

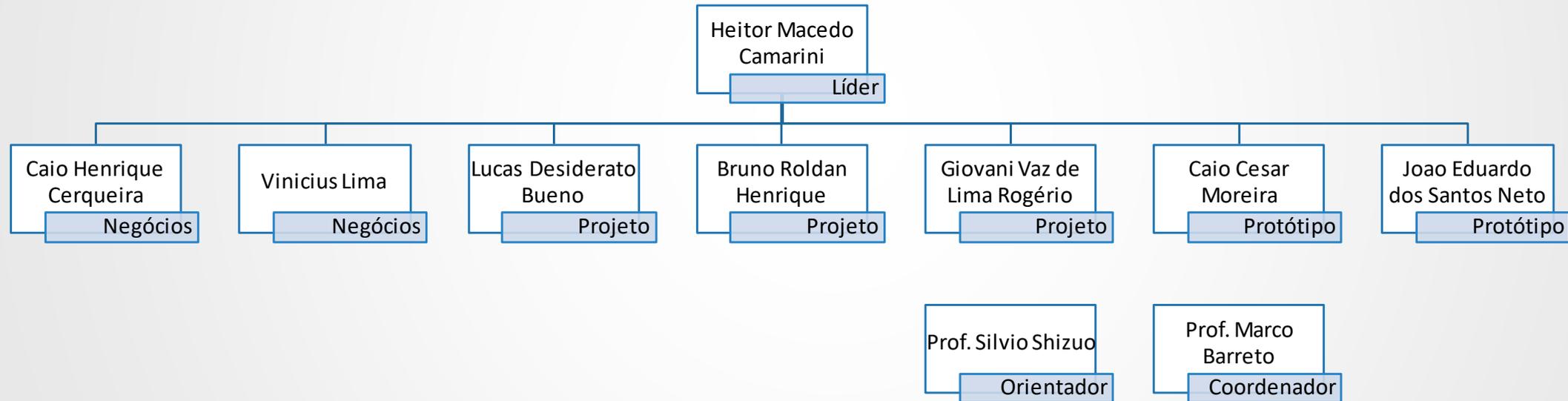
FCI (Flex-fuel Compression Ignition)



FLEX-FUEL COMPRESSION IGNITION

Solução para controle da combustão em motores bicompostíveis com ignição por compressão, aumentando a faixa de operação

Organização



Agenda

Primeira Prévia Por que investir em motores a combustão interna?

HCCI

Propósito e Requisito do Projeto

Golden Circle

Benchmark

Matriz de Decisão

Proposta do projeto

Segunda Prévia StoryBoard

Boundary Diagram

Engenharia Reversa

FAST

P-Diagram

DFMEA

Target

Agenda

Terceira
Prévia

Modelo de Cálculo

Hipóteses simplificadoras

Resultados HCCI vs FCI

Resultados FCI

Conclusões

Última
Prévia

Dimensionamento do sistema

Desenhos do sistema

Business CANVAS

Website FCI

Referências Bibliográficas

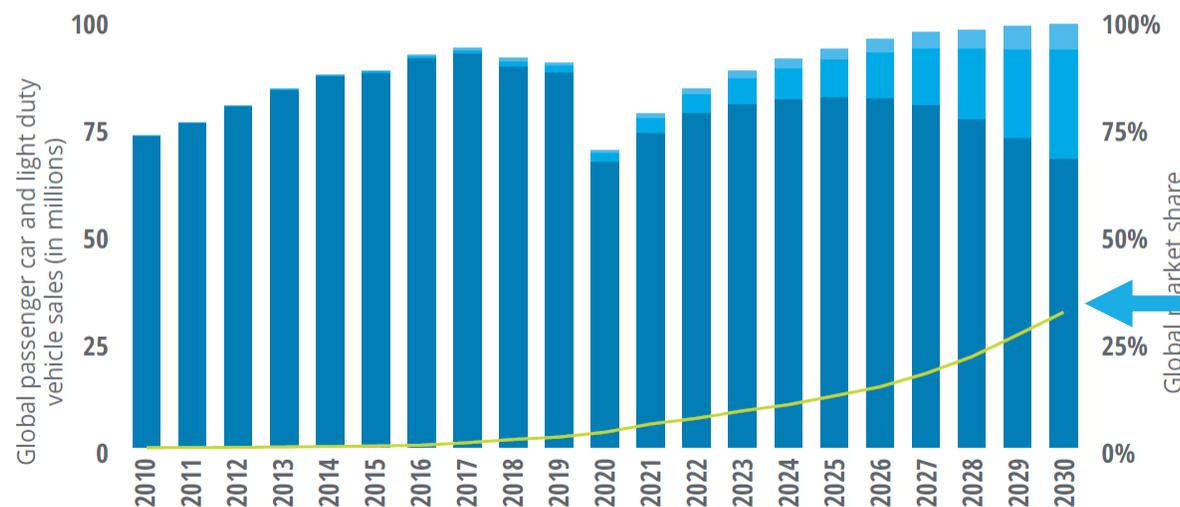
Por que investir em motores a combustão interna?

- Carros elétricos somaram 2,5% do total de veículos vendidos mundialmente em 2019. No Brasil em 2020, apenas 1% dos veículos novos vendidos eram elétricos ou híbridos;
- Estudos preveem que em 2030, 32% dos veículos vendidos serão elétricos. A taxa de crescimento, então, reduzirá.

FIGURE 2

Outlook for annual global passenger-car and light-duty vehicle sales, to 2030

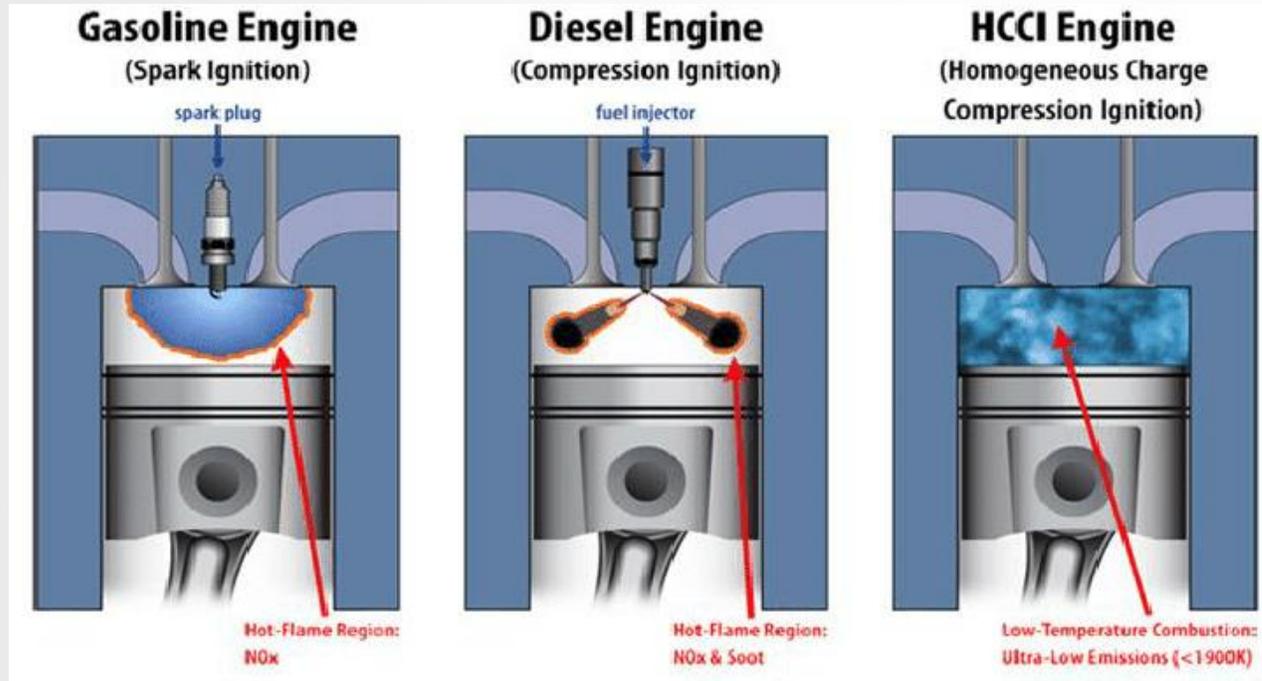
■ Global ICE ■ Global BEV ■ Global PHEV — EV share



Source: Deloitte analysis, IHS Markit, EV-Volumes.com¹⁶

Fonte: Deloitte Insights Electric vehicles, Setting a course for 2030

HCCI (Homogeneous Charge Compression Ignition)



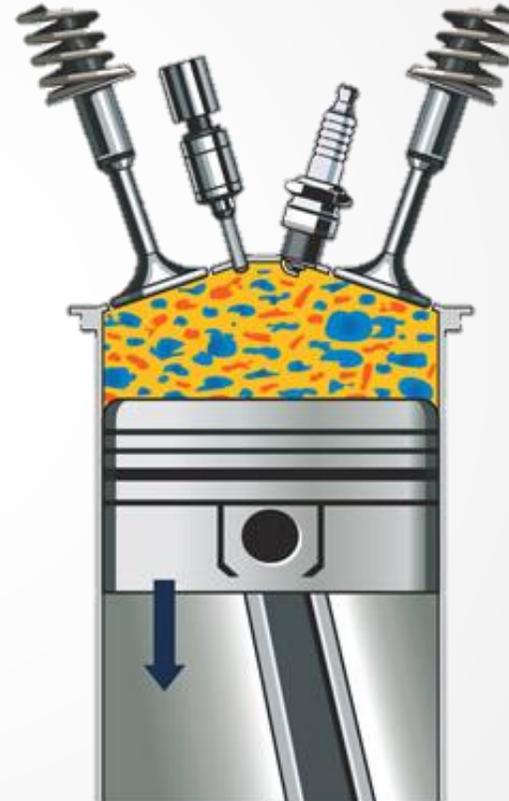
Fonte: Hairuddin et al., 2014

- Ciclo de combustão que mistura características tanto do ciclo Otto quando do ciclo Diesel;
- Usualmente a ignição é instantânea em todo o cilindro, não havendo propagação de chama;
- Maior eficiência térmica do motor, menores emissões de NOx e material particulado (PM/Soot) e menor consumo de combustível

HCCI – Dificuldades

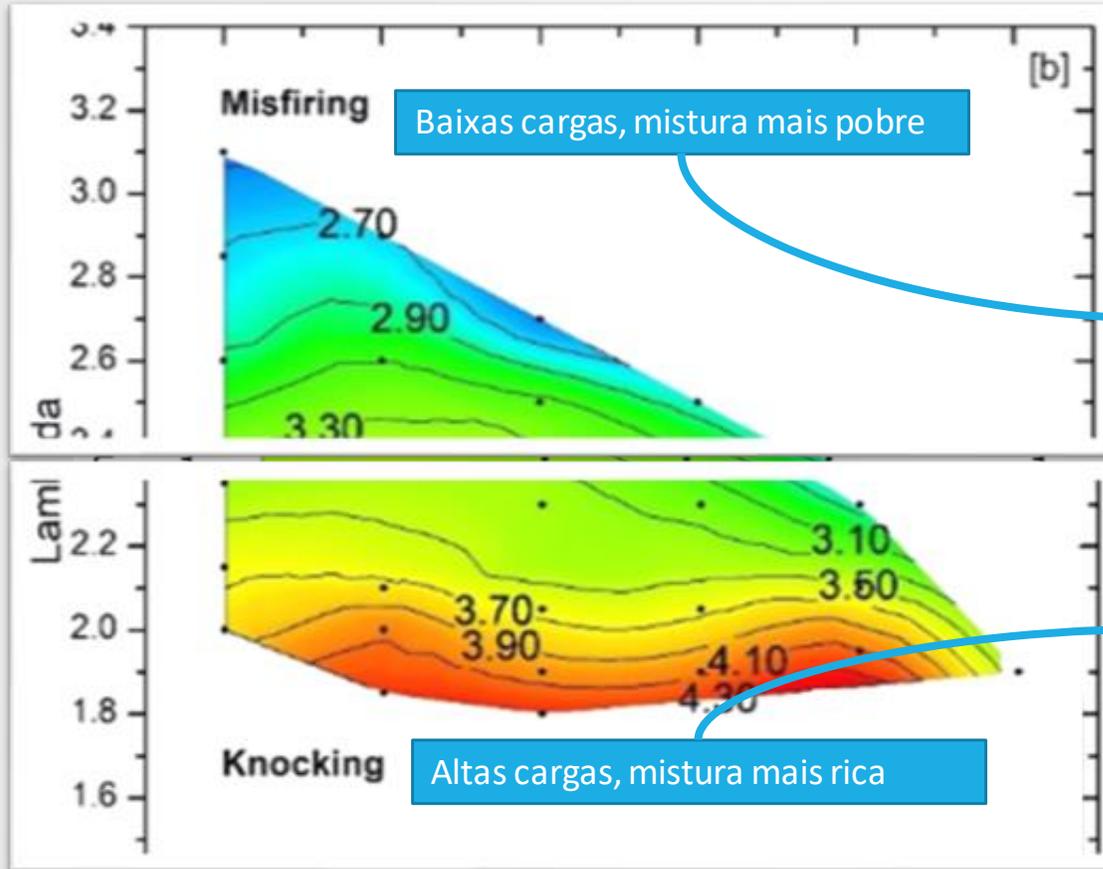
- Aumento de emissões de CO e HC;
- Dificuldade em “cold start”;
- Problemas para gerar potência em altas cargas, aumentando o ruído e vibrações do motor.

Fonte: AZIZ, M. I. N. A. N. A, 2013



Fonte: <https://www.motortrend.com/news/gm-hcci-fuel-efficient-system/>

HCCI – Faixa de operação

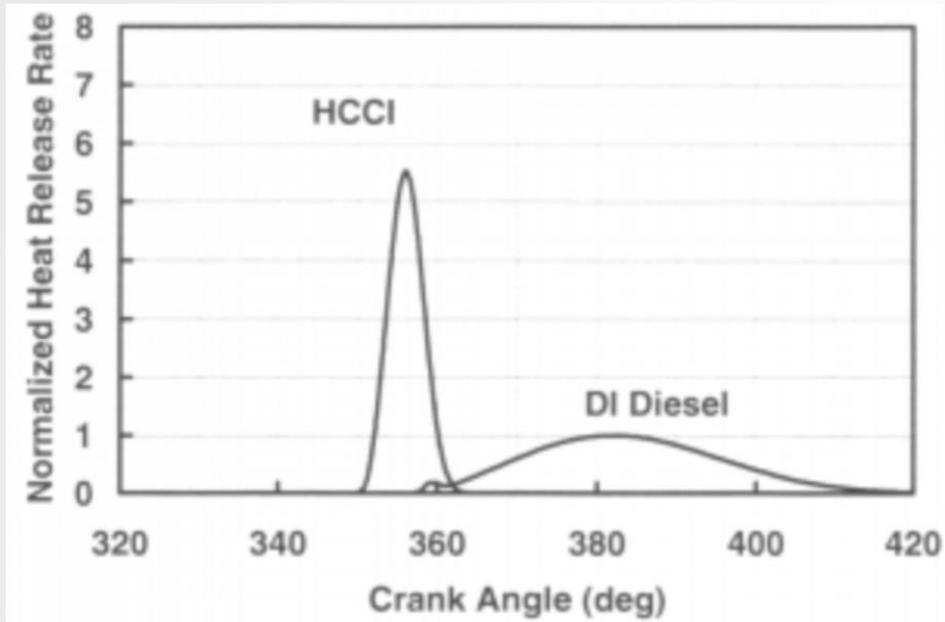


Faixa de operação:

- Em baixas cargas, a combustão é incompleta por conta da baixa energia térmica;
- Em altas cargas, a combustão ocorre muito rapidamente, com alta taxa de liberação de energia, causando ruído semelhante ao “knock” de motores SI.

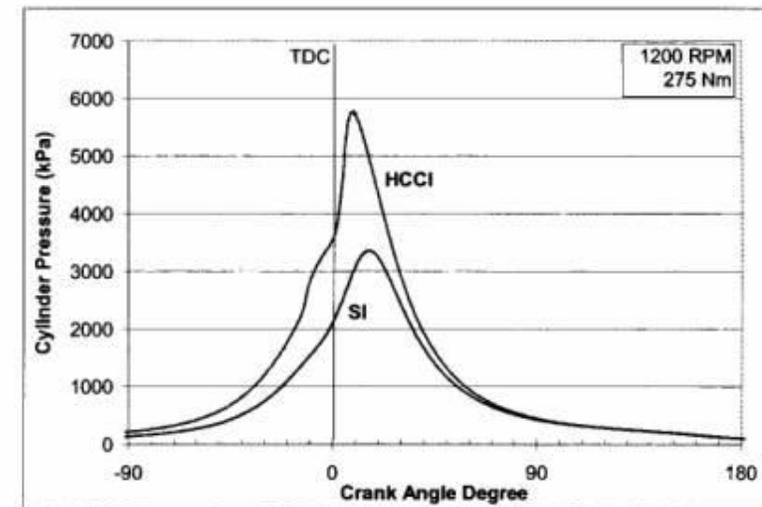
Exemplo de faixa de funcionamento de um motor HCCI.
Fonte: Adaptado de Solmaz, Hamit., 2020

HCCI – Taxa de liberação de energia



Fonte: STANGLMAIER e ROBERTS, 1999

- A velocidade e intensidade da combustão são quantificadas pela taxa de liberação de energia



Average Cylinder Pressure vs. Crank Angle Comparing HCCI and SI Operation at 1200 RPM, 275 Nm Brake Torque.

Fonte: DIBBLE, GIRARD, et al., 2001

- A pressão interna do cilindro também aumenta de maneira muito rápida, por conta da expansão da mistura queimada

HCCI – Na prática

- Quando aplicado na prática, a alta taxa de liberação de energia faz com que o motor apresente elevados níveis de vibração e ruído, semelhante ao knock;
- Para evitar essas condições, limita-se a potência, o que é indesejado.



Fonte: Autores

Propósito e Requisito do Projeto

Problema

Dificuldade em controlar a taxa de liberação de energia durante a combustão em altas cargas

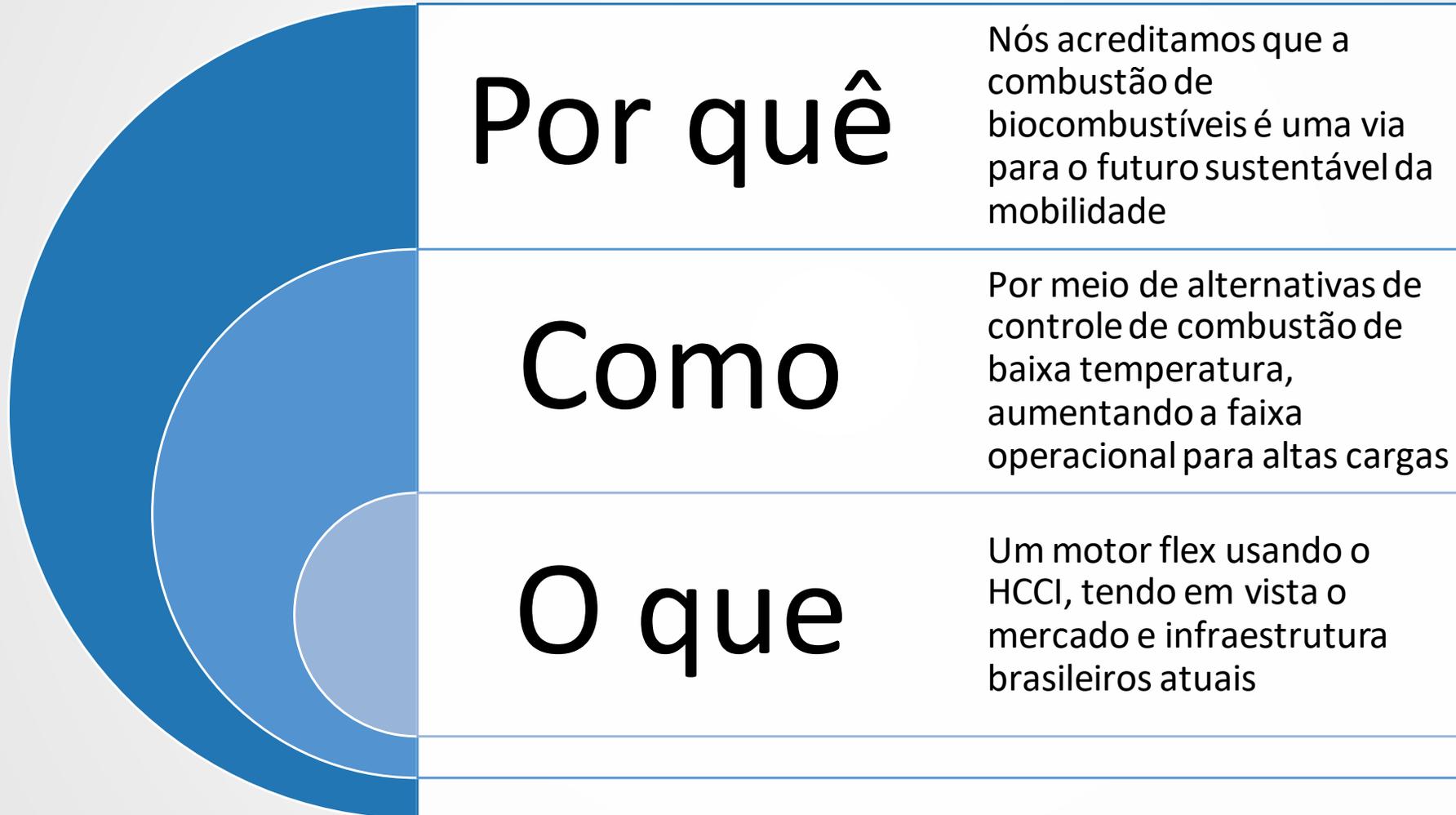
Propósito

Controlar a taxa de liberação de energia em altas cargas, a fim de aumentar a faixa de operação

Requisito

Alcançar o IMEP de um motor SI base, por meio do controle da liberação de energia

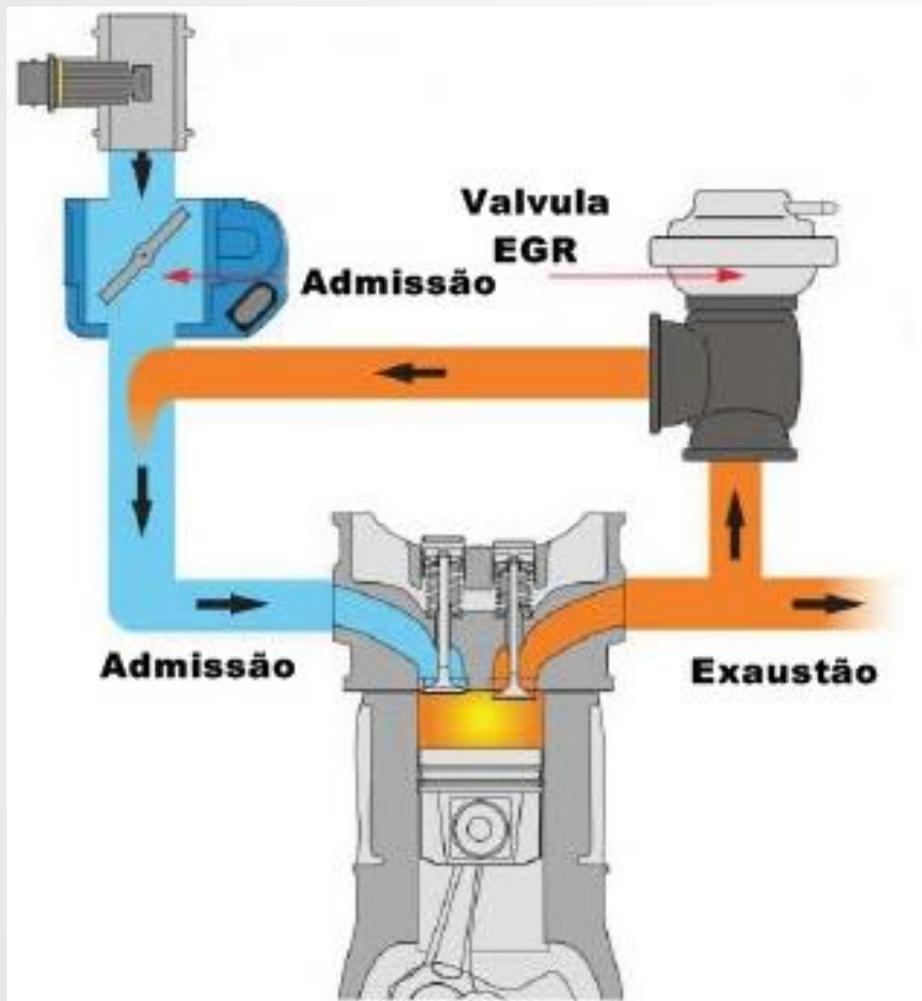
Golden Circle



Benchmark

- Sistemas de controle da taxa de liberação de energia em motores HCCI:
 - EGR (Exhaust Gas Recirculation) – Recirculação de gases de escapamento;
 - RCCI (Reactivity Controlled Compression Ignition) – Uso de dois combustíveis com diferentes propriedades de autoignição;
 - Split Injection – Dupla injeção de combustível;
 - TSCI (Thermally Stratified Compression Ignition) – Estratificação térmica da mistura por meio da injeção direta de água.

Benchmark – EGR

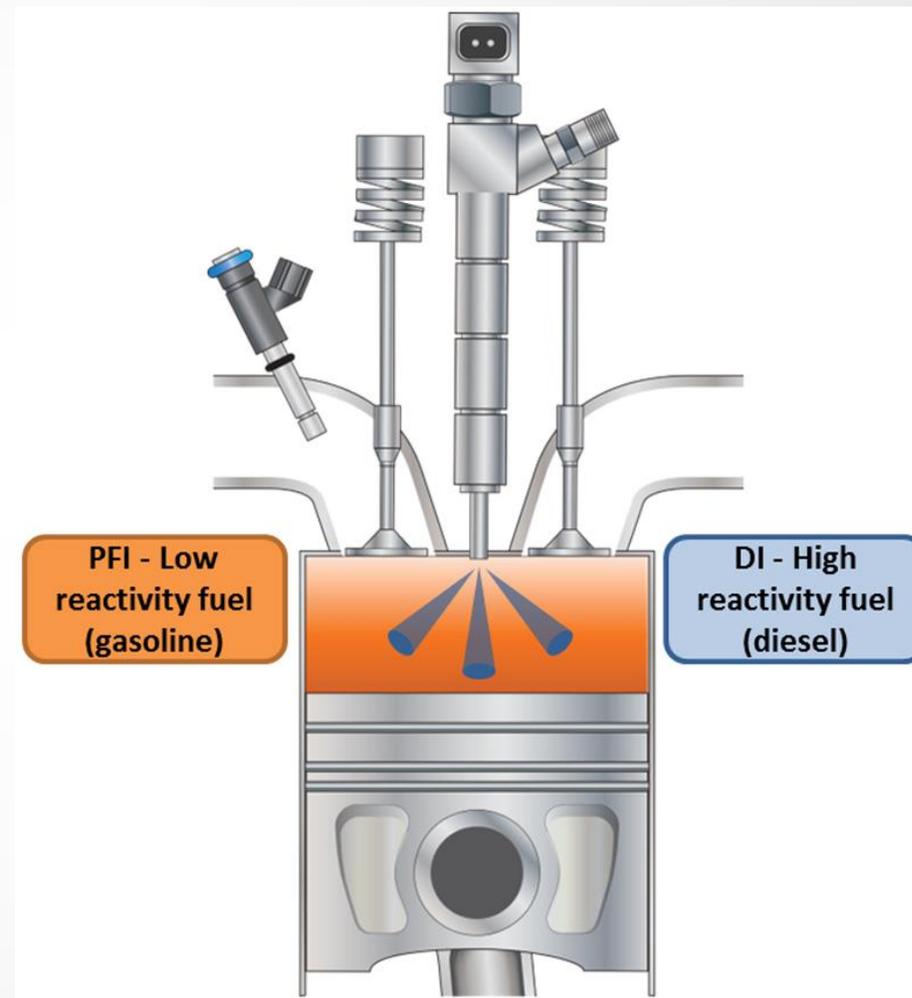


- Recirculação dos gases de escape para dentro da câmara de combustão;
- Vantagens: pequena redução da taxa de liberação, reduz pressão no cilindro;
- Desvantagens: sistema de alimentação duplicado, queda de torque.

Fonte: <https://carroetecnica.com.br/2017/11/30/vavula-egr-o-que-e-e-como-funciona/>

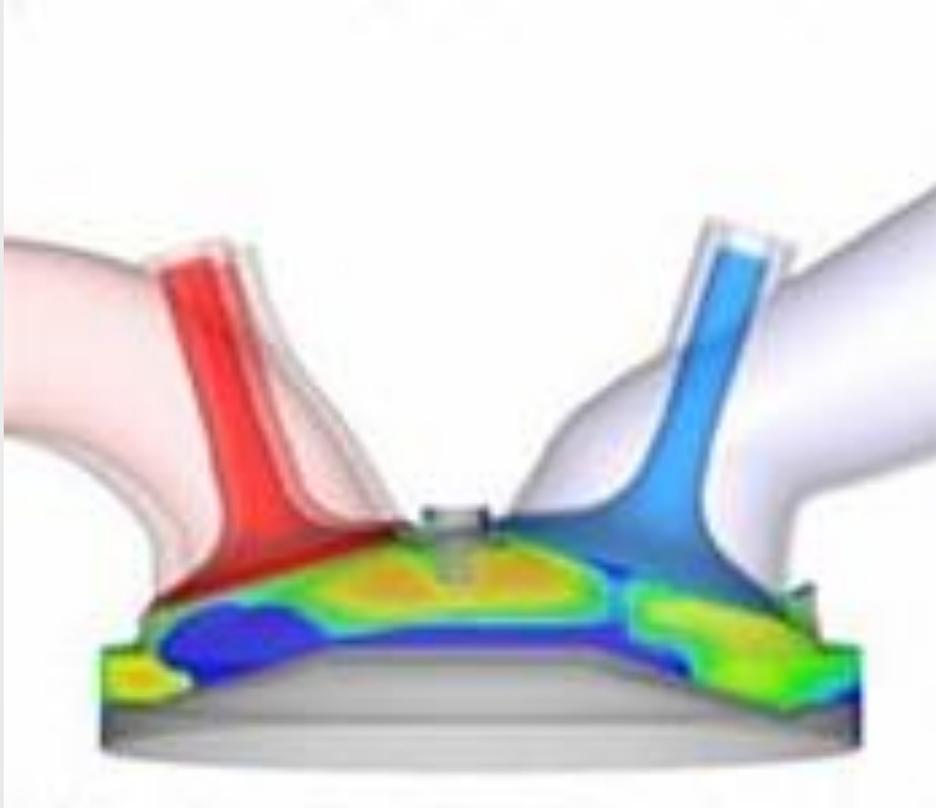
Benchmark – RCCI

- Uso de dois combustíveis com diferentes propriedades de autoignição;
- Vantagens: frente de combustão controla velocidade de queima;
- Desvantagens: sistema de alimentação duplicado, emissão de particulado.



Fonte: <https://www.greencarcongress.com/2016/08/20160804-ornlrcci.html>

Benchmark – Split Injection

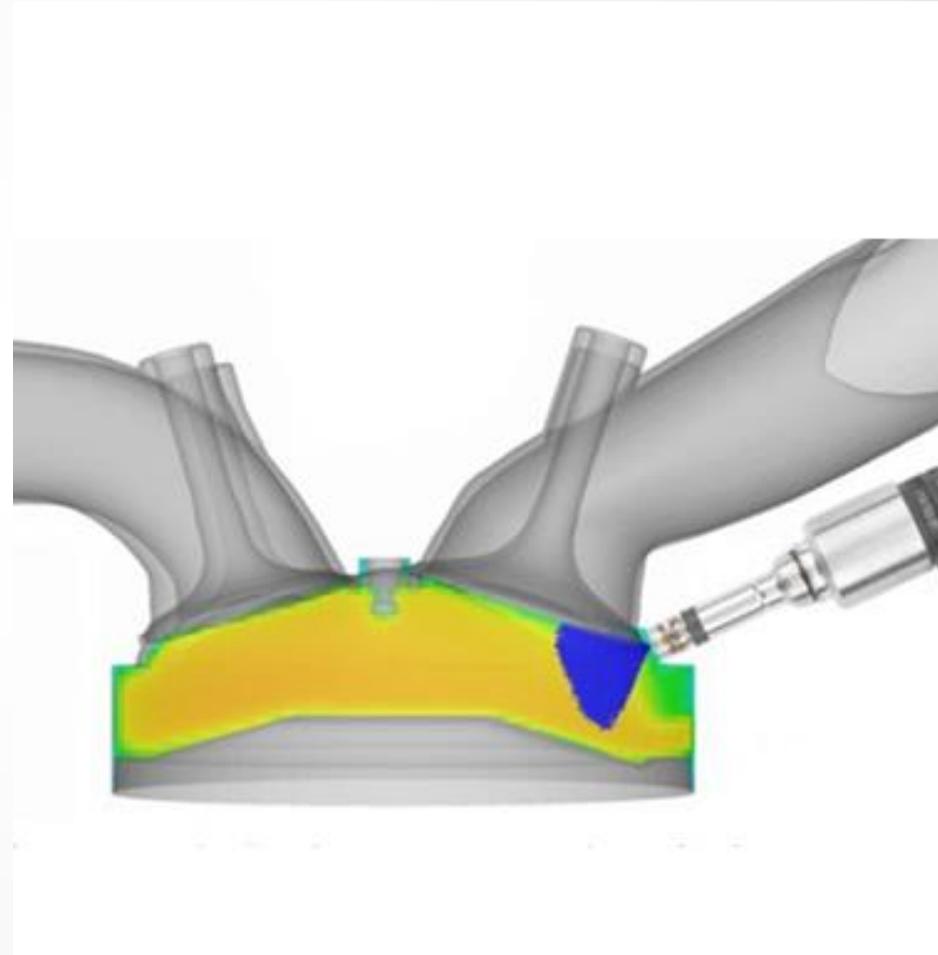


Fonte: Adaptado de <https://advanceseng.com/ic-engines-sustainable-biofuels-advanced-combustion-converge/?hcb=1>

- Dupla injeção de combustível;
- Vantagens: controle e modulação da velocidade de combustão;
- Desvantagens: incapaz de controlar a liberação de energia quando usando gasolina.

Benchmark – TSCI

- Estratificação térmica da mistura por meio da injeção direta de água;
- Vantagens: controle e modulação da velocidade de combustão;
- Desvantagens: Sistema auxiliar de água.



Fonte: Adaptado de <https://advanceseng.com/thermally-stratified-compression-ignition-new-advanced-low-temperature-combustion-mode-load-flexibility/>

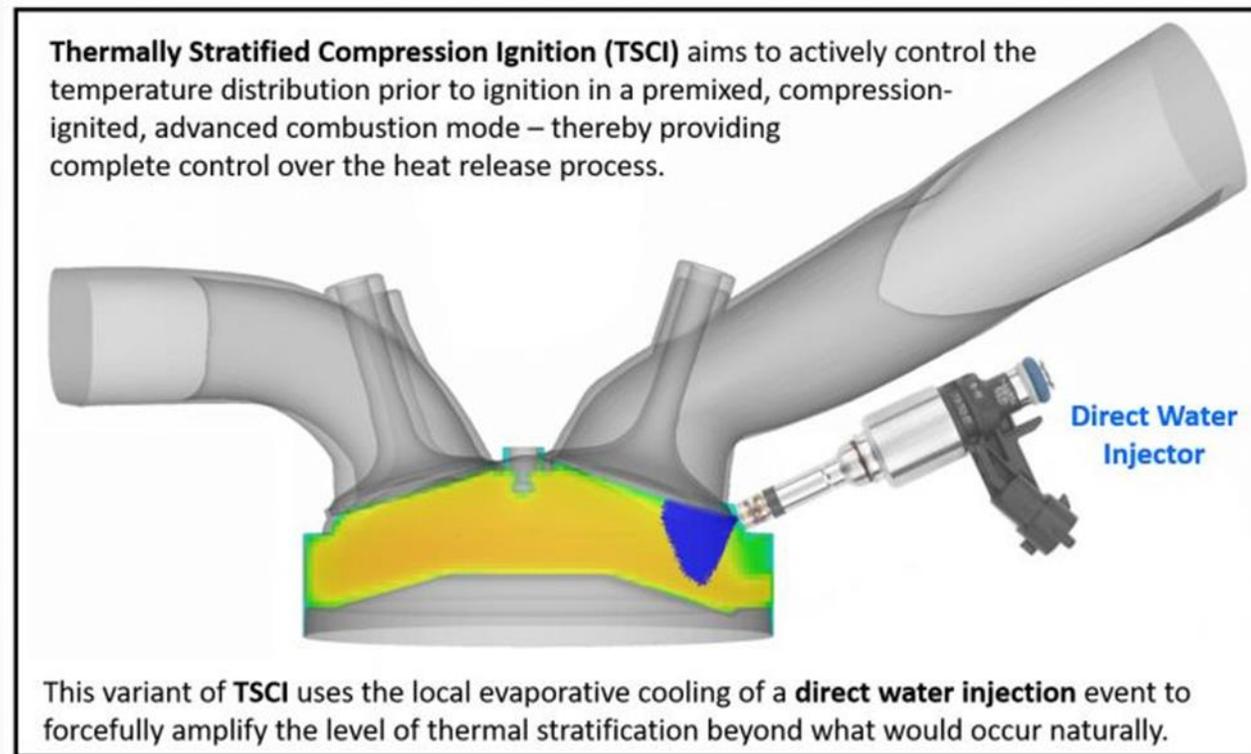
Matriz de Decisão

Peso	Critérios	Designs				
		HCCI	EGR	RCCI	Split Injection	TSCI
3	Emissões pós tratadas	0	-1	-1	-1	0
3	Faixa de operação	0	1	2	1	2
2	Eficiência térmica	0	-1	0	0	0
1	Adição de novos subsistemas	0	-1	-2	0	-1
1	Praticidade de uso do cliente final	0	2	1	2	1
	Soma	0	-1	2	2	6

Escala	2	1	0	-1	-2
	Muito satisfatório	Satisfatório	Neutro	Insatisfatório	Muito insatisfatório

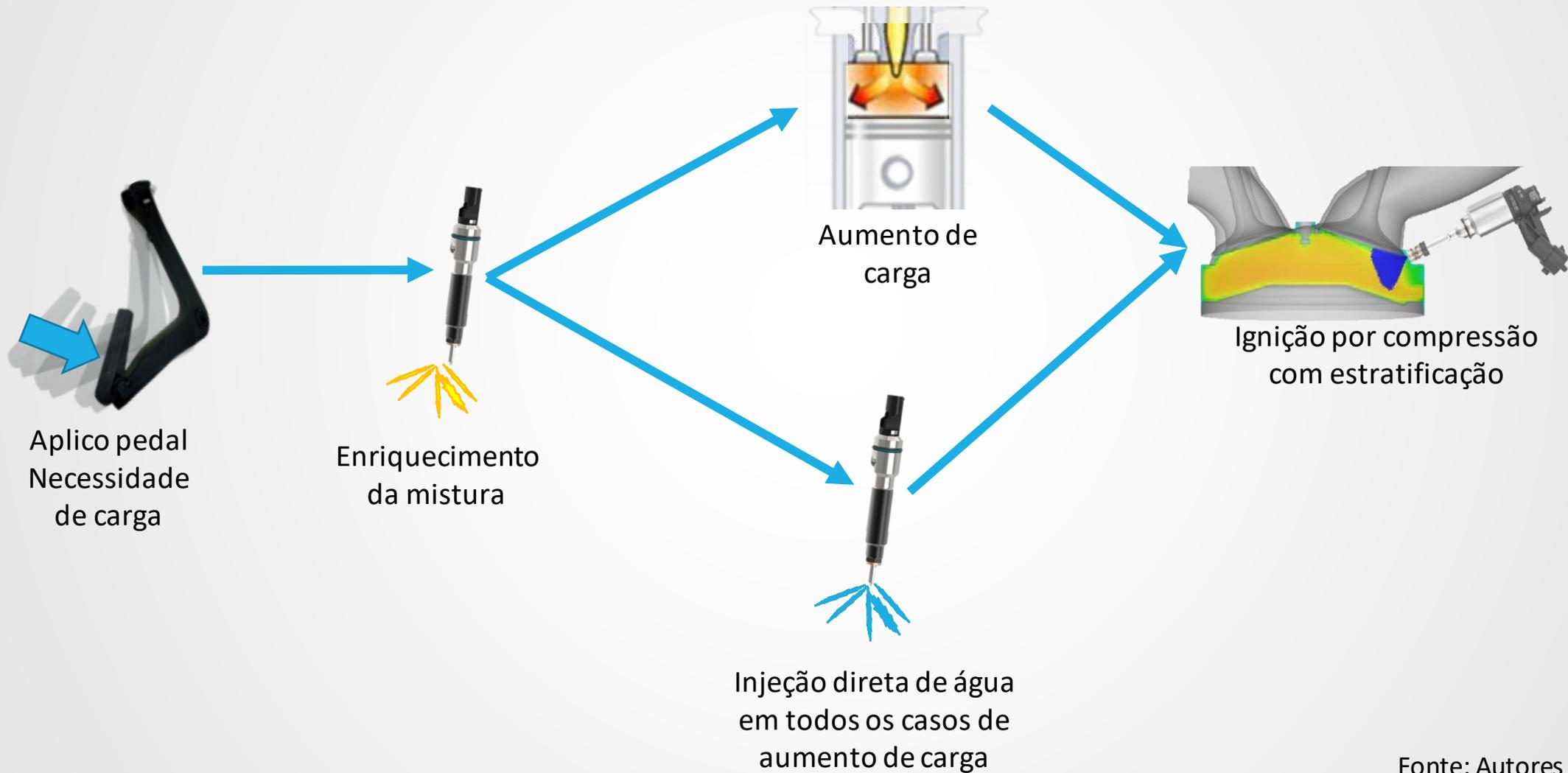
Proposta do projeto (Esboço do sistema proposto)

- Adaptação de um motor Flex para o modelo TSCI com injeção direta de água;
- Bicomustível Etanol-Gasolina;
- Taxa de compressão fixa;
- Admissão forçada.



Fonte: Adaptado de <https://advanceseng.com/thermally-stratified-compression-ignition-new-advanced-low-temperature-combustion-mode-load-flexibility/>

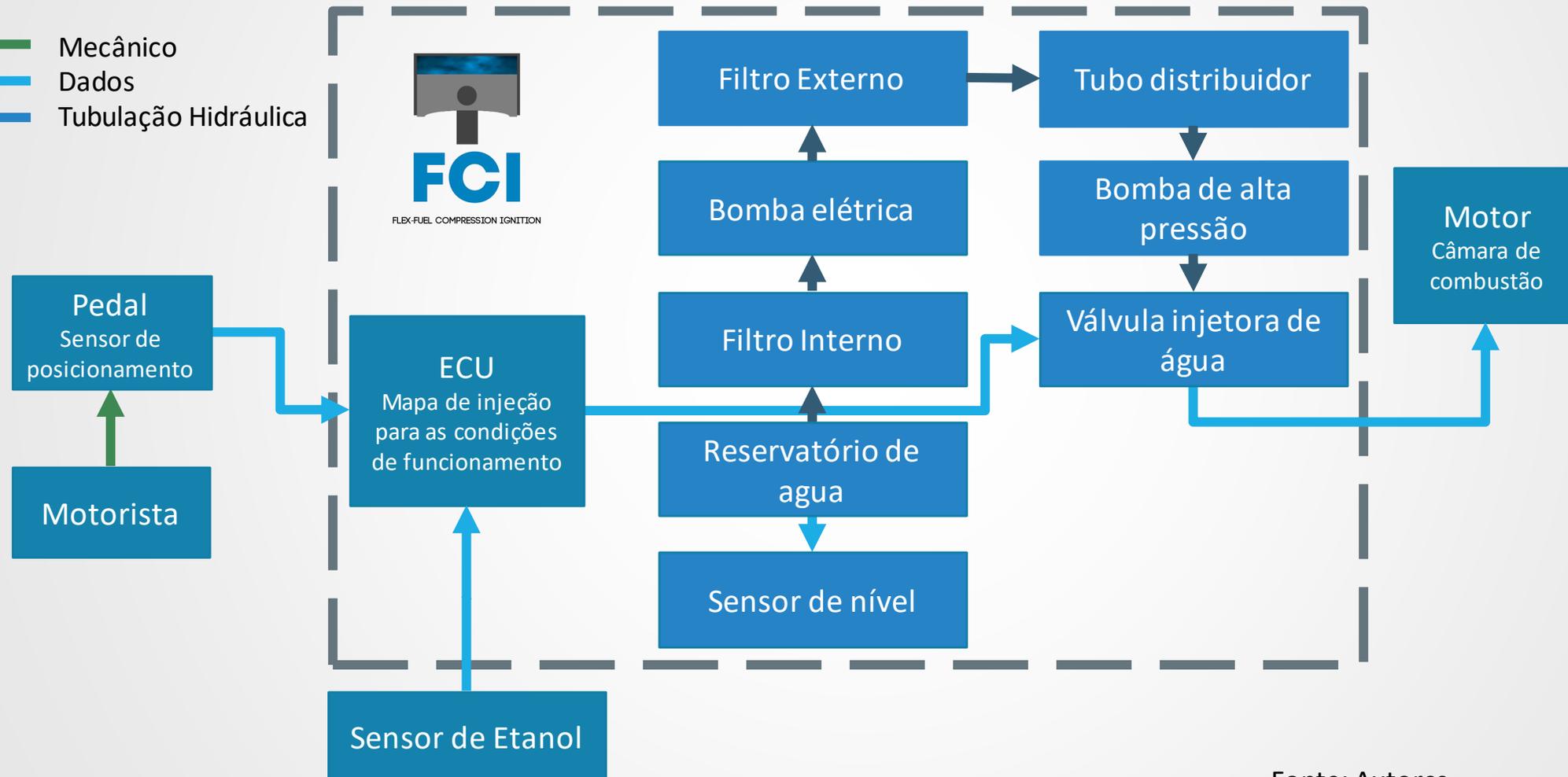
Storyboard



Fonte: Autores

Boundary Diagram

- Mecânico
- Dados
- Tubulação Hidráulica



Fonte: Autores

Engenharia Reversa

Sistema de injeção de água

Componente									
	Válvula injetora	Tubo distribuidor	Bomba de alta pressão	Filtro externo	Tubulação de água	Bomba elétrica	Filtro interno	Reservatório de água	Sensor de nível do reservatório
Massa aproximada [kg]	0,050	0,250	0,350	0,150	0,150	0,250	0,100	0,100	0,200
Função primária	Injetar água na câmara	Transportar água	Pressurizar a linha	Filtrar a água	Transportar água	Fornecer vazão para o sistema	Filtrar a água	Armazenar água	Indicar nível
Dimensões básicas [mm]	84 x Ø21	290 x Ø20	145 x 80 x 42	180 x Ø80	460 x Ø 12,7	196 Ø 62	100 x 55	372 x 103 x 297	143,5 x Ø 71
Material	Aço; Plástico	Aço	Aço	Plástico; Celulose	Borracha	Aço; Plástico	Tecido sintético	Plástico	Aço; Plástico
Processo de fabricação	Usinagem; Injeção	Usinagem	Fundição, Usinagem	Fundição	Vulcanização	Fundição; Injeção	Tecelagem	Injeção	Fundição; Injeção
Fornecedores	Bosch	Bosch	Bosch	Tecfil	Continental, Hansaflex	Bosch	Tecfil	Flório, Marvini	Bosch

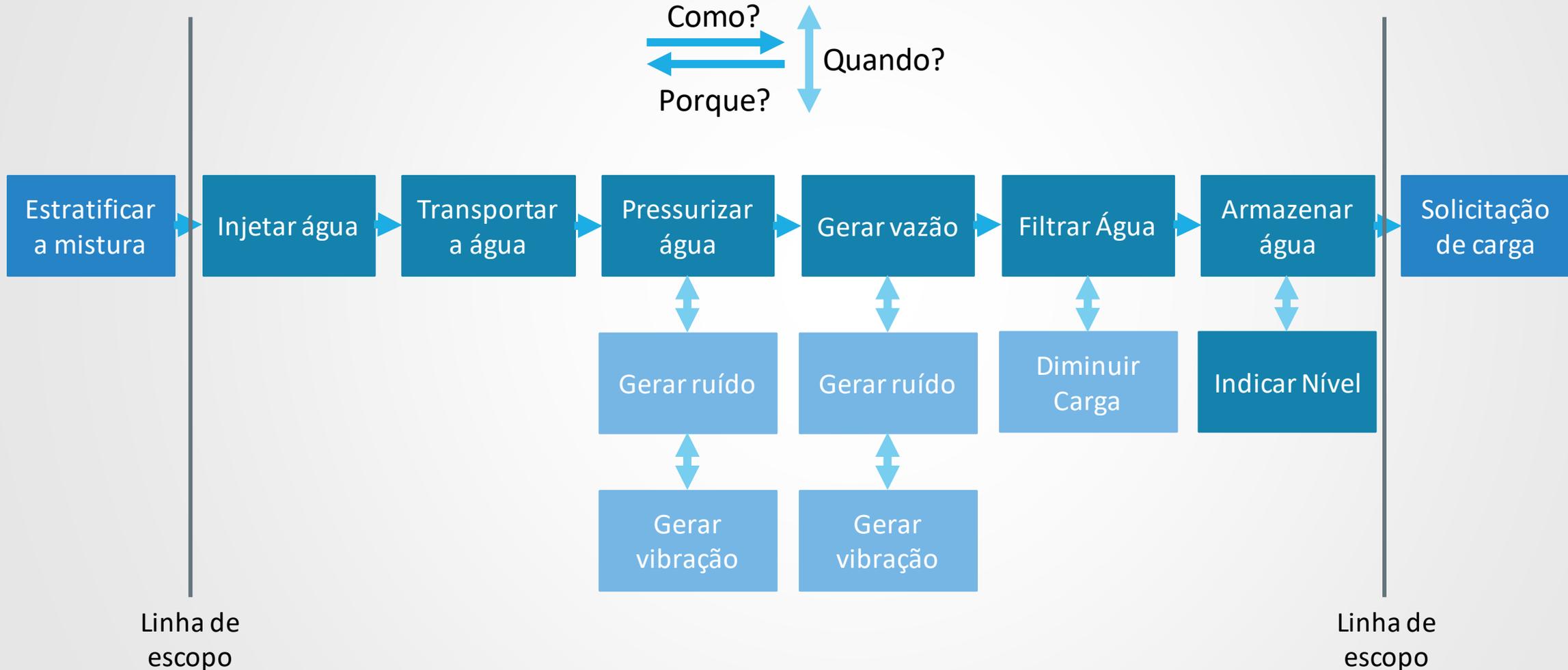
FAST (Function Analysis System Tree)

Componente	Função
Válvula injetora de água	Injetar Água
Tubo distribuidor	Transportar Água
Bomba de alta pressão	Pressurizar Água
	Gerar Vibrações
	Gerar Ruído
Filtro externo	Filtrar Água
	Diminuir Carga
Tubulação de água	Transportar Água
Bomba elétrica	Gerar vazão
	Gerar Vibrações
	Gerar Ruído
Filtro interno	Filtrar Água
	Diminuir Carga
Reservatório de água	Armazenar Água
Sensor de nível	Indicar Nível

Função	B/S	+/0/-	U/A
Injetar Água	B	+	U
Transportar Água	S	+	U
Pressurizar Água	S	+	U
Gerar vazão	S	+	U
Gerar Vibrações	S	-	U
Gerar Ruído	S	-	U
Filtrar Água	S	+	U
Diminuir Carga	S	-	U
Armazenar Água	S	+	U
Indicar Nível	S	+	U

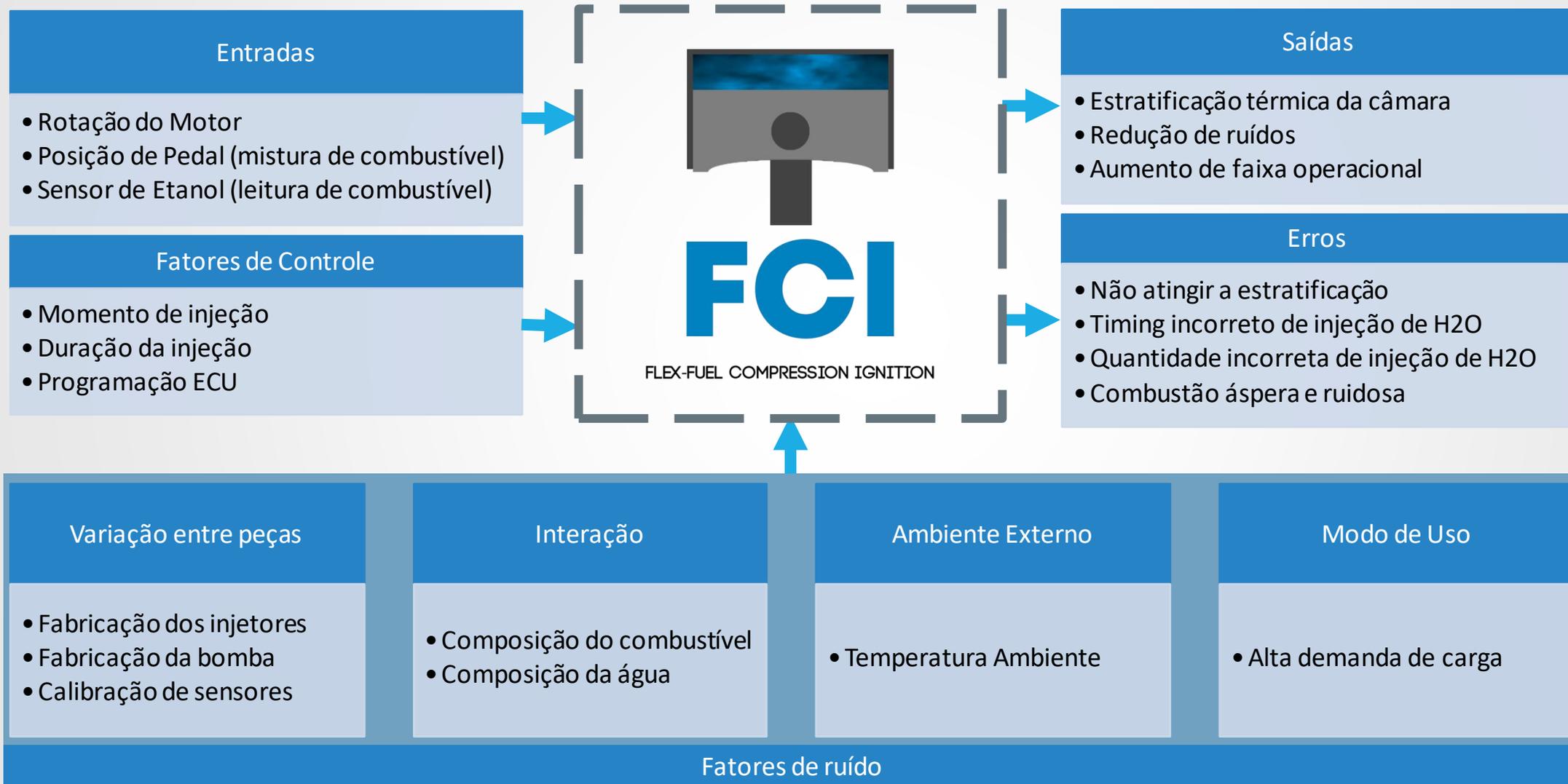
Fonte: Autores

FAST (Function Analysis System Tree)



Fonte: Autores

P-Diagram



DFMEA

Item	Função	Requisitos	Modo de Falha Potencial	Efeito da Falha Potencial	G	Causa Potencial de Falha	O	Controle atual de prevenção	Controle Atual de Detecção	D	Risco RPN	Ação Preventiva Recomendada
Injetor de água	Pulverizar água na câmara	Disponibilidade de água	Não injetar água	Combustão áspera e ruidosa	7	Fim da vida útil	4	Substituição programada em plano de manutenção	Ruído de combustão	4	112	Teste periódico programado
						Obstrução do injetor			Aviso no painel			
						Defeito de fabricação			Sinal de erro via OBD			
Bomba d'água	Pressurizar o sistema de injeção	Disponibilidade de água	Cavitação	Comprometimento da bomba	7	Falta de água no sistema	5	Substituição quando necessário	Medidor de vazão, aviso no painel	3	105	Verificação nível de água
			Sobreaquecimento da bomba			Defeito de fabricação						Teste componente
Filtros	Filtragem da água do sistema	Separação do fluido e contaminantes	Rompimento do filtro	Comprometimento do injetor	7	Fim da vida útil	4	Substituição programada em plano de manutenção	Medidor de vazão, aviso no painel	3	84	Teste componente
			Obstrução do filtro	Comprometimento da bomba		Defeito de fabricação						
Tanque de água	Armazenar água	Estanqueidade	Vazamentos	Nível de água comprometido	7	Falha nas vedações	3	Substituição quando necessário	Sensor de nível, aviso no painel	1	21	Substituição de vedações
						Incidentes de uso						
						Defeito de fabricação						
Sensor de Nível	Indicar o nível de água no tanque	Calibração	Leitura incorreta	Induzir o sistema a erro	7	Fim da vida útil	3	Substituição programada em plano de manutenção	Aviso no painel	4	84	Teste e calibração periódicos programados
						Defeito de fabricação			Sinal de erro via OBD			

Fonte: Autores

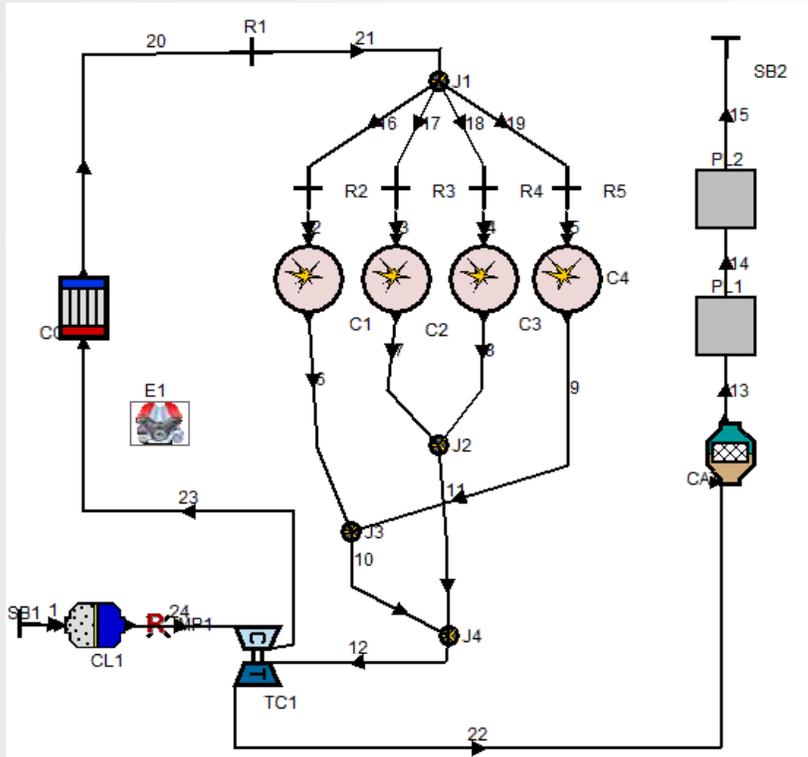
Target



Alcançar 85% da
pressão média
efetiva (IMEP)
máxima do motor
SI base

Fonte: Fonte: Autores, 2021. Adaptado
de Lawler et. al. 2016; 2018.

Modelo de Cálculo



Representação do motor THP. Fonte: Spark Heat Ignition, 2020

- Para o cálculo da melhoria do projeto, foi utilizado o software *AVL BOOST*;
- Utilização do modelo de combustão Vibe. Esse modelo funciona baseando-se nas características de liberação de energia da combustão, em função da massa de combustível queimada;
- Simulação do motor base THP 1.6L e adaptação para ciclo HCCI.

$$\frac{dx}{d\alpha} = \frac{a}{\Delta\alpha_c} \cdot (m+1) \cdot y^m \cdot e^{-a \cdot y^{(m+1)}}$$

$$dx = \frac{dQ}{Q}$$

$$y = \frac{\alpha - \alpha_o}{\Delta\alpha_c}$$

$$x = \int \frac{dx}{d\alpha} \cdot d\alpha = 1 - e^{-a \cdot y^{(m+1)}}$$

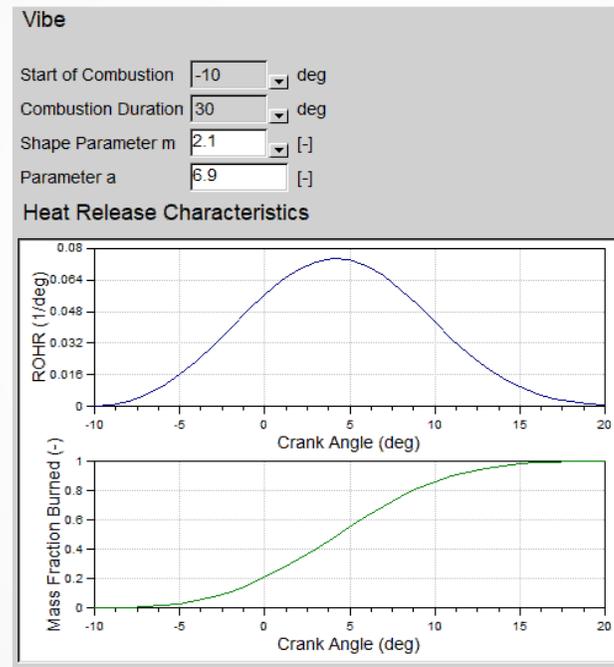
Curva VIBE.

Fonte: AVL Boost User Manual

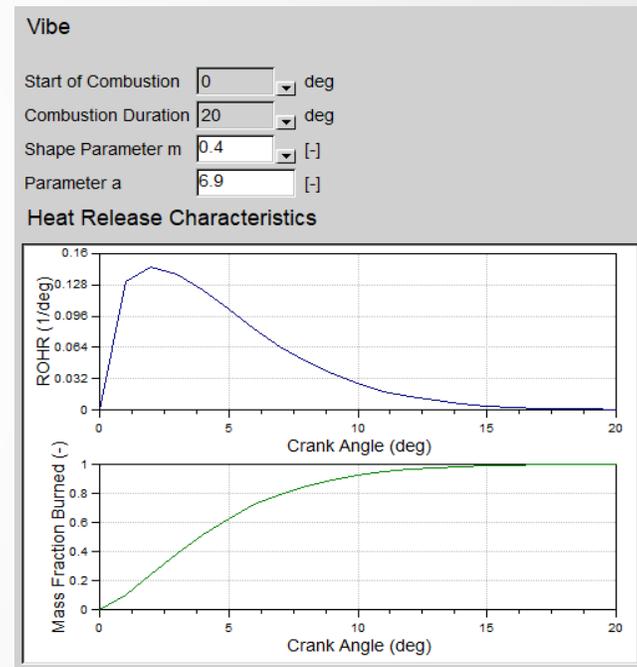
Hipóteses simplificadoras

- Para o modelo HCCI:
 - Aumento da taxa de compressão de 10.5:1 para 16:1;
 - Diminuição da quantidade de combustível queimada de $\phi=1$ para $\phi=0,5$;
 - Adequação da curva de liberação de energia (VIBE);
 - Adequação dos parâmetros de combustão.
- Para o modelo FCI
 - Adequação dos parâmetros de combustão.

Fonte: Adaptado de Lawler et. al. 2016; 2018 e Spark Heat Ignition, 2020



Parâmetro VIBE do motor THP. Fonte: Spark Heat Ignition, 2020



Parâmetro VIBE do motor HCCI. Fonte: Autores, 2021

Hipóteses simplificadoras

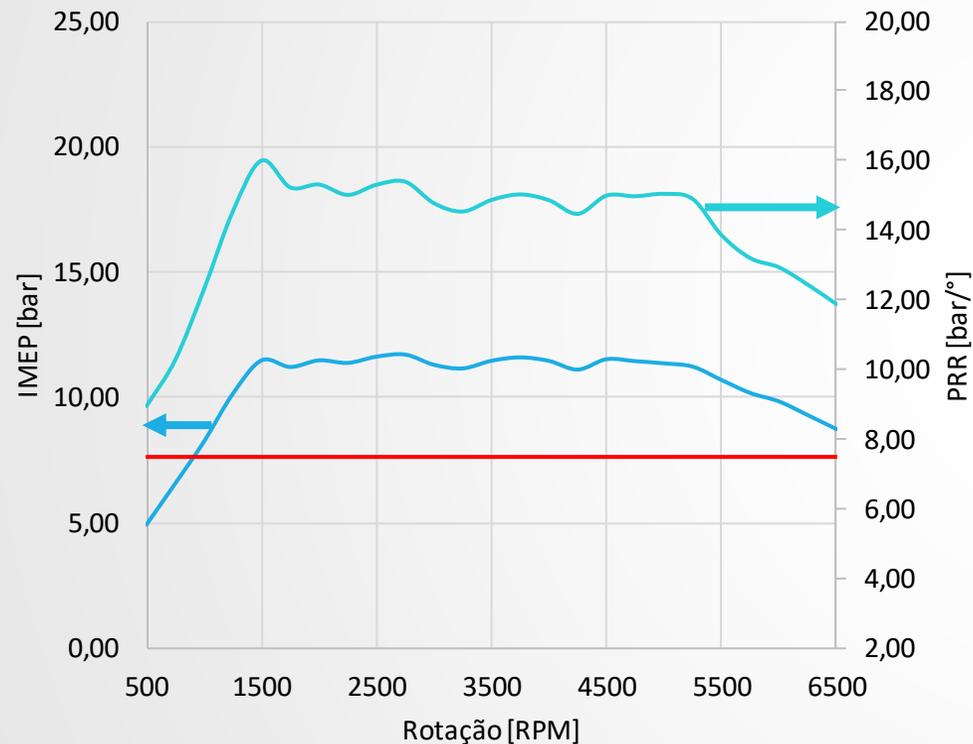
Trabalho FCI - Motor HCCI Puro Phi = 0,5		
RPM	Ignition Timing	Combustion Duration
500	0	20
750	0	20
1000	0	20
1250	0	20
1500	0	20
1750	0	20
2000	0	20
2250	0	20
2500	0	20
2750	-5	22,5
3000	-5	22,5
3250	-5	22,5
3500	-5	22,5
3750	-5	22,5
4000	-5	22,5
4250	-5	22,5
4500	-5	22,5
4750	-5	22,5
5000	-5	22,5
5250	-5	22,5
5500	-10	25
5750	-10	25
6000	-10	25
6250	-10	25
6500	-10	25

Trabalho FCI - Motor FCI Phi = 0,5		
RPM	Ignition Timing	Combustion Duration
500	5	35,4
750	5	35,4
1000	5	35,4
1250	5	35,4
1500	5	35,4
1750	5	35,4
2000	5	35,4
2250	5	35,4
2500	5	35,4
2750	0	39,825
3000	0	39,825
3250	0	39,825
3500	0	39,825
3750	0	39,825
4000	0	39,825
4250	0	39,825
4500	0	39,825
4750	0	39,825
5000	0	39,825
5250	0	39,825
5500	-5	44,25
5750	-5	44,25
6000	-5	44,25
6250	-5	44,25
6500	-5	44,25

Novos parâmetros de combustão motores adaptados HCCI e FCI.
 Fonte: Autores, 2021. Adaptado de Lawler et. al. 2016; 2018.

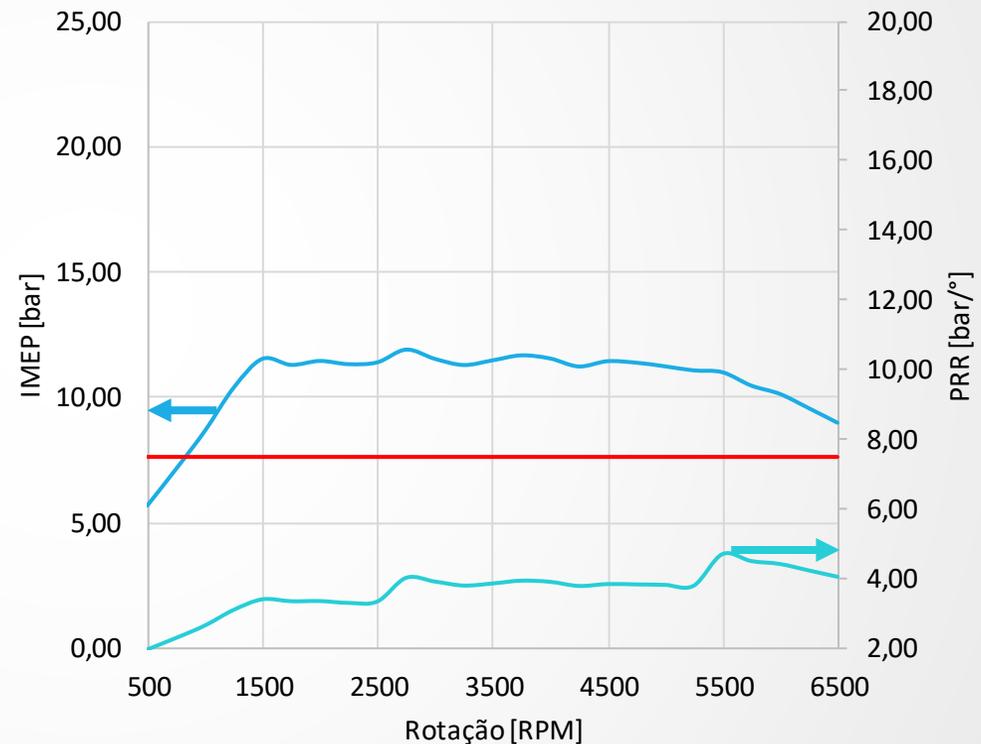
Resultados HCCI vs FCI

IMEP e PRR: HCCI Gasolina $\phi=0,5$



HCCI_G_05_IMEP HCCI_G_05_PRR MaxPRR

IMEP e PRR: FCI Gasolina $\phi=0,5$

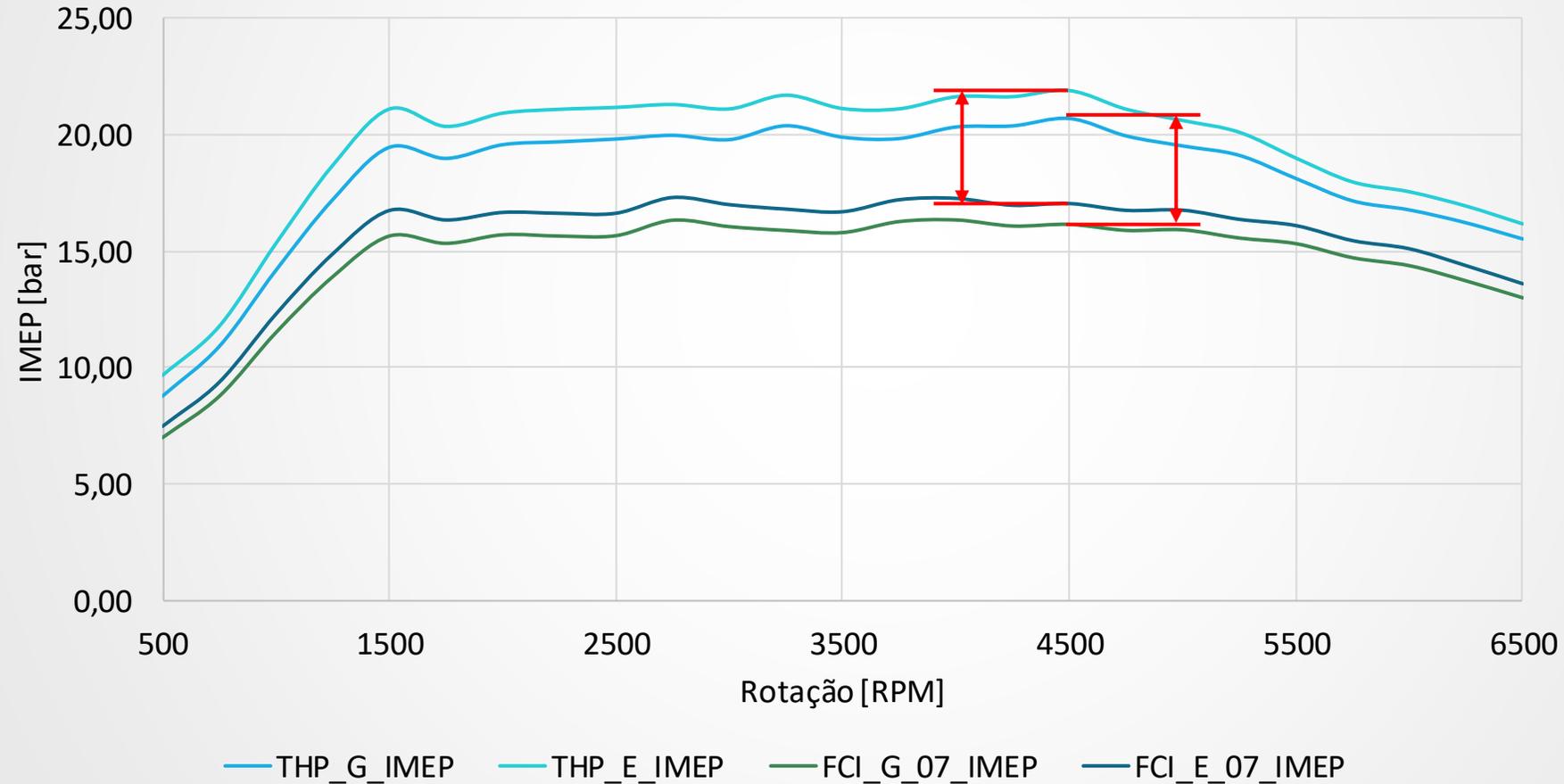


FCI_G_05_IMEP FCI_G_05_PRR MaxPRR

Fonte: Autores

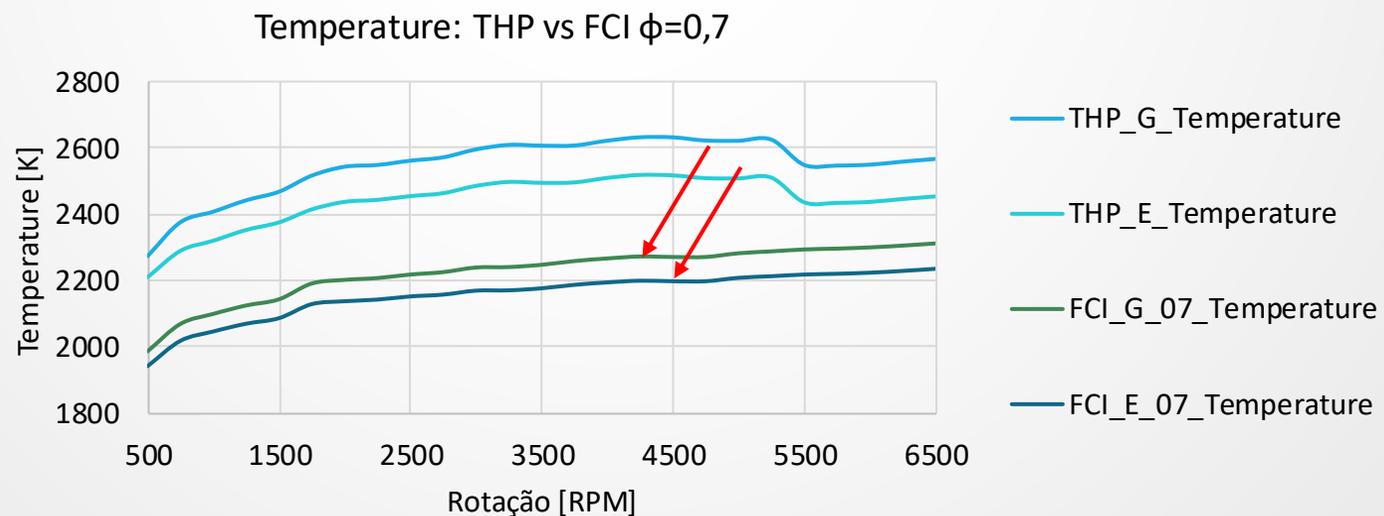
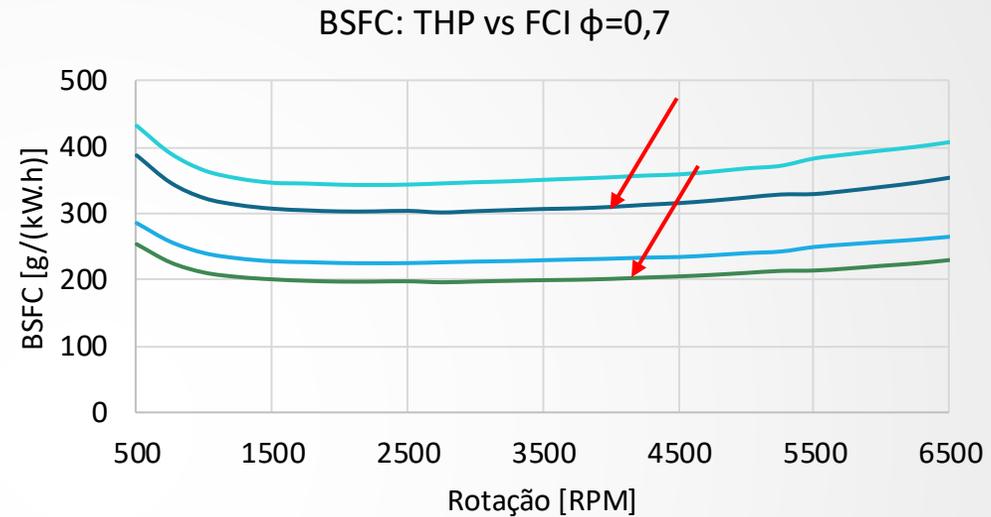
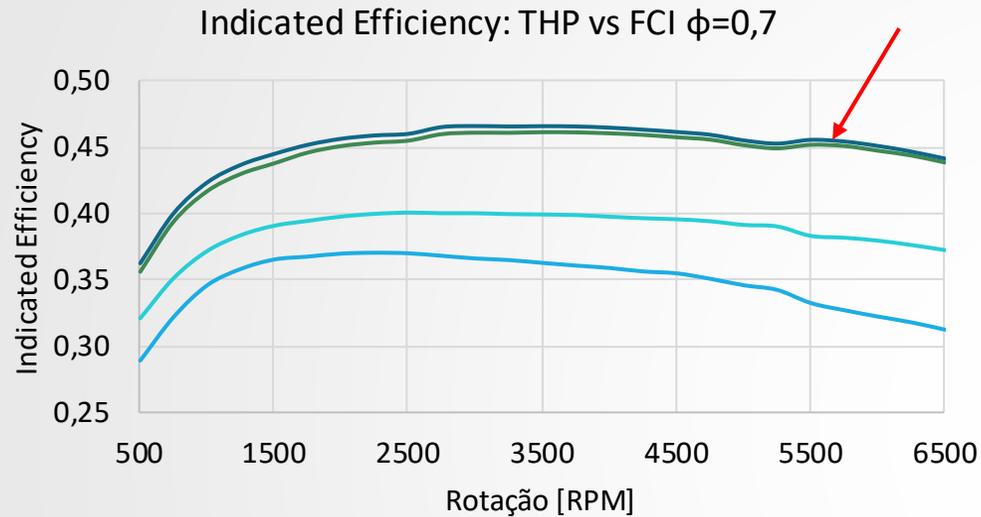
Resultados FCI

IMEP: THP vs FCI $\phi=0,7$



Fonte: Autores

Resultados FCI



Fonte: Autores

Conclusões

- Pôde ser observado que o aumento da duração de combustão, consequência da estratificação térmica, foi capaz de levar o motor HCCI para condições aceitáveis de funcionamento;
- O IMEP menor, em comparação com a referencia, indica menor performance, como se esperado num ciclo HCCI;
- O motor FCI apresenta os benefícios característicos do ciclo HCCI, sendo eles:
 - Ganho médio de 13% e 12% de consumo específico;
 - Redução na temperatura de queima média de queima de 13% e 12% ;
 - Aumento na eficiência indicada do motor de 28% e 16%.

Dimensionamento do sistema – Vazão de injeção

Condição limitante: Carga 0,3 etanol, injeção de 6,6mg por ciclo

RPM	Nº ciclos/minuto	Nº ciclos/segundo	Graus vira/segundo	Tempo p/ injeção [ms]	Taxa de injeção [mg/ms]
500	250	4,167	1500	6,67	0,99
750	375	6,250	2250	4,44	1,49
1000	500	8,333	3000	3,33	1,98
1250	625	10,417	3750	2,67	2,48
1500	750	12,500	4500	2,22	2,97
1750	875	14,583	5250	1,90	3,47
2000	1000	16,667	6000	1,67	3,96
2250	1125	18,750	6750	1,48	4,46
2500	1250	20,833	7500	1,33	4,95
2750	1375	22,917	8250	1,21	5,45
3000	1500	25,000	9000	1,11	5,94
3250	1625	27,083	9750	1,03	6,44
3500	1750	29,167	10500	0,95	6,93
3750	1875	31,250	11250	0,89	7,43
4000	2000	33,333	12000	0,83	7,92
4250	2125	35,417	12750	0,78	8,42
4500	2250	37,500	13500	0,74	8,91
4750	2375	39,583	14250	0,70	9,41
5000	2500	41,667	15000	0,67	9,90
5250	2625	43,750	15750	0,63	10,40
5500	2750	45,833	16500	0,61	10,89
5750	2875	47,917	17250	0,58	11,39
6000	3000	50,000	18000	0,56	11,88
6250	3125	52,083	18750	0,53	12,38
6500	3250	54,167	19500	0,51	12,87



$$Q_{inj} = 12,87 \left[\frac{mg}{ms} \right] * 60 \left[\frac{s}{min} \right]$$

$$= 772,2 \text{ g/min}$$

Ajustando para 100 bar (Nominal de catálogo):

$$Q' = 772,2 \times \sqrt{\frac{100}{85}} = \underline{837,6 \text{ g/min}}$$

Dimensionamento do sistema – Vazão máxima

- Injeção máxima de água = 7,4 mg/ciclo

- RPM máximo = 6500 rpm

- $Q_{m\acute{a}x\ cilindro} = 7,4 \left[\frac{mg}{ciclo} \right] \times 6500 [rpm] \times 0,5 \left[\frac{ciclo}{rota\c{c}o} \right] = 24050 \left[\frac{mg}{minuto} \right]$ ←

- $Q_{m\acute{a}x\ cilindro} = 24050 \left[\frac{mg}{minuto} \right] \times \left(\frac{1}{1000^2} \right) \left[\frac{Kg}{mg} \right] \times 60 \left[\frac{minuto}{hora} \right] = 1,443 \left[\frac{kg}{hora} \right]$ ←

- $Q_{m\acute{a}x\ cilindro} = 1,443 \left[\frac{kg}{hora} \right] * \left(\frac{1}{0,997} \right) \left[\frac{L}{Kg} \right] = 1,45 \left[\frac{L}{hora} \right]$ ←

- $Q_{m\acute{a}x\ bomba} = 1,45 \left[\frac{L}{hora} \right] \times 4 [n^{\circ} cilindros] = 5,8 \left[\frac{L}{hora} \right]$ ←

Dimensionamento do sistema

Sistema de injeção de água

Sistema de injeção de água							
Componente							
	Válvula injetora	Tubo distribuidor	Bomba de alta pressão	Filtro externo	Tubulação de água	Bomba elétrica	Filtro interno
	Bosch HP Injection Valve HDEV 5.2	Modelo já presente no motor THP 1.6	Bosch HP Fuel Pump HDP 5-FCV		Hansa-Flex TE 104	Bosch Fuel Pump FP 200	
Especificações	Faixa de vazões: 24 a 838 g/min	Pressão de operação: Até 200 bar	Pressão de saída: Até 200 bar	Filtragem necessária: 1 a 40 microns	Pressão operacional: 10 bar	Vazão mínima: 5,8 l/h	Filtragem necessária: 25 a 400 microns
	Pressão suportada: 85 a 200 bar		Pressão de entrada: 4 a 7 bar		Raio mínimo de curvatura: 35 mm	Pressão de saída: 5 a 8 bar	

Reservatório

- Combinar autonomia de água com autonomia de combustível
- Veículo utilizado como referência p/ grandezas: Peugeot 308 1.6 THP Automático (6 marchas), modelo 2014
- Ciclos de condução: FTP 75 p/ urbano e ABNT NBR 7024 p/ rodoviário
- Sempre considerando uso de etanol (condição com injeção de água também em menores cargas)
- $900 < RPM_{motor} < 2200$
- Se $0,86 \leq \text{carga} < 1 \rightarrow 7,4 \text{ mg/ciclo}$
- Se $0,0 < \text{carga} < 0,86 \rightarrow 6,6 \text{ mg/ciclo}$

Φ	0,3	0,5	0,6	0,7
Carga	0,43	0,71	0,86	1
mg/ciclo	6,6	6,6	7,4	7,4

Reservatório

- Distância Percorrida: 11,04 Km
- Consumo total: 0,34765 L
- Média: 31,76 Km/L
- Autonomia necessária: 483,8 Km
- Volume necessário: 15,234 L ←
- Adota-se um coeficiente de segurança de 1,25 para o volume do reservatório:

$$V_{res} = 15,234 \cdot 1,25$$

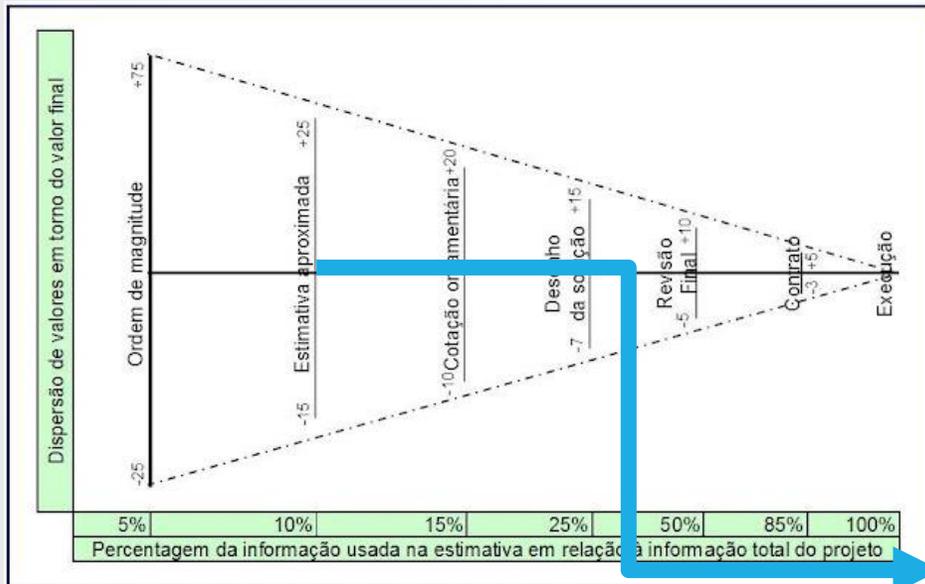
$$V_{res} \approx 19 L$$

Ciclo Urbano (FTP 75)

	Cidade		Estrada	
	[km]	[km/L]	[km]	[km/L]
Autonomia Etanol	483,8	8,1	598,1	10,0
Autonomia Gasolina	718,7	12,0	874,6	14,6

Fonte: Autores

Custo do sistema

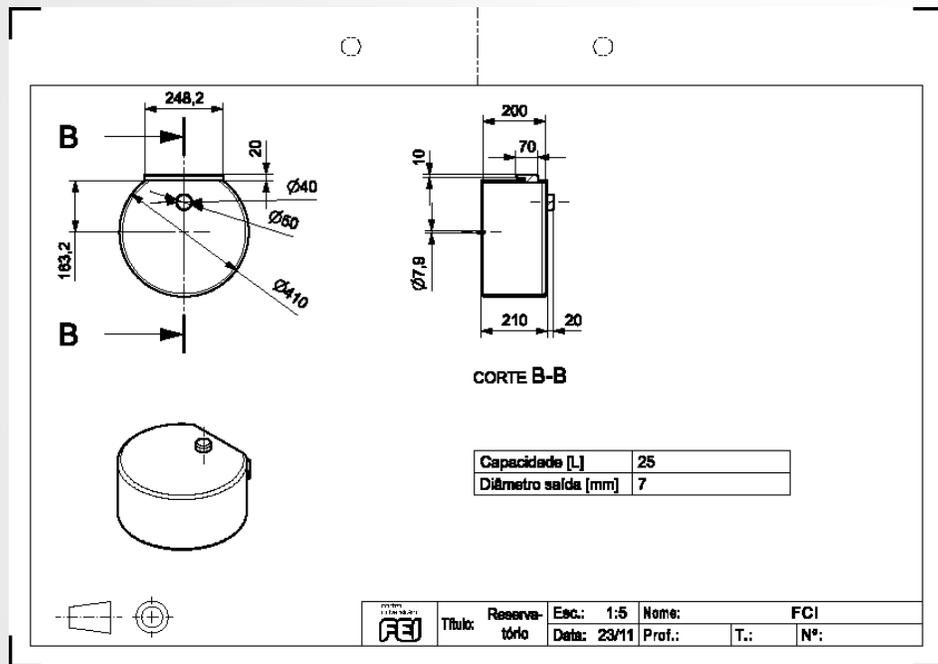


Fonte: International Cost Engineering Council (ICEC)

Item	Valor estimado	Qty
Válvula injetora	R\$ 80,00	4
Bomba baixa	R\$ 52,00	1
Bomba alta	R\$ 2.000,00	1
Mangueira	R\$ 14,22	0,5
Flauta	R\$ 1.000,00	1
Filtro in tank	R\$ 24,00	1
Filtro	R\$ 40,00	1
Reservatório	R\$ 300,00	1
Valor total	R\$ 3.743,11	
Valor mínimo	R\$ 3.181,64	-15,00%
Valor máximo	R\$ 4.678,89	25,00%

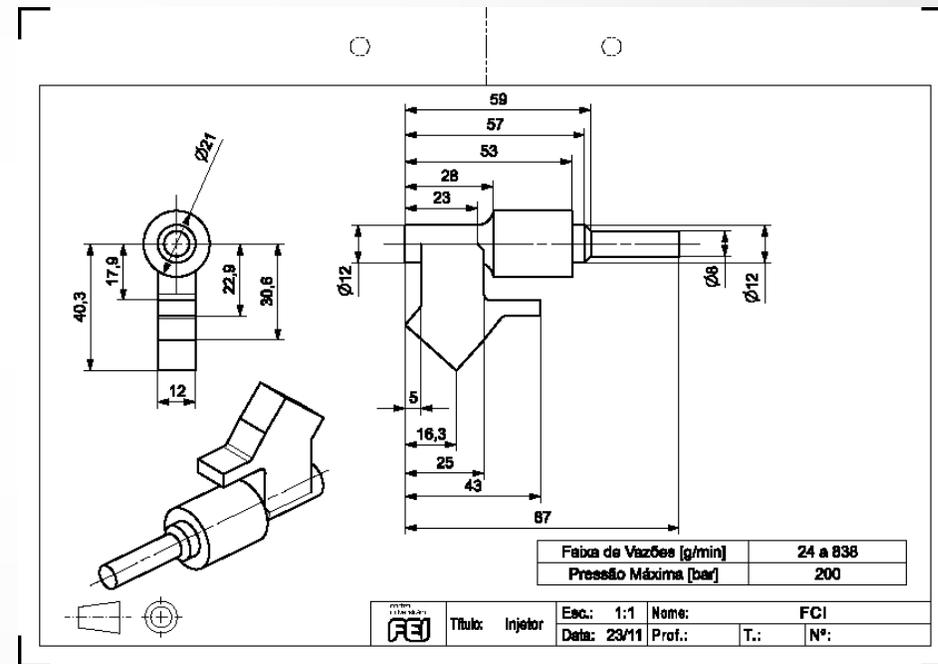
Desenhos 2D

Reservatório



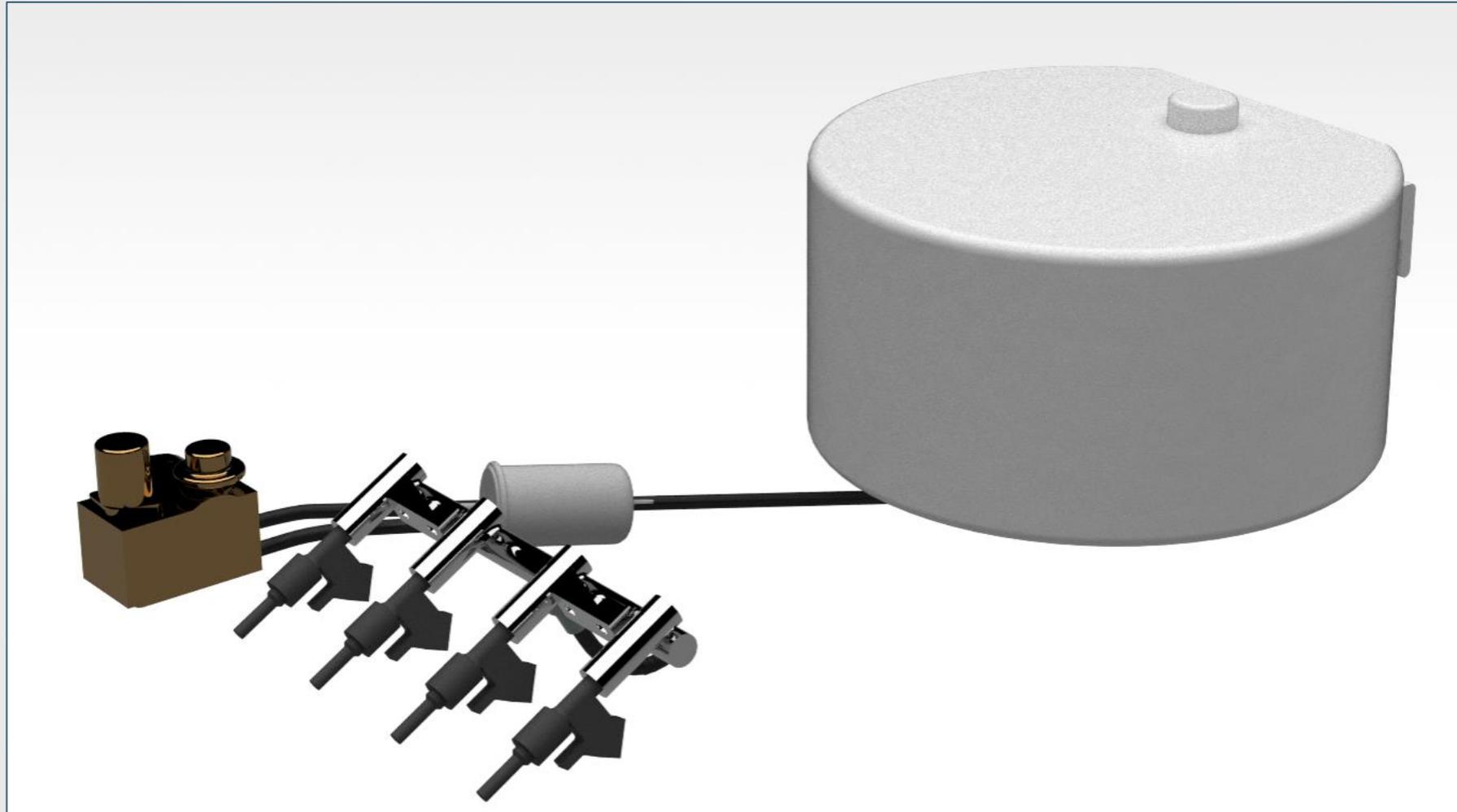
Fonte: Autores

Válvula Injetora



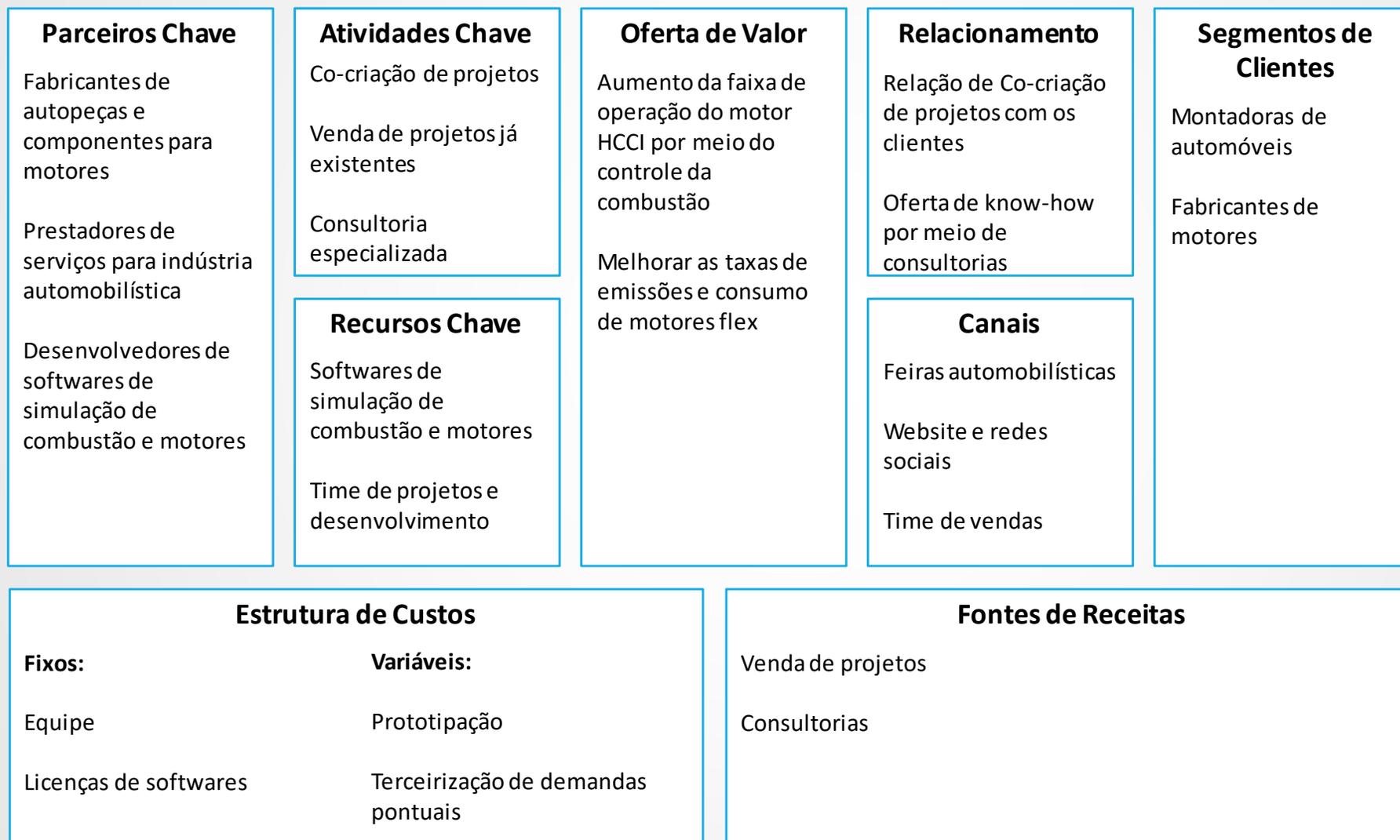
Fonte: Autores

Modelo 3D



Fonte: Autores

Business CANVAS



Website FCI

[Link do site](#)



Referência Bibliográfica

- BOLDAJI, M. R.; GAINEY, B.; LAWLER, B. Thermally stratified compression ignition enabled by wet ethanol with a split injection strategy: A CFD simulation study, 2018.
- DELOITTE. Electric vehicles, Setting a course for 2030. **Deloitte Insights**, 2020.
- GAINEY, B. et al. A split injection of wet ethanol to enable thermally stratified compression ignition, 2018.
- LAWLER, B. et al. Thermally Stratified Compression Ignition: A new advanced low temperature combustion mode with load flexibility, 2016.
- MALAQUIAS, A. C. T. et al. The misleading total replacement of internal combustion engines by electric motors and a study of the Brazilian ethanol importance for the sustainable future of mobility: a review, 2019.
- OLESKY, L. M. et al. Bridging the Gap between HCCI and SI: Spark-Assisted Compression Ignition, 2011.
- SOLMAZ, H. A comparative study on the usage of fusel oil and reference fuels in an HCCI, 2020.
- YAO, M.; ZHENG, Z.; LIU, H. Progress and recent trends in homogeneous charge compression ignition (HCCI) engines, 2009.
- BAHRI, B. et al. Ethanol Fuelled HCCI Engine: A Review, 2013.
- YELVINGTON, P. E.; GREEN, W. H. Prediction of the Knock Limit and Viable Operating Range for a Homogeneous-Charge Compression-Ignition (HCCI) Engine, 2003.
- SJÖBERG, M.; DEC, J. E.; CERNANSKY, N. P. Potential of Thermal Stratification and Combustion Retard for Reducing Pressure-Rise Rates in HCCI Engines, Based on Multi-Zone Modeling and Experiments, 2005.
- STANGLMAIER, R. H.; ROBERTS, C. E. Homogeneous Charge Compression Ignition (HCCI): Benefits, Compromises, and Future Engine Applications, 1999.
- DIBBLE, M. A. R. et al. Current Research in HCCI Combustion, 2001.
- AVL Boost User Manual, 2021.

Obrigado!