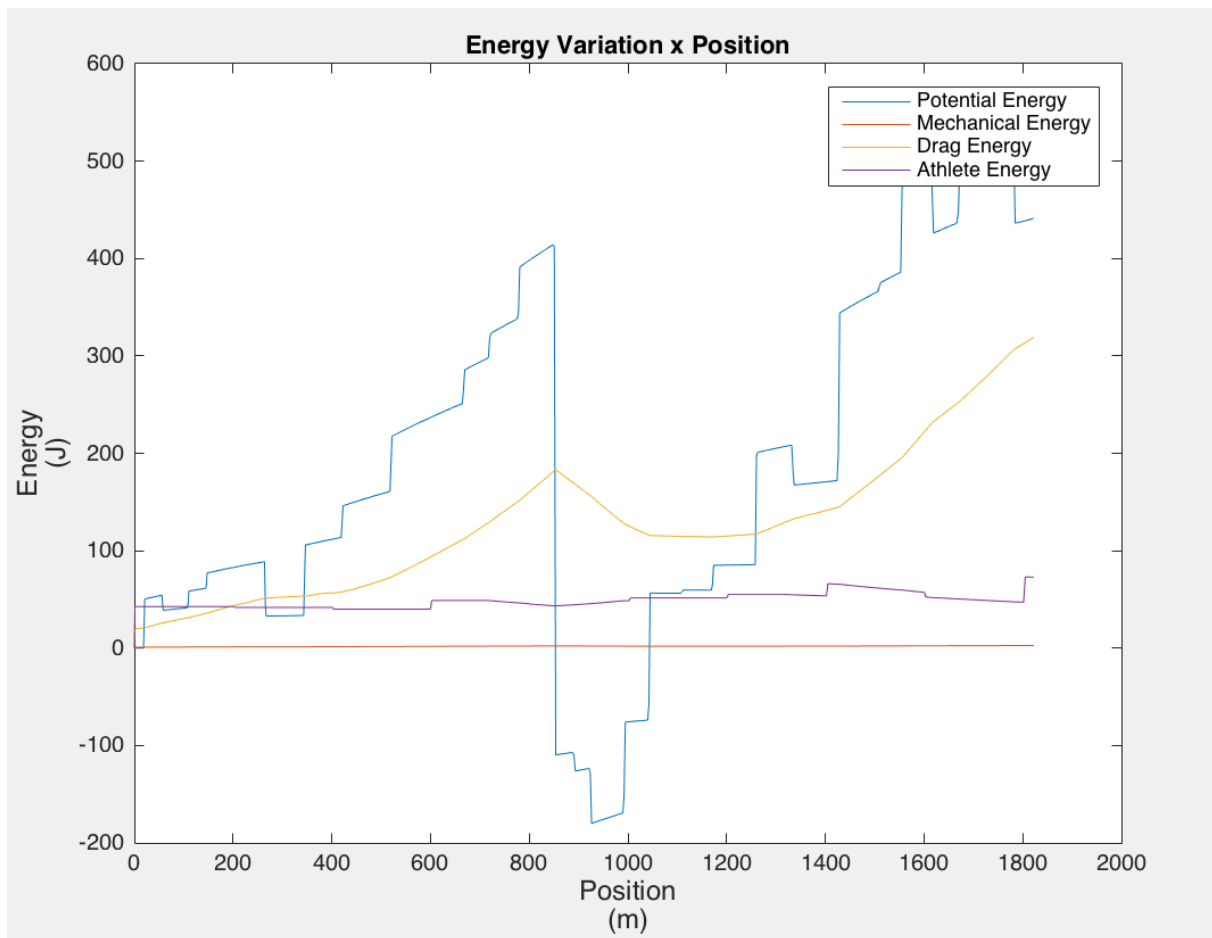


Figura 5.10: Energia x Posição

Pode-se, concluir, portanto, que as energias mais significativas envolvidas no estudo são a energia potencial e a energia devido ao arrasto. A energia mecânica é bastante pequena quando comparada às outras. É interessante notar que, o código de algoritmo genético busca linearizar o uso da potência do atleta, portanto, se observa uma energia gasta pelos atletas quase que constante ao longo de todo o percurso.

5.6 ALGORÍTMO GENÉTICO

Após a devida da calibração do programa e de um prévio entendimento dos resultados obtidos é possível executar o código do algoritmo genético. O código foi desenvolvido de tal forma a retornar um resultado com um valor de potência para cada um dos trechos que a descida foi dividida. Inicialmente, dividiu-se a descida em apenas 4 trechos, porém notou-se que a análise poderia ficar limitada, pelo fato de os trechos serem longos. Assim, optou-se por

dividir a descida em mais trechos, 10 partes.

Os resultados obtidos foram de acordo com o esperado, em que se inicia o percurso com uma potência na zona aeróbica e essa potência vai subindo até um pico de potência ao final do percurso, onde se atinge a máxima velocidade. Os resultados obtidos para cada um dos trechos encontram-se na tabela 5.1.

Tabela 5.1: Resultado da Otimização por meio do GA

Teste/ Potência	Potências fornecidas pelo GA									
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10
1	426,72	418,08	400,06	488,85	485,78	515,79	552,56	681,49	625,38	970,35
2	433,07	491,57	475,61	482,00	482,53	436,93	518,78	597,32	732,11	819,42
3	419,87	457,56	402,01	454,62	512,77	479,98	603,33	661,75	616,78	909,93
4	401,00	400,21	401,64	507,59	420,75	588,47	645,80	623,26	556,75	811,85
5	467,12	426,92	439,94	457,08	401,52	601,75	555,99	621,31	660,39	636,15

Os valores encontrados para a velocidade em cada um dos testes são apresentados na tabela 5.2.

Tabela 5.2: Velocidades máximas para cada um dos testes do GA

Velocidade Máxima atingida no GA	
Teste/Potência	Velocidade [km/h]
1	124,31
2	123,45
3	123,32
4	123,40
5	123,29

Conclui-se desses resultados que apesar de a distribuição de potência ao longo dos trechos variar de teste para teste, os resultados para a velocidade final são bastante próximos. Isso é de se esperar, uma vez que o algoritmo genético é um método de otimização que gera valores randômicos e a partir deles realiza seus cálculos. Por outro lado, a função objetivo é sempre a mesma e, independentemente dos valores gerados ao longo do processo de otimização, a velocidade final deve ser sempre a máxima possível.

Traçou-se uma curva a fim de visualizar a randomicidade do algoritmo genético:

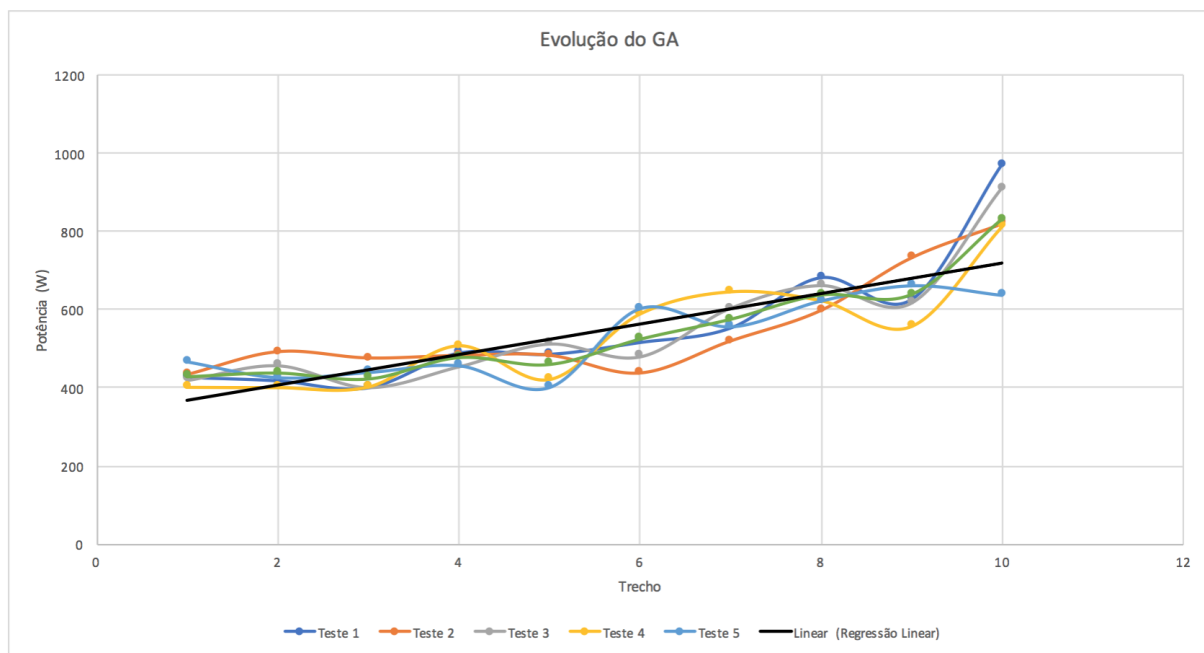


Figura 5.11: Regressão linear dos resultados obtidos pelo GA nos 5 testes realizados

5.7 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

Sabe-se que o arrasto corresponde a 90% das forças sobre os ciclistas, como foi mencionado em 3.1. Desta forma, analisou-se os resultados do GA, alterando-se a área frontal dos ciclistas.

Os resultados obtidos na tabela 5.2 foram para uma área frontal de $0,3m^2$, valor já considerado conservador. Porém, decidiu-se fazer uma análise para valores de área frontal de $0,2m^2$ e $0,5m^2$. A tabela 5.3 apresenta a velocidade máxima média, de cinco testes, obtida pelo GA, em cada uma das situações consideradas de área frontal dos ciclistas.

Tabela 5.3: Análise de Sensibilidade da Área Frontal

Velocidade Máxima atingida no GA			
Área Frontal	0,2	0,3	0,5
Velocidade Média [km/h]	135,61	123,55	108,47

Nota-se, de fato, o quão sensível a análise é para a área frontal. Tal fato, confirma o que foi mencionado em 3.1, que para reduzir o arrasto deve-se reduzir a área frontal do conjunto ciclista-bicicleta. Por isso, esse é um dos focos de maior estudo no ciclismo, em como reduzir a área, para reduzir o arrasto e, conseqüentemente, ter vantagens no desempenho ao longo de uma competição, por exemplo.

6 CONCLUSÃO

No presente trabalho foi desenvolvida uma rotina de cálculo utilizando o software MATLAB com o intuito de equacionar e analisar a descida de dois ciclistas utilizando uma bicicleta tandem em um percurso pré-definido. A escolha do software MATLAB foi feita pelo fato de ter uma maior afinidade com seu uso e por possuir pacotes de métodos de otimização já embutidos em seu código.

Observou-se que o resultado analítico obtido se aproxima bastante do resultado real, uma vez que o código foi validado como calibrado. Executando-se uma rotina de otimização utilizando o método de algoritmo genético foi possível notar um fato interessante desse método, de que independentemente dos valores obtidos no decorrer da execução do código, a função objetivo é sempre alcançada de forma bastante próxima, ou seja, independentemente dos valores randômicos gerados para potência, a velocidade final em cada execução do código foi bem próxima. Desta forma, destaca-se a importância dos métodos de otimização nos estudos de Engenharia, uma vez que eles permitem a criação de um cenário ideal para se atingir determinado objetivo.

Além disso, foi possível confirmar algumas das teorias já apresentadas em estudos prévios acerca do ciclismo como, por exemplo, a grande influência do arrasto sobre o ciclista e, também, da grande influência da energia potencial, uma vez que em descidas, o arrasto domina, em função da velocidade, porém, em subidas, a energia potencial tem um papel determinante. Portanto, observa-se a necessidade de que se estude e desenvolva cada vez mais a tecnologia aplicado ao esporte, principalmente, a análise dos parâmetros com maior influência no esporte em questão, para que a evolução no esporte ocorra.

Acredito que o objetivo do trabalho tenha sido alcançado, uma vez que o código gera resultados satisfatórios e coerentes com estudos na área. Além disso, esperava-se que o uso de energia dos atletas fosse de fato o mais linear possível, para que não houvesse a possibilidade dos atletas ao fim do percurso não terem mais energia para gerar potência útil. Porém, ainda percebo a necessidade de um entendimento mais aprofundado da análise fisiológica, por meio de testes em laboratórios e também em locais abertos, uma vez que não foi possível executar novos testes e, por isso, utilizou-se de dados de estudos já realizados por outros autores.

Por fim, é bastante interessante notar o quão importante é a aplicação do conhecimento

adquirido na Engenharia em situações práticas envolvendo outras áreas do conhecimento como, por exemplo, a educação física. Desta forma, é possível que o esporte no país venha a desenvolver assim como ocorre em países no exterior como, por exemplo, Estados Unidos, Alemanha, Bélgica etc. Seria interessante a continuidade deste projeto realizando-se análises de CFD e também de túnel de vento, para que, assim, se tenha um estudo completo da engenharia envolvida no problema proposto.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ANDERSON, John David, 2011, **Fundamentals of Aerodynamics**, The McGraw Hill, 5th edition, New York, New York.
- [2] BLOCKEN, Bert, 2014, **Basics aspects of fluid flow**, Eindhoven University of Technology, Netherlands.
- [3] BLOCKEN, Bert, 2014, **Computational Fluid Dynamics**, Eindhoven University of Technology, Netherlands.
- [4] BLOCKEN, Bert, 2014, **Cycling Aerodynamics**, Eindhoven University of Technology, Netherlands.
- [5] BLOCKEN, Bert, 2014, **Wind-Tunnel Testing**, Eindhoven University of Technology, Netherlands.
- [6] Burke ER, Faria IE, White JA. Cycling, In Reilly et al. (Eds) *Physiology of sports*, pp, 173-213, Chapman and Hall, New York, 1990.
- [7] CARPENTER, P.W, HOUGHTON, E.L, 2002, **Aerodynamics for Engineering Students**, Butterworth Heinemann, 5th edition, Oxford, United Kingdom.
- [8] FARIA, Irvin E, 1992, **Energy Expenditure, Aerodynamics and Medical Problems in Cycling**, Adis International Ltd, *Sports Medicine* 14, 43-63.
- [9] FORTUNA, Debora, VIRIATO, Ana, **Apenas em 2017, nove ciclistas morreram em acidentes de trânsito**. Disponível em: <<http://www.correiobraziliente.com.br/app/noticia/cidades/2017/04/24/interna-cidadesdf,590512/quantos-ciclistas-morreram-em-brasilia-por-acidentes-de-transito.shtml>>. Acesso em: 2 Nov. 2017.
- [10] Garnevale TG, Gaesser GA, 1991, **Effects of pedalling speed on the power-duration relationship for high-intensity exercise**, *Medicine and Science in Sports and Exercise* 23, 242-246.
- [11] **Google Maps Elevation For a Route**. Disponível em: <<https://www.doogal.co.uk/RouteElevation.php>> Acesso em: 17 Jun. 2017.
- [12] HALLIDAY, David, RESNICK, Robert, WALKER, Jearl, 2006, **Fundamentos de Física, Volume 1: Mecânica**, LTC, 7ª edição, Rio de Janeiro.

- [13] **How the Genetic Algorithm Works**. Disponível em: <<http://www.mathworks.com/help>>. Acesso em: 20 Set. 2017.
- [14] JONES, A. M., VANHATALO, A, 2017, **The Critical Power Concept: Applications to Sports Performance with a Focus on Intermittent High-Intensity Exercise**, Springer, S65-S78.
- [15] JONG, Jenny de, et al, 2016, **A Variational Approach to Determine the Optimal Power Distribution for Cycling in a Time Trial**, Elsevier Ltd, 907-911.
- [16] LUIZ, Gabriel, **Ciclistas do DF querem alcançar 140 km/h e estabelecer recorde mundial**. Disponível em: <<http://g1.globo.com/distrito-federal/noticia/2016/06/ciclistas-do-df-querem-alcancar-140-kmh-e-estabelecer-recorde-mundial.html>>. Acesso em: 8 Jun. 2017.
- [17] Patterson RP, Moreno MI, 1990, **Bicycle pedalling forces as a function of pedalling rate and power output**, Medicine and Science in Sports and Exercise 22, 512-516.
- [18] PAULINYI, L. F. de Aguiar, **Projeto Conceitual de Aeronave não Tripulada Utilizando Técnicas de Otimização Multidisciplinar**, Instituto Tecnológico da Aeronáutica - ITA, 2004, São José dos Campos, Brasil.
- [19] RAO, S. Singiresu, 2009, **Engineering Optimization**, John Wiley & Sons, Inc, 4th edition, New Jersey.
- [20] SAMOZINO, Pierre, et al, 2007, **Why Does Power Output Decrease at High Pedaling Rates during Sprint Cycling?**, Medicine and Science in Sports and Exercise, Vol. 39, No. 4, 680-687.
- [21] SKIBA, Philip Friere ,et al, 2012, **Modeling the Expenditure and Reconstitution of Work Capacity above Critical Power**, Medicine and Science in Sports and Exercise, 1526-1532.
- [22] WILLIAM, D. McArdle, FRANK, I. Katch, VICTOR, L. Katch, 2003, **Fisiologia do Exercício: Energia, Nutrição e Desempenho Humano**, Guanabara Koogan S.A, 5ª edição, Rio de Janeiro.
- [23] WILSON, David Gordon, with contributions by Jim Papadopoulos, 2004, **Bicycling Science**, The MIT Press, 3rd edition, Cambridge, Massachusetts.

[24] WILSON, David Gordon, Whitt FR, **Bicycling Science**, The MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 1982.

7 ANEXOS

7.1 PROGRAMA PRINCIPAL

```
1  %Projeto de Graduacao 2
2  %Aluno: Henrique Benfica Leite
3  %Matricula: 11/0072090
4
5
6  clc
7  clear all
8  close all
9
10 % 1 - Specified positions input of power
11 % 2 - Genetic Algorithm (Constant Power for positions)
12 % 3 - Strava Data Inputs for code calibration
13
14 option = 2
15
16 switch option
17     case 1
18         p = [419.87 457.57 402.01 454.62 512.77 479.99 603.33 661.75 619.79 ...
19             909.93]
20         final_vel = trajectory(p)
21     case 2
22         FitFcn = @trajectory;
23         nvars = 10;
24         LB = [400 400 400 400 400 400 400 400 400 400];
25         UB = [1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000];
26         [p, fval, exitflag, output] = ga(FitFcn,nvars,[],[],[],[],LB,UB);
27     case 3
28         p= 0
29         final_vel = trajectory(p)
30 end
```

7.2 SUBROTINA TRAJETÓRIA

```
1 function [ v_final ] = trajectory (p)
2
3 %Function TRAJECTORY
4 %-----
5 %Calculates the trajectory of the bicycle
6 %It executes a loop until the bicycle reaches the end of the race (distance)
7
8
9
10 %% Mass parameters input
11
12 m_weimar = 75.0;           % mass of the first cyclist [kg]
13 m_adauto = 65.0;          % mass of the second cyclist [kg]
14 m_roupas = 1.4;           % clothing and personal accessories mass [kg]
15 m_bicicleta = 12.0;       % bicycle mass [kg]
16 m_roda = 0.8;             % bicycle wheel mass [kg]
17
18 %Total mass calculation [kg]:
19 m = m_total(m_weimar , m_adauto , m_roupas , m_bicicleta);
20
21 %% Aerodynamic parameters input
22
23 rho = 1.205;              % air density [kg/m^3] (City of Brasilia)
24 mu = 0.000018;           % air viscosity [N.s/m^2]
25 L = 0.6;                 % reference lenght [m]
26 S_f = 0.2;               % frontal area [m^2]
27 c_d = 0.2;               % drag coeficient
28
29 %% Mechanic Parameters
30
31 etha_transmissao = 0.9;   % transmission efficiency
32 e_roda = 0.04;            % wheel thickness [m]
33 d_roda = 0.7366;         % wheel diameter [m]
34 coroa_catraca = 5.5455;   % transmtion ratio
35 I_w = 0.0974;            % Moment of inertia [kg.m^2]
```

```

36 C_rr = 0.0050; % Coefficient of rolling resistance 0.0022 to ...
    0.005 for bikes
37
38 %% Kinematic Parameters
39
40 v_init = 43.89/3.6; % initial velocity [m/s]
41 E_res = 1.0; % muscle total energy [%]
42 distance = 1822.0; % finishing position [m]
43 del_t = 0.1; % time interval [s]
44 g = 9.8; % gravity [m/s^2]
45
46
47 %% Topography data
48
49 A = readtable('altitude.txt');
50 x=A(:,1);
51 y=A(:,2);
52 %Initial Altitude (h(1)) [m]:
53 h_1 = A.y(1);
54
55 %% Drag data
56
57 CD = readtable('drag.txt'); %Drag coefficient versus Reynolds, figure 5.8 - ...
    Elliptical Strut.
58 CD_re=CD(:,1);
59 CD_cd=CD(:,2);
60
61 %% Power data - for testing the accuracy of simulation vs strava info
62
63 PW = readtable('power_3rd.txt');
64 PW_d = PW(:,1);
65 PW_pw= PW(:,2);
66
67 %% Actual velocity data from Strava (1/06/2016)
68
69 Strava = readtable('actual_vel_3rd.txt');
70 Dist_Strava = Strava(:,1);
71 Vel_Strava = Strava(:,2);

```

```

72
73 for i=1:25 %for(1st->i=1:39)((2nd->i=1-30),(3rd->i=1:25)
74     Act_dist(i)=Strava.x(i);
75     Act_vel(i)=Strava.y(i);
76 end
77
78 %% Human power output - NASA SP3006 - curve for 1st class athletes
79 Human_P = readtable('max_power_vs_time.txt');
80 H_P_time = Human_P(:,1);
81 H_P = Human_P(:,2);
82
83 %% End of Input Variables
84 %% Solution start
85
86 % initializing trajectory variables: time, position, velocity
87 t = 0.0;
88 s = 0.0;
89 v = v_init;
90 i = 1;
91
92 %wheels angular velocity [rad/s]
93 w_wheel = v/(d_roda/2);
94 w_wheel_rpm = 60*w_wheel/(2*pi);
95 w_pedal = w_wheel/correa_catraca;
96 w_pedal_rpm = w_wheel_rpm/correa_catraca;
97
98 %Initial Energy
99 %rotational energy [J] - 2 wheels (0.5 is dropped)
100 E_rot = I_w*w_wheel^2;
101
102 %kinetic energy [J]
103 E_kin = 0.5*m*v^2;
104
105 %total energy [J]
106 E_tot = E_rot+E_kin;
107
108 %potential energy [J]
109 E_pot = m*g*h_1;

```



```

110
111 % initializing graph vectors
112 v_g(1) = v_init*3.6;
113 s_g(1) = s;
114 t_g(1) = t;
115 w_g(1) = w_wheel;
116 w_pedal_g(1) = w_pedal;
117 E_rot_g(1) = E_rot;
118 E_kin_g(1) = E_kin;
119 E_tot_g(1) = E_tot;
120 E_res_g(1) = E_res;
121 E_athlete_g(1) = 0.0;
122 P_ath_g(1) = 0.0;
123 E_drag_g(1) = 0.0;
124 E_pot_g(1) = E_pot;
125 E_mec_g(1) = 0.0;
126 del_E_pot_g(1) = 0.0;
127 Drag_g(1) = 0.0;
128 C_d_g(1) = 0.0;
129 Re_g(1) = 0.0;
130 E_diss_g(1) = 0.0;
131
132 % beginning loop
133     while s < distance
134
135         %reynolds number
136         Re = reynolds(rho,v,L,mu);
137
138         % Calling Energy Input subroutines
139         %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
140         % Athlete
141         if p == 0
142             E_athlete = Power_input(s,E_res,del_t,p,PW_d,PW_pw);
143         else
144             E_athlete = Power_input(s,E_res,del_t,p);
145             %calculating the remaining energy
146             E_diss = E_exp(E_athlete,del_t, H_P_time,H_P);
147             E_res = E_res - E_diss;

```

```

148         E_diss_g(i) = E_diss;
149     end
150     if w_pedal>120
151         E_athlete = E_athlete*(120/w_pedal);
152     end
153     % Potential Energy
154     E_pot_1 = Potential_energy(s,x,y,m,g);
155     del_E_pot = E_pot - E_pot_1;
156     E_pot = E_pot_1;
157     % Calling Energy dissipation routines
158     %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
159     % Drag
160     C_d = Drag(Re,CD_re,CD_cd)*1.3;
161     D = .5*rho*v^2*S_f*C_d;
162     E_drag = D* v * del_t;
163     % Mechanical dissipation
164     E_mec = Rolres(C_rr,m,v)*del_t;
165
166     % Energy balance
167     %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
168     E_tot = E_tot+E_athlete+del_E_pot-E_drag-E_mec;
169
170     %Calculating the velocity for the next time step
171     v = (E_tot/(0.5*m+I_w/(pi*d_roda)^2))^(0.5);
172
173     s = s + v * del_t;
174     t = t + del_t;
175     i = i+1;
176     w_wheel = 60*v/(pi*d_roda);
177     w_pedal = w_wheel / coroa_catraca;
178
179     % Matrix for graph generation
180     v_g(i) = v*3.6;
181     s_g(i) = s;
182     t_g(i) = t;
183     w_g(i) = w_wheel;
184     w_pedal_g(i) = w_pedal;
185     E_rot_g(i) = E_rot;

```

```

186     E_kin_g(i) = E_kin;
187     E_tot_g(i) = E_tot;
188     E_res_g(i) = E_res;
189     P_ath_g(i) = E_athlete/del_t;
190     del_E_pot_g(i) = del_E_pot;
191     E_pot_g(i) = E_pot;
192     E_mec_g(i) = E_mec;
193     E_drag_g(i) = E_drag;
194     E_athlete_g(i) = E_athlete;
195     C_d_g(i) = C_d;
196     Drag_g(i) = D;
197     Re_g(i) = Re;
198
199
200 end
201 v_final = -v*3.6;
202 t_final = t;
203 d_final = s;
204 w_pedal_rpm_final = w_pedal;
205
206
207 %     plot(s_g,P_ath_g)                                % Power Diagram
208 %     xlabel({'Position','(m)'},'FontSize',12)
209 %     ylabel({'Athlete Power','(W)'},'FontSize',12)
210 %     title('Athlete Power(Strava) x Position')
211 %     figure
212 %     plot(Act_dist,Act_vel,s_g,v_g)                    % Real Speed x Simulated ...
Speed Diagram
213 %     xlabel({'Position','(m)'},'FontSize',12)
214 %     ylabel({'Speed','(km/h)'},'FontSize',12)
215 %     legend('Strava','Simulacao')
216 %     title('Speed x Position')
217 %     figure
218 %     plot(s_g,del_E_pot_g,s_g,E_mec_g,s_g,E_drag_g,s_g,E_athlete_g)
219 %     xlabel({'Position','(m)'},'FontSize',12)
220 %     ylabel({'Energy','(J)'},'FontSize',12)
221 %     title('Energy Variation x Position')

```

```

222 %      legend('Potential Energy','Mechanical Energy','Drag Energy','Athlete ...
      Energy')
223 %      figure
224 %      plot(s_g,Drag_g)
225 %      xlabel({'Position','(m)'},'FontSize',12)
226 %      ylabel({'Drag','(N)'},'FontSize',12)
227 %      title('Drag x Position')
228 %      figure
229 %      plot(s_g,C_d_g)
230 %      xlabel({'Position','(m)'},'FontSize',12)
231 %      ylabel({'Drag Coefficient (C_D)'},'FontSize',12)
232 %      title('Drag Coefficient x Position')
233 %      figure
234 %      plot(v_g,C_d_g)
235 %      xlabel({'Speed','(km/h)'},'FontSize',12)
236 %      ylabel({'Drag Coefficient (C_D)'},'FontSize',12)
237 %      title('Drag Coefficient x Speed')
238 end

```

7.3 ARQUIVO DE LEITURA DA ALTITUDE

Utilizou-se para a determinação da altitude dos ciclistas um arquivo no formato .txt com várias medidas de altitude em função da posição dos ciclistas obtidas a partir do Google Maps.

Tabela 7.1: Tabela de Altitude

x	y
0	1116
55.37	1116
91.86	1116
141.24	1115
196.02	1114
260.51	1112
341.73	1110
418.09	1108
492.29	1106
568.6	1102
645.98	1098
721.05	1093
780.27	1088
866.25	1080
957.62	1074
1056.59	1078
1147.63	1079
1219.41	1079
1309.31	1078
1364.2	1075
1440.82	1072
1530.78	1067
1624.77	1058
1716.59	1049
1808.89	1039
1911.31	1030
1984.09	1023
2083.06	1014
2194.45	1007
2259.98	1006
2341.73	1007
2409.39	1009
50000	1009