

Formalização do *Símbolo de Legendre* em Coq

Bruno Rafael dos Santos

Universidade do Estado de Santa Catarina

bruniculos2014@gmail.com

Orientadora: Dra Karina Girardi Roggia

Coorientador: Me Paulo Henrique Torrens

29/11/2024



1 Introdução

2 Objetivos

3 Base Teórica

- Propriedades de Congruência
- Congruência de Grau 2 e Símbolos de Legendre

- 4 Implementação
 - Implementação Externas
 - Informações Úteis
 - Formalização

- 5 Conclusões

- 6 Referências

- A Teoria dos Números é um ramo da matemática que lida, em sua maior parte, com propriedades de números inteiros;
- É muito presente em temas relacionados a criptografia;
- Envolve definições de diversas relações em \mathbb{Z} , sendo duas dessas as relações de divisibilidade e congruência;

- Neste contexto que se apresenta o *símbolo de Legendre*, o qual possui relação com o algoritmo *RESSOL* e está presente na *Lei de Reciprocidade Quadrática*;
- O algoritmo *RESSOL* está relacionado a sistemas de criptografia que utilizam curvas elípticas de acordo com (SARKAR, 2024), (KUMAR, 2020) e (LI; DONG; CAO, 2014);
- A *Lei de Reciprocidade Quadrática* tem aplicações em *zero-knowledge proofs* conforme (WRIGHT, 2016) e pode-ser utilizada para tornar o algoritmo *RESSOL* mais eficiente como apresentado em (COOK, 2023);

Definição 1 (*Divisibilidade*)

$\forall d, a \in \mathbb{Z}$, d **divide** a (ou em outras palavras: a é um múltiplo de d) se e somente se a seguinte proposição é verdadeira:

$$\exists q \in \mathbb{Z}, a = d \cdot q$$

assim, se tal proposição é verdadeira e portanto d divide a , tem-se a seguinte notação que representa tal afirmação:

$$d \mid a$$

caso contrário, a negação de tal afirmação (d não divide a) é representada por:

$$d \nmid a$$

Definição 2 (Congruência)

Para todo $a, b, n \in \mathbb{Z}$, a é congruente a b módulo n se e somente se, pela divisão euclidiana $\frac{a}{n}$ e $\frac{b}{n}$ (onde $0 \leq r_a < |n|$ e $0 \leq r_b < |n|$) tem-se

$$a = n \cdot q_a + r_a$$

e

$$b = n \cdot q_b + r_b$$

com $r_a = r_b$, o que também equivale a dizer que:

$$n \mid a - b$$

tal relação entre os inteiros a , b e n é representada por:

$$a \equiv b \pmod{n}$$

Implementar o *símbolo de Legendre* e realizar a formalização de suas propriedades (apresentadas em (BROCHERO et al., 2013)) e da corretude (da função que o implementa).

Objetivos Específicos

- 1 Obter conhecimentos avançados sobre o assistente de provas *Coq*.
- 2 Realizar o estudo sobre as principais documentações da biblioteca Mathematical Components.
- 3 Desenvolver a capacidade de realizar provas em *Coq* utilizando as táticas da linguagem de provas *SSReflect*.
- 4 Estudar conteúdos de Teoria dos Números relacionados ao *símbolo de Legendre*.
- 5 Implementar uma função que compute o valor do *símbolo de Legendre* e provar a corretude da mesma se utilizando da biblioteca Mathematical Components.
- 6 Provar teoremas úteis para manipulação de expressões envolvendo o *símbolo de Legendre* utilizando-se da biblioteca Mathematical Components.

A seguir serão apresentados os principais teoremas, lemas e definições considerados úteis para a realização do objetivo estabelecido. Esse conteúdo se baseia no livro (BROCHERO et al., 2013) e no que já havia sido implementado na biblioteca Mathematical Components até o momento de realização deste trabalho.

Propriedades de Congruência

① (*Reflexividade*) $a \equiv a \pmod{n}$

② (*Simetria*) $a \equiv b \pmod{n} \implies b \equiv a \pmod{n}$

③ (*Transitividade*)

$$a \equiv b \pmod{n} \wedge b \equiv c \pmod{n} \implies a \equiv c \pmod{n}$$

④ (*Compatibilidade com a soma*)

$$a \equiv b \pmod{n} \wedge c \equiv d \pmod{n} \implies a+c \equiv b+d \pmod{n}$$

⑤ (*Compatibilidade com a diferença*)

$$a \equiv b \pmod{n} \wedge c \equiv d \pmod{n} \implies a-c \equiv b-d \pmod{n}$$

⑥ (*Compatibilidade com o produto*)

$$a \equiv b \pmod{n} \wedge c \equiv d \pmod{n} \implies a \cdot c \equiv b \cdot d \pmod{n}$$

A partir dessa propriedade, note que, para todo $k \in \mathbb{N}$:

$$a \equiv b \pmod{n} \implies a^k \equiv b^k \pmod{n}$$

⑦ (*Cancelamento*)

$$\text{mdc}(c, n) = 1 \implies (a \cdot c \equiv b \cdot c \pmod{n} \iff a \equiv b \pmod{n})$$

Motivação sobre a resolução de congruências de grau 2:

- Sendo p um número primo maior que 2 e $a, b, c \in \mathbb{Z}$ números não divisíveis por p , como motivação suponha que se deseje resolver a seguinte equação:

$$a \cdot x^2 + b \cdot x + c \equiv 0 \pmod{p} \quad (1)$$

Manipulando essa equação por meio das propriedades de congruência se obtém:

$$(2 \cdot a \cdot x + b)^2 \equiv b^2 - 4 \cdot a \cdot c \pmod{p} \quad (2)$$

Congruência de Grau 2 e Símbolos de Legendre

Motivação sobre a resolução de congruências de grau 2:
(continuação)

- Realizando a substituição $X = 2 \cdot a \cdot x + b$ e $d = b^2 - 4 \cdot a \cdot c$ na Equação 2, tem-se:

$$X^2 \equiv d \pmod{p} \quad (3)$$

Portanto, resolver a Equação 1 é equivalente a resolver a Equação 3.

Sobre a Equação 3, se diz que d é um quadrado perfeito em $\mathbb{Z}/(p)$ e também que d é um *resíduo quadrático módulo p* .

Definição 3 (Símbolo de Legendre)

Seja $p > 2$ um número primo e $a \in \mathbb{Z}$, se define o símbolo de Legendre por:

$$\left(\frac{a}{p}\right) = \begin{cases} 1, & \text{se } p \nmid a \text{ e } a \text{ é um resíduo quadrático módulo } p \\ 0, & \text{se } p \mid a \\ -1, & \text{caso contrário (} a \text{ não é um resíduo quadrático)} \end{cases}$$

Pode-se dizer que a relação entre o *símbolo de Legendre* e função φ de Euler, que para um número primo p é $\varphi(p) = p - 1$, se dá pelo seguinte teorema:

Teorema 1 (*Critério de Euler*)

Para todo $a \in \mathbb{Z}$, seja $p > 2$ um número primo, então:

$$\left(\frac{a}{p}\right) \equiv a^{\frac{p-1}{2}} \pmod{p}$$

Para a prova do Critério de Euler, tanto na versão feita por Laurent Théry (que auxiliou na realização deste trabalho) quanto na prova manual apresentada neste trabalho foram necessários os seguintes enunciados:

Lema 1

Seja $p > 2$ um número primo, para todo $a \in \mathbb{Z}$, se $\text{mdc}(a, p) = 1$ e $x^2 \equiv a \pmod{p}$ não tem solução então:

$$(p-1)! \equiv a^{\frac{p-1}{2}} \pmod{p}$$

Teorema 2 (*Teorema de Wilson*)

Seja número composto um número que pode ser escrito como a multiplicação de dois outros números menores então, dado $n > 1$:

$$(n-1)! \equiv \begin{cases} -1 \pmod{n} & \text{se } n \text{ é primo} \\ 0 \pmod{n} & \text{se } n \text{ é composto e } n \neq 4 \end{cases}$$

em que, o Lema 1 junto a uma versão do Critério de Euler para números naturais foram provados por Laurent Théry durante o período de realização deste trabalho, enquanto o Teorema de Wilson já se encontrava na biblioteca.

Os enunciados dos lemas provados por Laurent Théry em *Coq* são:

- Para o Lema 1:

```
Lemma fact_sqr_exp a p :  
  prime p → ~~res_quad p a →  
    (p.-1`!) = a ^ p.-1./2 %[mod p].
```

- Para a versão do Critério de Euler com números naturais (e desconsiderando o caso em que $p \mid a$):

```
Lemma euler_criterion a p :  
  prime p → ~(p %| a) →  
    a ^ p.-1./2 = (if res_quad p a then 1 else p.-1) %[mod p].
```

onde `res_quad` é uma função definida como:

```
Definition res_quad p a :=  
  has (fun i => i * i == a %[mod p]) (iota 0 p).
```

O enunciado do Teorema de Wilson em *Coq* é:

```
Theorem Wilson p : p > 1 → prime p = (p %| ((p.-1)`)!.+1).
```

A prova do Lema `fact_sqr_exp` é bastante complexa, por isso existem alguns pontos a serem mencionados aqui:

- Na prova é feito o uso extenso de estruturas como anéis e corpos (*fields*), relacionadas pelo seguinte lema:

Lema 2

$\forall n \in \mathbb{Z}, \mathbb{Z}/(n)$ é um corpo se e somente se n é primo.

Quanto a implementação destas estruturas na biblioteca tem-se:

- ▶ O tipo ordinal:

```
Inductive ordinal n := Ordinal m of m < n.  
Notation "'I_' n" := (ordinal n).  
Coercion nat_of_ord n (i : 'I_n) :=  
  let: @Ordinal _ m _ := i in m.
```

- A função `inZp`:

```
Definition inZp i :=  
  @Ordinal p (i %% p) (ltn_pmod i (ltn0Sn p')).
```

- A implementação de anéis (com elementos neutros diferentes para cada operação) e corpos na biblioteca:

```
Definition Zp_trunc p := p.-2.
```

```
Notation "'Z_' p" := 'I_(Zp_trunc p).+2  
(at level 8, p at level 2, format "'Z_' p") :  
  type_scope.
```

```
Notation "'F_' p" := 'Z_(pdiv p)  
(at level 8, p at level 2, format "'F_' p") :  
  type_scope.
```

- A prova feita por Laurent, semelhante a prova manual, se baseia na reorganização de um produtório de tamanho arbitrário, logo há o uso extenso do operador bigop sobre o qual tem-se:

- ▶ Definição do operador bigop:

```
Definition bigop R I idx op r (P : pred I) (F : I → R) :  
  R := foldr (fun i x ⇒ if P i then op (F i) x else x)  
    idx r.
```

- ▶ Notação para o operador bigop:

```
Notation "\big [ op / idx ]_ ( i ← r | P ) F" :=  
  (bigop idx op r (fun i ⇒ P%B) (fun i ⇒ F)) :  
    big_scope.
```

- Lema `partition_big` que permite “quebrar” uma aplicação de `bigop` em duas aplicações aninhadas:

```
Lemma partition_big {R : Type} {idx : R}
{op : Monoid.com_law idx} {I : Type} {s : seq I}
{J : finType} {P : pred I} (p : I → J) (Q : pred J)
{F : I → R} :
(∀ i : I, P i → Q (p i)) →
  \big[op/idx]_(i ← s | P i) F i =
    \big[op/idx]_(j | Q j) \big[op/idx]_(i ← s | P i
      && (p i == j)) F i
```


Implementações Externas

- Lema eq_bigr útil para provar a igualdade entre duas aplicações do operador bigop:

```
Lemma eq_bigr r (P : pred I) F1 F2 :  
  (forall i, P i → F1 i = F2 i) →  
    \big[op/idx]_(i ← r | P i) F1 i =  
    \big[op/idx]_(i ← r | P i) F2 i.
```

- Lema big1 útil para provar que um resultado de uma aplicação de bigop é igual ao elemento idx:

```
Lemma big1 {R : Type} {idx : R} {op : Monoid.law idx} I r  
  (P : pred I) F :  
  (forall i : I, P i → F i = idx) →  
    \big[op/idx]_(i ← r | P i) F i = idx.
```

Obs.: no uso deste lema com `apply` pode-se ao invés de provar que o termo geral é sempre igual a `idx`, provar que nenhum termo do tipo `I` satisfaz o predicado `P`.

- Existem diversas notações relacionadas ao operador `bigop` para casos específicos da aplicação deste, como para produtórios, e:
 - ◆ Para cada caso específico, em geral existe mais de uma notação;
 - ◆ Algumas destas se aproveitam da existência de tipos finitos (para os quais há uma lista que contém todos os elementos), como nas seguintes expressões que aparecem durante a prova:

$$\backslash\text{prod_}(i \text{ in } 'F_p \mid i \neq 0\%R) \ i$$
$$\backslash\text{prod_}(j \text{ in } 'F_p \mid j < f \ j) \ (j * f \ j)$$

- Durante a prova aparecem diversos conjuntos que são definidos por meio de predicados sobre tipos finitos como em:

```
set A := [predD1 'F_p & 0%R].
```

```
pose B := [pred i | (i : 'F_p) < f i].
```

assim A contém os elementos de 'F_p diferentes de 0 e B contém todos os elementos de 'F_p tal que $i < f\ i$.

Formalização do Símbolo de Legendre

O *símbolo de Legendre* foi implementado por meio da seguinte função:

```
Definition legendre_symb {p : int} (pL2 : (2 < p)%R)
  (pP : primez p) (a : int) :=
  if (p %| a)%Z then 0%Z else if (resz_quad p a)
  then 1%Z else (-1)%Z.
```

onde `resz_quad` tem a seguinte definição (que por sua vez é baseada na definição de `res_quad`):

```
Definition resz_quad p a :=
  has (fun i => ((i * i)%:Z == a %[mod p])%Z) (iota 0 `|p|).
```

Formalização do Símbolo de Legendre

Um exemplo de uso da função `legendre_symb` é:

```
Compute (legendre_symb (_ : 2 < 7)%R (_ : primez 7) 2).
```

Formalização do Símbolo de Legendre

Quanto a prova de corretude, esta foi implementada usando o tipo indutivo `reflect` e foi dividida em duas partes por fins práticos (uso em táticas da `ssreflect`):

```
Theorem legendre_symbP {p : int} (pL2 : (2 < p)%R)
  (pP : primez p) (a : int):
  reflect (exists x, x^2 = a %[mod p])
  (if (p %| a)%Z then (((legendre_symb pL2 pP a) == 0))
  else ((legendre_symb pL2 pP a) == 1)).
```

```
Theorem legendre_symbnP {p : int} (pL2 : (2 < p)%R) (pP : primez
  p) (a : int):
  reflect (~ exists x, x^2 = a %[mod p])
  ((legendre_symb pL2 pP a) == -1).
```

Formalização do Símbolo de Legendre

Foram provadas todas as propriedades sobre o *símbolo de Legendre* e uma versão do Critério de Euler idêntica apresentadas em (BROCHERO et al., 2013), além de algumas propriedades auxiliares, mas por fim de brevidade serão mostradas aqui apenas os 2 primeiros grupos:

O enunciado do Critério de Euler em *Coq* é dado por:

```
Lemma eulerz_criterion {p : int} (pL2 : (2 < p)%R)
(pP : primez p) (a : int):
  (a ^ ((p - 1) %/ 2)%Z =
    (legendre_symb pL2 pP a) %[mod p])%Z.
```

Formalização do Símbolo de Legendre

e considerando um número primo $p > 2$ e $a, b \in \mathbb{Z}$ tem-se as seguintes propriedades:

- $a \equiv b \pmod{p} \rightarrow \left(\frac{a}{p}\right) = \left(\frac{b}{p}\right)$, cuja declaração dada em *Coq* é:

```
Lemma legendre_symbE (p a b : int) (pL2 : (2 < p)%R)
(pP : primez p):
  (a == b %[mod p])%Z →
  ((legendre_symb pL2 pP a) == (legendre_symb pL2 pP b)).
```


Formalização do Símbolo de Legendre

- $p \nmid a \rightarrow \left(\frac{a^2}{p}\right) = 1$, cuja declaração dada em *Coq* é:

Lemma legendre_symb_Ndvd (p a b : **int**) (pL2 : (2 < p)%R)
(pP : primez p):
~~(p %| a)%Z \rightarrow (legendre_symb pL2 pP (a^2)) == 1.

- $\left(\frac{-1}{p}\right) = (-1)^{\frac{p-1}{2}} = 1 \leftrightarrow p \equiv 1 \pmod{4}$, cuja declaração dada em *Coq* é:

Lemma legendre_symb_Neg1 (p : **int**) (pL2 : (2 < p)%R)
(pP : primez p):
((legendre_symb pL2 pP (-1)) == 1) = (p == 1 %[mod 4])%Z.

Formalização do Símbolo de Legendre

- $\left(\frac{a \cdot b}{p}\right) = \left(\frac{a}{p}\right) \cdot \left(\frac{b}{p}\right)$, cuja declaração dada em *Coq* é:

```
Lemma legendre_symb_mul (p a b : int) (pL2 : (2 < p)%R) (pP :  
  primez p):  
  (legendre_symb pL2 pP (a * b)%R) =  
  ((legendre_symb pL2 pP a) *  
   (legendre_symb pL2 pP b))%R.
```

Formalização do Símbolo de Legendre

- $\left(\frac{a \cdot b}{p}\right) = \left(\frac{a}{p}\right) \cdot \left(\frac{b}{p}\right)$, cuja declaração dada em *Coq* é:

```
Lemma legendre_symb_mul (p a b : int) (pL2 : (2 < p)%R) (pP :  
  primez p):  
  (legendre_symb pL2 pP (a * b)%R) =  
  ((legendre_symb pL2 pP a) *  
   (legendre_symb pL2 pP b))%R.
```

Formalização do Símbolo de Legendre

Algumas informações usadas durante as provas destes enunciados são muito úteis para futuros usuários da biblioteca; se destacam os seguintes itens:

- Os números inteiros são definidos da seguinte forma na biblioteca:

```
Variant int : Set := Posz of nat | Negz of nat.
```

e Posz é uma definida como coerção de nat para int, o que permite utilizar naturais em expressões com números inteiros.

Formalização do Símbolo de Legendre

- A aplicação do construtor Posz não é impressa, o que gera ambiguidades como entre as expressões $\text{Posz } (a - b)$ e $\text{Posz } a - \text{Posz } b$ que são impressas como $a - b$;
 - ▶ caso o usuário deseje imprimir as aplicações de Posz ele pode usar o comando:

```
Set Printing Coercions.
```

- A aplicação da função Posz possui certas propriedades, por exemplo:
 - ▶ É sempre o caso de que $\text{Posz } m + n = \text{Posz } m + \text{Posz } n$, assim tal reescrita pode ser feita utilizando o lema:

```
Lemma PoszD : {morph Posz : m n / (m + n)%N ↦ m + n}.
```

e para multiplicação, de forma análoga, pode ser utilizado o lema PoszM .

Formalização do Símbolo de Legendre

- ▶ Quando $n \leq m$ tem-se $\text{Posz } m - n = \text{Posz } m - \text{Posz } n$, assim tal reescrita pode ser feita utilizando o lema:

Lemma `subzn` ($m\ n : \text{nat}$) :
 $(n \leq m) \% N \rightarrow m \% Z - n \% Z = (m - n) \% N.$

- ▶ Para operação de resto da divisão tem-se o lema:

Lemma `modz_nat` ($m\ d : \text{nat}$) : $(m \% d) \% Z = (m \% d) \% N.$

- ▶ Há também lemas para fazer manipulações semelhantes com outras operações (mas as vezes é necessário reescrever o operador em sua versão para aneis):

Lemma `rmorphXn` $n : \{\text{morph } f : x / x^+ + n\}.$

Formalização do Símbolo de Legendre

- Para manipulações de expressões com `int` não se utilizam lemas específicos para este tipo (por motivo explicado na Subsessão 2.3.4);
 - ▶ Para comutatividade da adição, por exemplo, se usa `addrC`, para o qual o comando `Print` traz a mensagem:

```
GRing.addrC =  
fun s : nmodType =>  
  GRing.isNmodule.addrC  
    (GRing.Nmodule.GRing_isNmodule_mixin  
      (GRing.Nmodule.class s))  
      : forall s : nmodType, commutative +%R  
  
Arguments GRing.addrC {s} x y
```

Formalização do Símbolo de Legendre

- Para lidar com o tipo `ordinal` e coerções:

- ▶ Para uma hipótese da forma:

$H : \text{forall } i : 'I_p, P\ i$

tendo no contexto as variáveis $p : \text{int}$ e $x : 'Z_p$, não é possível instanciar tal hipótese com x pois é necessário que a função aplicada sobre p na notação resulte em p , ou seja, é necessário escrever p como alguma variável somada a 2 o que pode ser resolvido pelo uso sucessivo da tática `case`: $p \Rightarrow p$.

- ▶ A notação $:> X$ após uma equação (ou expressões como $<>$) indica o tipo de ambos os termos como X (essa notação é implementada na livreria padrão de *Coq*), o que pode ser usado para forçar uma coerção; como exemplo tem-se o lema:

`Lemma natz (n : nat) : n%:R = n%:Z :> int.`


Neste trabalho foi feito(a):


- Implementação do *símbolo de Legendre*;
- Prova de corretude da função que representa *símbolo de Legendre*;
- Prova das propriedades sobre o *símbolo de Legendre* apresentadas em (BROCHERO et al., 2013);
- Alguns lemas simples relacionados a números primos inteiros (a biblioteca só trata de números primos naturais);


Obs.: também foram implementados conteúdos em relação ao *inverso multiplicativo módulo n* , porém tais conteúdos não foram utilizados na implementação do *símbolo de Legendre* e podem ser inúteis, visto que a intenção em tê-los poderia ser satisfeita com o uso de *corpos* (já implementados na biblioteca).


Quanto a trabalhos futuros:


- Com as implementações mostradas aqui e principalmente com as implementações realizadas por Laurent Théry (considerando a possibilidade de tratar apenas de números naturais), é facilitada a implementação do algoritmo *RESSOL* na biblioteca;
- As implementações (tanto feitas aqui quanto as de Laurent) junto ao conhecimento obtido pela análise da prova do enunciado `fact_sqr_exp` (e a própria prova) sobre manipulação do operador `bigop` e de conjuntos abre caminho para a prova da *Lei de Reciprocidade Quadrática* (dada sua prova manual).

 BROCHERO, F. E. et al. *Teoria dos Números: um passeio com primos e outros números familiares pelo mundo inteiro*. 3. ed. Rio de Janeiro : IMPA: IMPA, 2013. (Projeto Euclides). ISBN 978-85-2444-0312-5.


 COOK, J. D. *Quadratic reciprocity algorithm*. 2023. Disponível em: <<https://www.johndcook.com/blog/2023/01/01/quadratic-reciprocity-algorithm/>>. Acesso em: 06 de jun. de 2024.

 KUMAR, R. *An algorithm for finding square root modulo p* . 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.48550/arXiv.2008.11814>>. Acesso em: 15 de maio de 2024.

 LI, Z.; DONG, X.; CAO, Z. Generalized cipolla-lehmer root computation in finite fields. In: ICINS 2014 - 2014 INTERNATIONAL CONFERENCE ON INFORMATION AND NETWORK SECURITY, CP657. *ICINS 2014 - 2014 International Conference on Information and Network Security*. Pequim, China, 2014. p. 163–168.

 SARKAR, P. Computing square roots faster than the tonelli-shanks/bernstein algorithm. *Advances in Mathematics of Communications*, v. 18, n. 1, p. 141–162, 2024.

Disponível em: <<https://www.aims sciences.org/article/id/6212ee892d80b75aa4a24c21>>.

 WRIGHT, S. Four interesting applications of quadratic reciprocity. In: _____. *Quadratic Residues and Non-Residues: Selected Topics*. Suíça: Springer Cham, 2016. p. 79–118. ISBN 978-3-319-45955-4. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-45955-4_4>.