



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE SALINÓPOLIS  
FACULDADE DE ENGENHARIA

**PVBtCalc: Uma Ferramenta Analítica para Determinação do Pore Volume to  
Breakthrough**

Luiz Guilherme Valente Cardoso <sup>1</sup>

---

<sup>1</sup> Graduando em Engenharia de Exploração e Produção de Petróleo pela Universidade Federal do Pará (UFPA) – Campus Universitário de Salinópolis. Com atuação em simulação e desenvolvimento de ferramentas computacionais aplicadas à engenharia de petróleo. E-mail: valenteguulg@gmail.com

## RESUMO

A acidificação matricial em carbonatos é uma técnica de estimulação em poços que se baseia na interação rocha/fluido reativa dentro do reservatório. A aplicação da técnica cria, através da dissociação da matriz da rocha, um canal de alta condutividade através da rocha. O PVBt (*Pore Volume to Breakthrough*) é uma medida do volume de ácido gasto pelo volume poroso, para efetivamente alcançar uma distância pré-determinada a partir do ponto de injeção. Embora o PVBt seja o principal parâmetro laboratorial de performance de um tratamento de estimulação ácida da matriz, a sua obtenção é dependente de ensaios experimentais complexos e custosos. Modelos matemáticos podem ser utilizados para evitar a execução de ensaios experimentais desnecessários ou auxiliar no planejamento. Nesse contexto, a utilização de um modelo válido e uma interface amigável é extremamente importante para a análise confiável dos resultados. Este trabalho apresenta uma aplicação *web*, o PVBtCalc, desenvolvido para o estudo e análise de como o PVBt se comporta em fluxo linear e quais mudanças ela sofre com a variação desses parâmetros, mas não limitando-se apenas a isso. A ferramenta permite a escolha de 3 sistemas ácidos para 6 tipos de rochas, e dá ao usuário a possibilidade de variar parâmetros como temperatura, pressão, vazão e porosidade. Os resultados são apresentados na forma de tabela e de forma gráfica, em escalas semi-log, log-log e aritmética, em função da vazão. O modelo utilizado na *webapp* é fundamentado no trabalho de Mahmoud e Ziauddin publicado em 2020. Os testes de validação realizados mostraram que a *webapp* está de acordo com os resultados obtidos pelo modelo original e a sua versatilidade na apresentação de resultados. O PVBtCalc é uma ferramenta de auxílio ao pesquisador com alto potencial de aplicação em laboratórios de pesquisa de estimulação ácida em matriz pela sua flexibilidade e gama de parâmetros calculados, além do PVBt.

Palavras-chave: Acidificação, PVBt, Carbonatos, Estimulação, Software.

**PVBtCalc: Uma Ferramenta Analítica para Determinação do Pore Volume to  
Breakthrough**

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) aprovado por:

**BANCA EXAMINADORA**

---

ANDRESA DOS SANTOS VALENTE  
(UFPA - Docente Externo à Instituição)

---

CLAUDIO REGIS DOS SANTOS LUCAS  
(Orientador)

---

JOSÉ FRANK VANZELER GONCALVES  
(UFPA - Docente Externo à Instituição)

---

SILVÉRIO SIROTHEAU CORREA NETO  
(Docente Interno)

---

THIAGO RAFAEL DA SILVA MOURA  
(Docente Interno)

Assinatura do Orientador: \_\_\_\_\_

Data de submissão: 06/04/2025

Data de defesa: 08/04/2025

## 1 INTRODUÇÃO

A acidificação matricial em carbonatos é uma técnica de estimulação em poços na qual fluidos reativos são injetados abaixo da pressão de fraturamento da formação para melhorar a produção do poço (Ali & Ziauddin, 2020). Essa técnica se baseia na interação rocha/fluido reativa dentro do reservatório criando, através da dissociação da matriz rochosa, em contato com soluções ácidas, um canal de alta condutividade de um ponto (ponto de injeção) a outro. Esse canal, por sua vez, permite a restauração ou incremento na permeabilidade original do reservatório (principal propriedade que controla o fluxo dentro de qualquer rocha) melhorando a produção do poço. Nos cenários ideais para uma acidificação bem-sucedida, um único canal dominante (chamado de *wormhole* dominante) é observado. Em termos econômicos, um único canal dominante indica o cenário com menor gasto de solução ácida para atingir uma distância desejada. Além da questão econômica, um canal sem ramificações, permite um melhor fluxo de fluido pelo seu interior, garantindo um único caminho preferencial pelo fluido em escoamento. Um canal muito ramificado leva a um gasto desnecessário de solução ácida e uma baixa efetividade no melhoramento da permeabilidade dado um volume fixo de tratamento. Dentro da análise e dos estudos de um processo de acidificação e dos fatores que afetam o seu comportamento, um parâmetro em especial é verificado. O *Pore Volume to Breakthrough* (PVBt) é o principal parâmetro de análise da performance de um processo de acidificação matricial em carbonatos. A partir do PVBt, que relaciona a quantidade de solução ácida gasto no processo e o volume poroso da rocha, é possível saber o quão eficiente foi o processo de acidificação e ter uma noção do padrão de dissolução ocorrido durante o processo. As diferentes Performances, bem como os padrões de dissolução associados a elas, em geral são analisadas variando a taxa de injeção. A Figura 1, mostra o padrão de dissolução para diferentes valores de PVBt em função da taxa de injeção. O padrão de dissolução, pode se alterar de acordo com as condições a qual o experimento é realizado, ainda assim, o ponto de PVBt ótimo (ponto em que o valor de PVBt é mínimo), geralmente vai representar um padrão de dissolução de 1 *wormhole* dominante e com poucas ramificações. Dois tipos principais de modelos estão disponíveis na literatura para o avanço de um *wormhole* durante um processo de acidificação. Os modelos semi-empíricos, são considerados computacionalmente rápidos, mas não são representativos o suficiente às dimensões do *core* ou ao fluxo radial. Existem também os modelos de simulação numérica, que representam bem a física dos processos individuais, mas são computacionalmente custosos e impraticáveis para uso em escala de campo (Ali & Ziauddin, 2020). Apesar de sua importância, o cálculo do PVBt tradicionalmente depende de

ensaios laboratoriais demorados e custosos. Com isso, o desenvolvimento de ferramentas computacionais baseadas em modelos matemáticos se torna uma alternativa vantajosa. Este trabalho visa apresentar uma *webapp* desenvolvido internamente, o PVbtCalc, que automatiza esse processo de forma acessível e confiável.

## **2 REFERENCIAL TEÓRICO**

O modelo utilizado no PVBtCalc é baseado nos estudos de Ali & Ziauddin (2020), que propuseram uma abordagem analítica para o cálculo do PVBt em carbonatos. O modelo leva em conta variáveis como porosidade, concentração de ácido, vazão, velocidade intersticial e taxa de reação. Outros estudos utilizados como base incluem Dong (2012) e Zakaria *et al.* (2015), que forneceram dados experimentais para validação do modelo.

### **3 METODOLOGIA**

O *software* foi desenvolvido utilizando a linguagem Python no *backend*, com o *framework* FastAPI, e a biblioteca React com TypeScript no *frontend*. A comunicação entre as partes foi feita via requisições HTTP, permitindo ao usuário inserir dados, realizar cálculos e visualizar os resultados em tempo real.

#### **3.1 O locus da pesquisa**

A pesquisa foi desenvolvida no Laboratório de Ciência e Engenharia de Petróleo (LCPetro) da UFPA - Campus Universitário de Salinópolis.

#### **3.2 Delimitação do estudo**

O estudo foi realizado ao longo do período de iniciação científica e do desenvolvimento do Trabalho de Conclusão de Curso, entre agosto de 2021 e março de 2025.

#### **3.3 Procedimentos**

A implementação do modelo se deu a partir da codificação das equações propostas por Ali & Ziauddin (2020). Foram realizados testes comparativos com dados da literatura para validação dos resultados. A interface foi desenvolvida de forma interativa, com *feedbacks* de colegas e professores do laboratório.

## 4 DESENVOLVIMENTO

### 4.1 Desenvolvimento

Ali & Ziauddin (2020), desenvolveram um modelo simples para acidificação em carbonatos, escalável com as dimensões do core e aplicável a todos os sistemas ácidos comumente usados, baseando-se na concentração de ácido e velocidade do fluido na ponta do wormhole. A partir da análise, do modelo proposto por Ali e Ziauddin, é possível descrever em função de diversos parâmetros, como a PVBt se comporta. O modelo para o cálculo de PVBt proposto por Ali & Ziauddin é na Eq. 1.

$$PVBt = \frac{q_0 t_b}{A_0 l_c \phi_t} \quad (1)$$

Onde  $q_0$  é a taxa de injeção na entrada em  $m^3/s$ ,  $\phi_t$  é a porosidade total da rocha em fração,  $A_0$  é a área de injeção em  $m^2$ ,  $l_c$  é o comprimento do core em  $m$  e  $t_b$  é o tempo necessário para o wormhole se propagar até uma distância  $x$  em segundos, dado pela Eq. 2

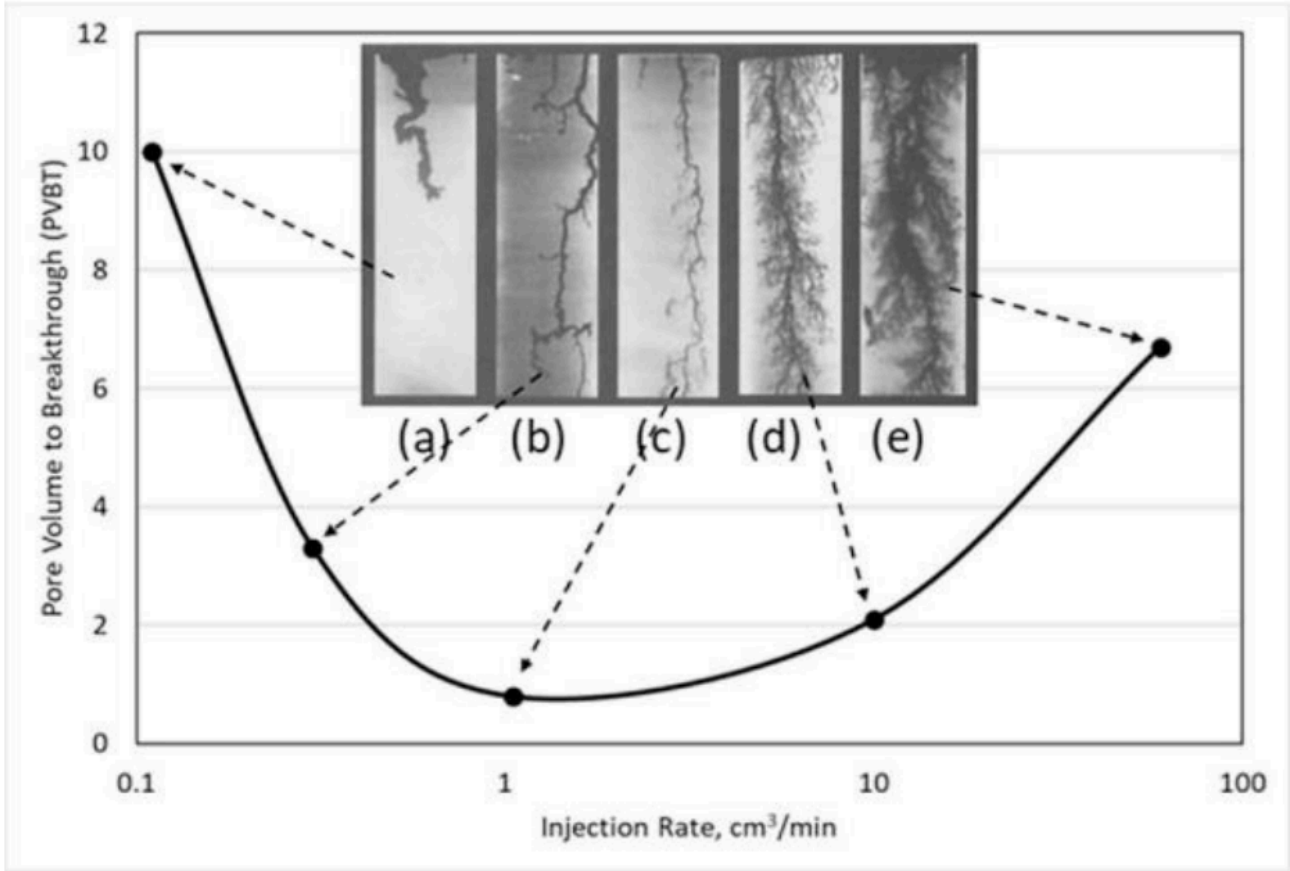
$$t = \frac{(1-\phi_t)}{C_{A0} X K_{eff}} \left( e^{\frac{k_{eff} l_c}{v}} - 1 \right) \quad (2)$$

Dessa forma, podemos obter o PVBt a partir da Eq. 2, fazendo

$$PVBt = \frac{q_0 (1-\phi_t)}{A_0 l_c \phi_t C_{A0} X K_{eff}} \left( e^{\frac{k_{eff} l_c}{v}} - 1 \right) \quad (3)$$

Onde  $CA_0$  é a concentração do ácido na entrada do wormhole em fração,  $X$  é o poder de dissolução volumétrico do ácido a 100% adimensional,  $K_{eff}$  é a constante de reação efetiva em  $1/s$ , e  $v$  é a velocidade do fluido dentro do wormhole em  $m/s$ .

Figura 1 - Curva de eficiência ácida com diferentes padrões de dissolução usando HCl 0,5 M à temperatura ambiente



Fonte: (Fredd and Fogler, 1996).

$$PVBt = \frac{q_0(1-\phi_r)}{\phi_r \lambda C_{A0} X \omega Da} (e^{Da\lambda} - 1) \quad (4)$$

A Eq. 4, é a forma adimensional do PVBt proposto por Ali e Ziauddin (2020). A equação na forma adimensional é escrita em termos do número de Damköhler ( $Da$ ), comprimento adimensional ( $\lambda$ ), comprimento característico ( $L$ ), tempo adimensional ( $\tau$ ), tempo característico ( $M$ ), raio adimensional ( $r$ ), raio do *core* ( $rc$ ) em  $m$ , velocidade adimensional ( $\omega$ ) e da velocidade de Darcy ( $v_0$ ) em  $m/s$ .

É possível ainda, relacionar o PVBt obtido em uma rocha para outro a partir do modelo se aplicarmos o conceito de *flow fraction*, verificado por Zakaria *et al.* (2015). O *flow fraction* representa a medida da porosidade da rocha que participa do fluxo de fluido, ou seja, o PVBt de um fluido inerte. Dessa forma, é possível utilizar o conceito de *flow fraction* para normalizar o PVBt observado a partir da Eq. 5.

$$\frac{PVBt_1}{f_1} = \frac{PVBt_2}{f_2} \quad (5)$$

Onde,  $f_1$  e  $f_2$ , representam o *flow fraction* da rocha do PVBt 1 e da rocha do PVBt 2, respectivamente. Adotando a *indiana limestone* como referência, temos um *flow fraction* = 1, e os valores de PVBt para outros tipos de rocha podem ser obtidos se conhecermos o valor do PVBt para a *indiana limestone*, a partir da Eq. 6.

$$PVBt_2 = PVBt_1 \cdot f_2 \quad (6)$$

Sendo  $PVBt_2$  e  $f_2$  o PVBt e o *flow fraction* da rocha não *indiana*, e o  $PVBt_1$  o valor do PVBt calculado para a *indiana limestone*.

Embora relativamente simples, o modelo proposto por Ali e Ziauddin (2020), permite o cálculo do PVBt para diferentes cenários criados a partir de parâmetros como temperatura, pressão, concentração do ácido e dimensões de *core*. Além disso, é possível obter outras diversas informações do modelo, como o tempo de Bt, Velocidade Intersticial, Volume de ácido etc. o que se mostra demorado e de difícil análise sem as ferramentas adequadas. Assim, esse trabalho objetiva associar o modelo aqui apresentado, bem como outras correlações de apoio, a uma interface amigável, intuitiva e prática a partir de uma linguagem de programação para o estudo e análise da PVBt.

A implementação das correlações ao código se deu por meio da análise dos trabalhos de Ali e Ziauddin (2020), Zakaria *et al.* (2015), e Green & Perry (2008) bem como da busca de materiais complementares na literatura. Durante o desenvolvimento e atualizações do *software* (batizado de PVBtCalc), versões de testes eram disponibilizadas a integrantes do Laboratório de Ciência e Engenharia de Petróleo (LCPetro), de onde *feedbacks* davam direcionamento a correções e melhorias.

Durante o processo de validação, testes eram executados definindo parâmetros semelhantes aos encontrados em testes laboratoriais, desse modo, os resultados como PVBt, e tempo de *Breakthrough* eram comparados na via experimental e teórica.

Após implementadas as correlações, o desenvolvimento do PVBtCalc ficou voltado a melhor maneira de extrair o máximo de informações dos recursos já inseridos, otimizando o tratamento de dados e buscando expandir o leque de opções do usuário quanto a análise do PVBt e seus parâmetros envolvidos.

## 4.2 Desenvolvimento Técnico da Aplicação Web

O desenvolvimento técnico da aplicação *web* PVBtCalc foi estruturado para garantir alta performance, interatividade e facilidade de uso, a partir de tecnologias modernas amplamente utilizadas no desenvolvimento de aplicações científicas e comerciais. A solução adotada seguiu uma arquitetura *frontend-backend* desacoplada, garantindo escalabilidade e manutenção facilitada.

O *frontend* foi desenvolvido utilizando o *framework* React aliado à linguagem TypeScript, o que proporcionou tipagem estática, maior previsibilidade de erros e uma base de código mais robusta. A escolha do Vite como empacotador da aplicação *frontend* se deu por sua performance superior em ambiente de desenvolvimento, oferecendo recarregamento instantâneo (*hot module replacement*) e *build* otimizado.

O *backend* da aplicação foi construído com Python, utilizando o *framework* FastAPI, reconhecido por sua simplicidade, velocidade e aderência aos padrões modernos de APIs RESTful. A biblioteca foi fundamental para a criação de uma interface leve e eficiente entre os cálculos matemáticos do modelo de Ali & Ziauddin (2020) e o *frontend*, possibilitando que os dados fossem processados no servidor e retornados de forma estruturada e rápida.

A comunicação entre *frontend* e *backend* foi realizada por meio de requisições HTTPs assíncronas utilizando o padrão JSON, o que permitiu interações dinâmicas e resposta em tempo real. As entradas fornecidas pelo usuário (como tipo de rocha, sistema ácido, porosidade, temperatura, vazão e dimensões do *core*) são enviadas ao *backend*, que realiza os cálculos do PVBt e de seus parâmetros associados, e retorna os dados para visualização.

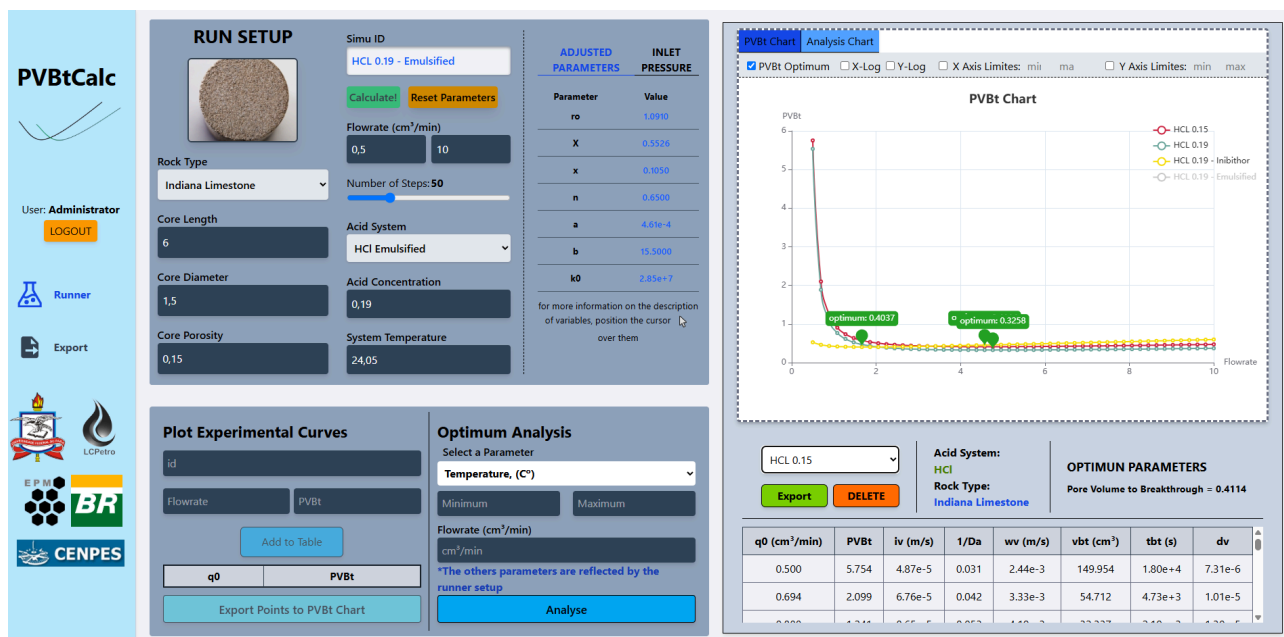
Além disso, o *frontend* foi estruturado com rotas intuitivas e menus interativos, organizando funcionalidades como simulações múltiplas, exportação de dados para planilhas, comparação entre curvas experimentais e teóricas, e análise do PVBt ótimo. A interface foi projetada com foco na experiência do usuário, de modo que qualquer pessoa com conhecimentos básicos sobre estimulação ácida possa operar a ferramenta de forma eficaz.

A integração entre essas tecnologias garantiu que o PVBtCalc não apenas entregasse resultados precisos, como também fosse uma ferramenta acessível, responsiva e preparada para futuras expansões.

## 5 ANÁLISES E DISCUSSÕES

Em sua versão final, o PVbtCalc se mostrou preciso o suficiente para ser usado como ferramenta de análise do comportamento do PVbt. Trazendo diversas ferramentas, como exportação de dados, comportamento do PVbt ótimo, 3 sistemas ácidos e 6 tipos diferentes de rochas. O PVbtCalc opera em um *range* de temperatura de 72 a 320°F, concentrações ácidas de 0,5 a 20wt%, diâmetros e comprimentos de 1 a 7in e 4 a 20in respectivamente, ainda assim, é possível realizar experimentos no *App* além desse *range*, mas com uma possível perda de precisão a depender do caso. A ferramenta dá o detalhamento de diversos parâmetros durante sua execução, em termos de resultados, é possível visualizar os valores de velocidade intersticial, tempo de breakthrough, inverso do número de Damköhler, velocidade no *wormhole*, e outros, em cada step bem como verificar a velocidade intersticial, a taxa de injeção, o inverso do número de Damköhler e o tempo de *breakthrough* para os valores do PVbt ótimo, o que nos dá uma ótima gama de resultados para serem utilizados.

Figura 2 - PVbtCalc Interface.



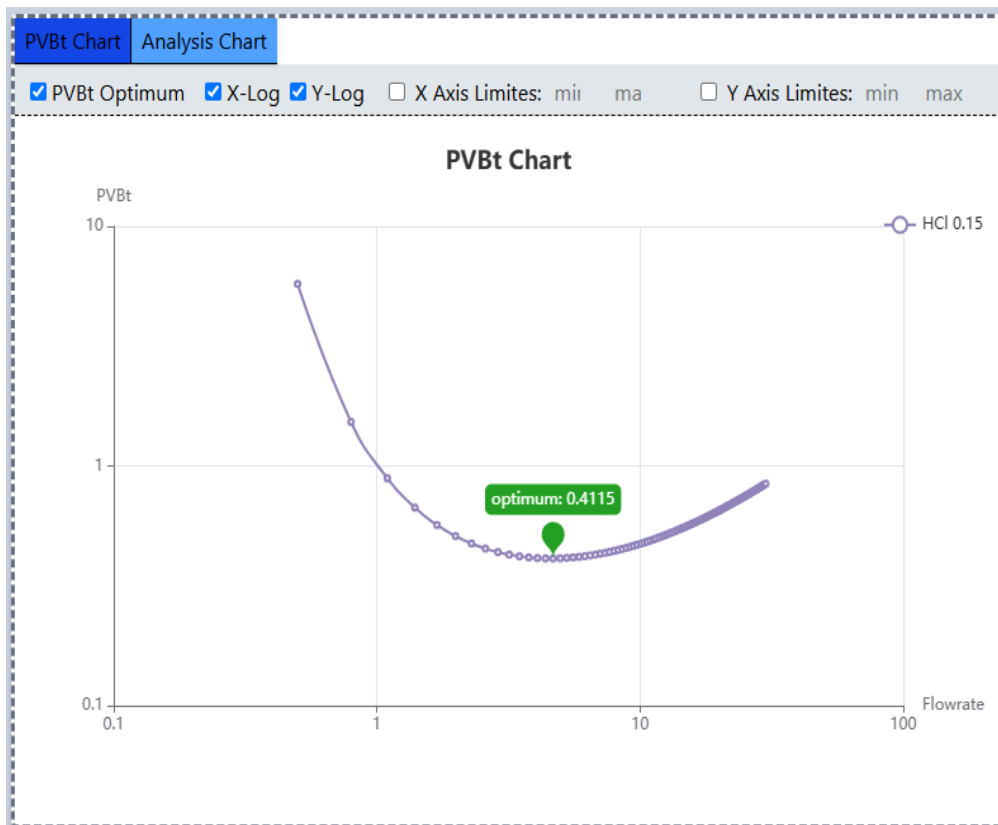
Fonte: PVbtCalc WebApp

## Características e interface

A apresentação inicial do programa, conta com uma interface navegável e amigável, que permite ao usuário, de maneira intuitiva, realizar as simulações sem problemas. A seção “*RUN SETUP*” (Fig. 2), é a principal funcionalidade do programa. Nela, é possível inserir todos os parâmetros de simulação. Ela nos permite criar uma curva de PVBt seguindo os parâmetros inseridos. No lado direito da tela inicial do programa, está localizado um gráfico onde é possível, acompanhar as curvas geradas pelos testes realizados no PVBtCalc. Os resultados de cada curva, podem ser analisados de maneira detalhada na tabela de resultados abaixo da exibição dos gráficos.

A seção de resultados gráficos na aplicação (Fig. 3), permite ao usuário exibir escalas log, plotar os pontos ótimos de PVBt bem como definir limites personalizados para os eixos x e y.

Figura 3 - Gráfico de PVBt via PVBtCalc



Fonte: PVBtCalc *WebApp*

A tabela de resultados (Fig. 2) apresenta todos os dados disponíveis em formas de tabelas, destacando em alguns labels parâmetros mais relevantes, como o valor de PVBt ótimo, e em qual sistema ácido/rocha o teste foi realizado.

Depois que um teste é realizado, é possível ainda exportar os dados desse teste para uma planilha no Excel. É possível realizar múltiplas curvas dentro do PVBtCalc, e acompanhar

detalhadamente os resultados de cada uma delas, selecionando o teste desejado por meio do *Dropdown* acima da tabela.

Além da opção de plotar curvas de PVBt em um determinado range de vazão, é possível também plotar pontos e curvas experimentais e modeladas de maneira mais específica por meio da seção “*Plot Experimental Curves*” Fig. 4.

Figura 4 - Ferramenta de curva experimental e comportamento de PVBt

The image shows a web application interface with two main panels. The left panel, titled "Plot Experimental Curves", contains a text input field labeled "id", two buttons labeled "Flowrate" and "PVBt", a blue "Add to Table" button, a table with two columns labeled "q0" and "PVBt", and a light blue "Export Points to PVBt Chart" button. The right panel, titled "Optimum Analysis", features a "Select a Parameter" dropdown menu currently set to "Temperature, (C°)", two buttons labeled "Minimum" and "Maximum", a "Flowrate (cm³/min)" input field with "cm³/min" entered, a note stating "\*The others parameters are reflected by the runner setup", and a blue "Analyse" button.

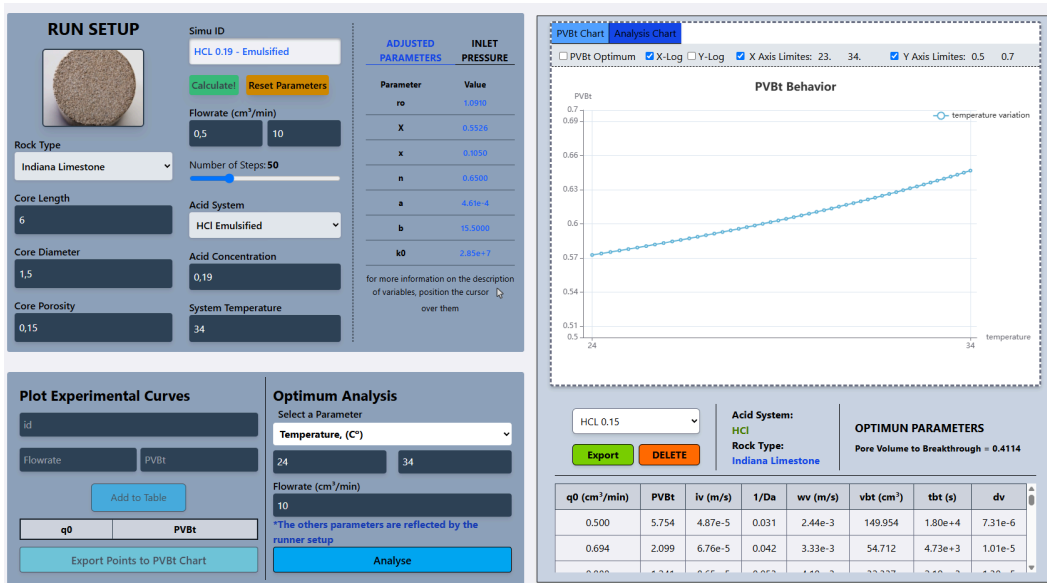
Fonte: PVBtCalc *Webapp*

Além de analisar o PVBt em termos gerais, como apresentado na exibição dos gráficos, e tabela de resultados, é possível ainda analisar o comportamento da PVBt apenas em função de seus parâmetros utilizando a seção “*Optimum Analysis*” que permite escolher a variação de parâmetros diversos, como temperatura, diâmetro e comprimento de plug.

Na Fig. 5 é possível analisar o comportamento do PVBt em função da variação de alguns parâmetros fundamentais como temperatura, diâmetro do *core*, comprimento do *core*, porosidade e concentração ácida. Carregando parâmetros Espalhados com a seção “*RUN SETUP*”, é possível realizar as análises de comportamento do PVBt em paralelo com as análises de comportamento do PVBt, uma vez que, a função “*Optimum Analysis*” apresenta seus resultados em um gráfico específico chamado de “*Analysis Chart*”.

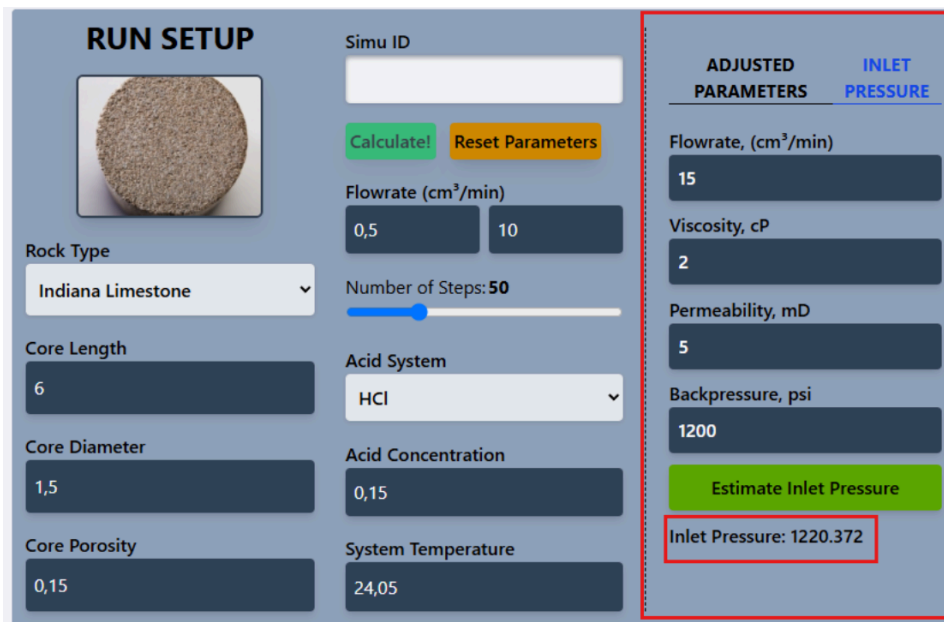
Outra ferramenta disponível no PVBtCalc, é a estimativa da pressão na entrada, como mostrado na figura 6. Por meio de um modelo matemático simplificado e alguns parâmetros extras, é possível estimar a pressão na entrada. Essa ferramenta funciona como um modelo independente, não impacta em nenhum nível a execução das curvas de PVBt, ainda assim, serve como parâmetro de comparação ou informação adicional para o usuário do PVBtCalc.

Figura 5 - Compartimento da PVbt com a variação da temperatura [24°C - 34°C]



Fonte: PVbtCalc WebApp

Figura 6 - Inlet Pressure Tool



Fonte: PVbtCalc WebApp

## Validação

Para a validação dos resultados obtidos a partir do PVbtCalc, primeiramente, verificou-se a integridade das equações, comparando resultados obtidos no App, com resultados disponíveis de um

exemplo presente no trabalho de Ali & Ziauddin (2020), extraído de Zakaria *et al.* (2015). Para esse caso a temperatura é 297,2°K, as dimensões de Core são 1,5in (diâmetro) e 6in (comprimento). O *core* utilizado é indiana limestone com porosidade de 15% e o sistema ácido utilizado é HCl com inibidor de corrosão. A taxa de injeção é de 0,612 cm<sup>3</sup> /min.

O PVbt obtido neste caso, foi:

$$PVbt = 0,6037$$

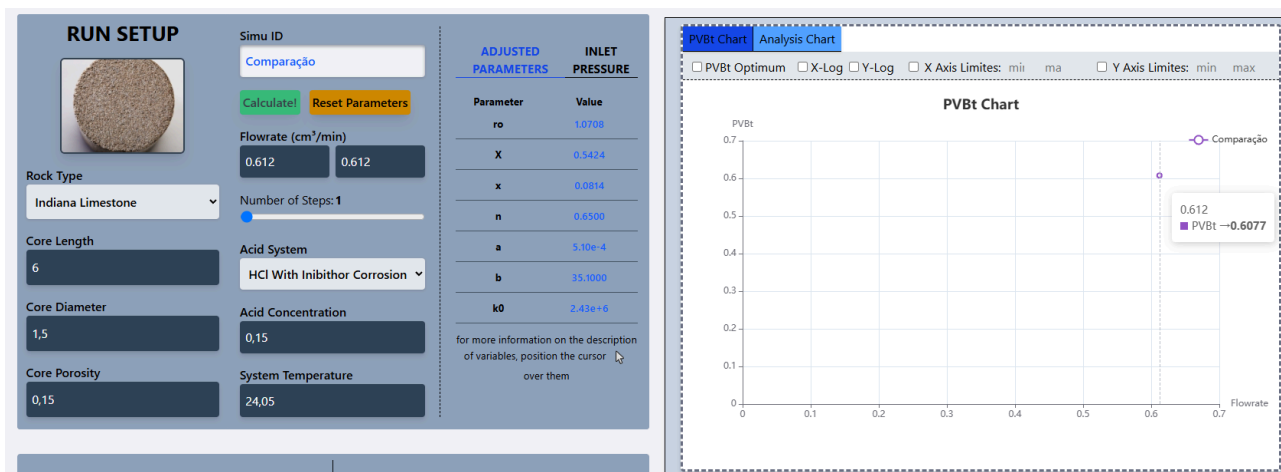
Enquanto o resultado obtido a partir do App PVbtCalc, foi de 0,6077, e pode ser observado na figura 7. Os erros referentes aos cálculos obtidos pelo app e o cálculo disponível no trabalho de Ali & Ziauddin. (2020) são expressos nas Eq. Abaixo.

$$Erro\ relativo = \frac{|0,6077 - 0,6037|}{0,6037} \times 100 = 0,6626\%$$

$$Erro\ Absoluto = 0,6077 - 0,6037 = 0,004$$

Os erros encontrados estão relacionados a pequenos arredondamentos realizados durante o processo de cálculo presente no trabalho de Ali & Ziauddin (2020)

Figura 7 – Validação da integridade do molelo Ali & Ziauddin (2020) via PVbtCalc



Fonte: PVbtCalc WebApp

Depois de verificar que o modelo presente no App se manteve fiel ao modelo presente no trabalho, foram comparados resultados experimentais com resultados obtidos no app, para verificação das PVbt's. Para isso, o principal trabalho utilizado foi Dong (2012).

Tabela 1 - PVBt comparison table: 75°F, 15% porosity, HCl 15wt%, Core: 1,5in diameter, 8in length

Velocidade intersticial (cm/min)	PVBt Experimental	PVBt PVBtCalc	Erro relativo (%)	Erro Absoluto
0,688	1,748	1,338	23,45	0,410
0,779	1,311	1,088	17,01	0,223
1,020	0,644	0,770	19,56	0,126
1,308	0,433	0,619	42,95	0,186
1,449	0,464	0,578	24,57	0,114
1,729	0,443	0,528	19,19	0,085
2,130	0,374	0,491	31,28	0,117
2,646	0,373	0,471	26,27	0,098
3,422	0,424	0,466	9,90	0,042
4,810	0,499	0,487	2,40	0,012
5,037	0,531	0,492	7,34	0,039

Fonte: Extraído de gráfico; Dong (2012)

Tabela 2 – PVBt comparison table: 75°F, 14% porosity, HCl 15wt%, Core: 1,0in diameter, 4in length

Velocidade intersticial (cm/min)	Experimental PVBt	PVBtCalc PVBt	Erro relativo (%)	Erro Absoluto
1,337	0,608	0,608	0	0
1,397	0,528	0,595	12,68939	0,067
2,123	0,536	0,527	1,679104	0,009
2,792	0,519	0,512	1,348748	0,007
3,515	0,487	0,514	5,544148	0,027
4,0283	0,519	0,520	0,192678	0,001
5,628	0,577	0,553	4,159445	0,024

Fonte: Extraído de gráfico; Dong (2012)

Fazendo uma média, dos erros relativos e absolutos, chegamos aos resultados expressos abaixo.

$$ErroR_{Med} = \sum_{i=1}^n \frac{Er_i}{n} = 13,86\% \quad (7)$$

$$ErroABS_{Med} = \sum_{i=1}^n \frac{Ea_i}{n} = 0,088 \quad (8)$$

Embora o Erro médio seja considerável, parte do erro associado, está relacionado às possíveis variações na porosidade das rochas, uma vez que Dong. (2012) classificou as diversas rochas, em porosidades médias, para grupos de comprimentos e diâmetros iguais. Desse modo, a porosidade individual de cada rocha é desconhecida, podendo variar em cerca de até 20%. Como o modelo proposto por Ali & Ziauddin (2020) depende da porosidade, valores diferentes dos reais, geram resultados diferentes dos reais. Para uma variação de 10% em uma rocha com porosidade 0,15. Um desvio máximo de 13,08% foi observado no valor do PVBt, representando 0,083 em termos de erro absoluto, o que mostra, que a falta de conhecimento dos valores individuais de porosidade, é parte relevante no erro relativo obtido nas Eqs 7 e 8. A tabela 3, mostra quanto o PVBt pode desviar com variações na porosidade.

Tabela 3 – PVBtCalc impact of porosity variation on PVBt value [75°F, HCl 15wt%, 1,5 in diameter, 6 in length, porosity variation 10%]

Taxa de injeção (cm <sup>3</sup> /min)	Porosity 13,5% (PVBt)	Porosity 15% (PVBt)	Porosity 16,5% (PVBt)	Erro relativo máx. (%)	Erro absoluto máx.
0,93	1,2823	1,1341	1,0128	13,06	0,148
1,47	0,7173	0,6343	0,5665	13,08	0,083
2,44	0,5210	0,4608	0,4115	13,06	0,060
2,80	0,4970	0,4395	0,3925	13,08	0,057
3,92	0,4673	0,4133	0,3691	13,06	0,054

Fonte: PVBtCalc Webapp

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Por fim, o PVBtCalc se mostrou mais preciso em certos cenários do que outros, chegando mais próximo de valores reais da PVBt em determinadas condições, o que é uma característica do próprio Modelo de Ali e Ziauddin (2020), ainda assim, embora haja erro associado ao modelo, o PVBtCalc se aproxima bem dos valores reais de PVBt na maioria dos casos em que foi testado, representando o comportamento da curva de PVBt com uma precisão mais do que aceitável. O PVBtCalc se mostra promissor como ferramenta de análise e estudo do comportamento do PVBt, entregando melhor performance para testes de múltiplos pontos, do que para análises de experimentos isolados de acidificação. É possível ainda, como já mencionado no trabalho, utilizar o PVBtCalc como ferramenta de planejamento nos experimentos de acidificação, tendo uma noção previsão de quais condições utilizar para chegar a um determinado resultado, ou qual resultado esperar baseado nas condições que o teste foi realizado. A interface simples e intuitiva permite que mesmo um usuário com pouca familiaridade a ambientes computacionais, aprenda a maneira como o *software* funciona em pouco tempo. O *App* consegue extrair o máximo de informações possíveis do modelo proposto e apresentar essas informações de maneira organizada para o usuário, atingindo de maneira satisfatória os objetivos para qual foi desenvolvido. Embora indicado principalmente para usos laboratoriais, o PVBtCalc é um *app* versátil, e permite ao usuário escolher a maneira como utilizá-lo, seja como ferramenta principal no estudo do comportamento do PVBt ou como ferramenta de auxílio na realização de experimentos de acidificação. No futuro, adaptações nas correlações e no modelo utilizado poderiam ser utilizadas para aproximar os resultados ainda mais do cenário real bem como expandir o *range* de funcionamento do programa, além de ser possível “prever” o tipo de padrão de dissolução a depender das condições em que o teste foi submetido, tornando o *app* cada vez mais fiel a física e ao comportamento de um processo de acidificação.

## REFERÊNCIAS

ABREU, Anna Maria Freire Cunha; SANDOVAL, Elza Marina da Silva. **Metodologia de ordenação do acervo jurídico**. São Paulo: Publishop, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6022**: informação e documentação: artigo em publicação periódica científica impressa: apresentação. Rio de Janeiro, 2018.

ALI, M.; ZIAUDDIN, M. Carbonate acidizing: A mechanistic model for wormhole growth in linear and radial flow. **Journal of Petroleum Science and Engineering**, v. 186, p. 106776, mar. 2020.

DONG, Kai. Experimental investigation for the effect of the core length on the optimum acid flux in carbonate acidizing. 2012. 81p. Dissertação (Mestrado em engenharia) - Texas A&M University, Brazos County, 2012.

GREEN, D. W.; PERRY, R. H. **Perry's chemical engineers' handbook**. New York: Mcgraw-Hill, 2008.

ZAKARIA, A. S. S.; NASR-EL-DIN, H. A. A.; ZIAUDDIN, M. Predicting the Performance of the Acid-Stimulation Treatments in Carbonate Reservoirs With Nondestructive Tracer Tests. **SPE Journal**, v. 20, n. 06, p. 1238–1253, 18 dez. 2015.

## AGRADECIMENTO

Primeiramente a Deus pois a ele devo minha saúde e todas as minhas conquistas. Agradeço a minha mãe, pelo amor e carinho dedicado em todos os meus anos de vida, que me deram forças e motivação para continuar mesmo em momentos difíceis, obrigada por tudo mãe! Agradeço também ao meu orientador Prof. Dr. Cláudio Lucas que me proporcionou essa oportunidade e nunca deixou de acreditar no meu potencial, além da assistência dada pela instituição em que eu estudo, Universidade Federal do Pará - UFPA (Campus universitário de Salinópolis), bolsa de iniciação científica concedida pela PROPESQ/UFPA no programa PIBIC/PRODOUTOR, que me permitiu iniciar o projeto, e todos os docentes que sempre estiveram dispostos a esclarecer dúvidas. Agradeço a minha família que mesmo distantes estão lutando para que meu futuro profissional seja trilhado da melhor forma possível. Agradeço também à Petrobras, pelo apoio e incentivo à pesquisa científica, por meio do financiamento parcial do projeto 2019/00154-4, intitulado “*Estudo da Acidificação de Carbonatos Utilizando Sistemas de Baixa Reatividade*”. E por fim, agradeço a todos os amigos que me incentivam e acreditam nos objetivos que posso alcançar.